

Fulvio Mete

***Spettroeliografia digitale
una finestra sul sole***



Light from infinity.org

Questo libro è dedicato alla memoria di Fabio BOCCI, astrofilo di grande competenza e persona buona e cortese, che più volte mi aveva esternato il suo interesse per la spettroeliografia.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Dott. Giorgio Viavattene, fisico specializzato in fisica solare, per l'accurata opera di revisione del presente lavoro.

Premessa

Il Sole, la stella a noi più vicina, costituisce un gigantesco laboratorio dove possono essere studiati fenomeni fisici che, per la loro scala, non sono accessibili alla sperimentazione terrestre e non possono essere studiati in stelle più lontane: proprio per questo lo studio del Sole ha contribuito, e contribuisce in modo notevole, al progresso generale dell'astrofisica. Questo concetto è altrettanto valido per la spettroscopia e la spettrografia, che trovano nel Sole una grande opportunità di studio e sperimentazione.

Questo testo di spettroeliografia amatoriale è dedicato a tutti, ma in particolare a coloro che già possiedono conoscenze ed hanno fatto esperienze nel campo della spettroscopia. Esso è concepito non da un fisico solare, ma da un amatore per gli altri astrofili, con un occhio particolare alla semplicità. Non è quindi un libro esclusivo: tuttavia, per ripetere le esperienze da me mostrate occorrono un discreto bagaglio di conoscenze di spettroscopia, tecniche, ed una certa abilità pratica. Per coloro, invece, che non intendono sobbarcarsi una notevole dose di sacrificio personale ed impegno costruttivo per realizzare spettroeliografi ma che comunque hanno conoscenze di base e desiderano approfondire lo studio di questo settore dell'indagine scientifica solare ho cercato di rendere il testo quanto più possibile semplice, comprimendo e semplificando una materia estremamente complessa in modo da attrarre la loro attenzione e mantenere viva ed attuale la loro passione per l'osservazione solare. Questo testo divulgativo di spettroeliografia è sicuramente il primo in Italia sul tema specifico, ed il secondo a livello planetario dopo quello, molto ben fatto, dell'amico Ken Harrison. A differenza di questo, nel quale sono riportate le esperienze di un certo numero di astrofili (me compreso) io ho cercato tuttavia di esporre quasi esclusivamente le mie esperienze, derivanti da molti anni di studio e sperimentazione. Per i neofiti della spettroscopia, il mio consiglio è di leggere preliminarmente il mio libro "*Cenni di spettroscopia astronomica amatoriale*" al *link*

<http://www.lightfrominfinity.org/Libro%20di%20Spettroscopia/Libro%20Spettroscopia.htm>

Esso costituirà un'ottima base per comprendere a fondo il contenuto del presente lavoro. Per tutti indistintamente un augurio di buona lettura.

Indice

Il Sole, la stella più vicina.....	4
Gli strumenti professionali per l'osservazione solare.....	29
Lo spettro solare.....	39
La spettroeliografia amatoriale.....	70
La rivoluzione della spettroeliografia digitale.....	74
Configurazioni di spettroscopi per spettroeliografia.....	85
Spettroeliografi digitali auto costruiti Littrow.....	115
Un po' di conti.....	131
Sintesi delle operazioni da effettuarsi in spettroeliografia digitale.....	142
Il software.....	154
Risultati ottenibili con uno spettroeliografo Littrow.....	162
Elaborazione delle immagini spettroeliografiche.....	192
Non solo imaging.....	198
Conclusioni.....	207
Riferimenti.....	208

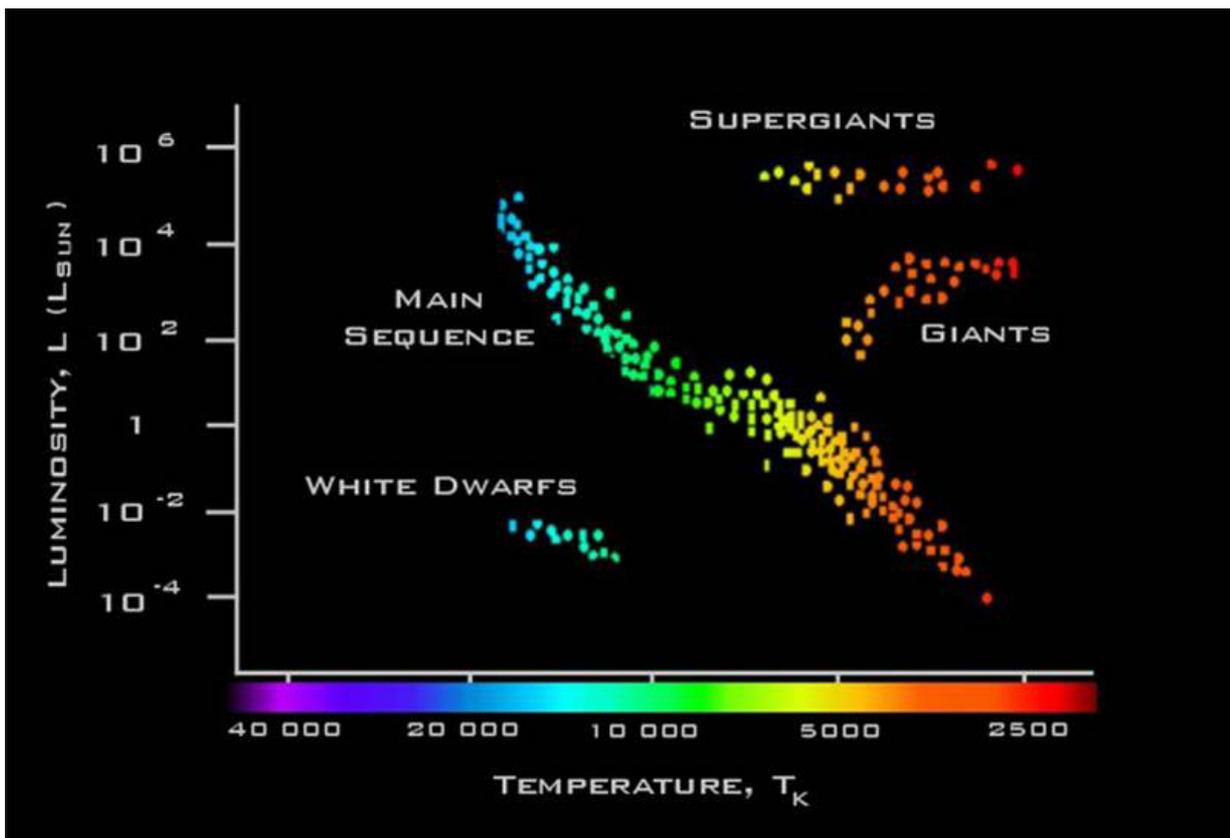
Prima di parlare di spettroeliografia è bene fornire qualche notizia sull'oggetto di interesse, il Sole.

Il Sole, la stella più vicina

La maggior parte della luce visibile che osserviamo è quella che proviene dal Sole, la stella a noi più vicina .Ma che cos'è il Sole?

Il Sole è una stella di dimensioni medio-piccole, di raggio equatoriale pari a circa 696.000 Km ,distante mediamente 149.597.000 Km dalla terra (secondo l'ultima definizione di Unità astronomica definita dalla IAU), di massa pari a 333400 volte la terra e costituita principalmente da Idrogeno (circa il 73.46% della sua massa), ed Elio (circa il 24.85%), cui si aggiungono elementi più pesanti (metalli) presenti per l'1.69 %(Rif Bianucci "Il Sole" - Giunti Ed.).Essa è classificata come una nana gialla di tipo spettrale G2 V: G2 indica che la stella ha una temperatura superficiale in fotosfera di 5 776 K (La temperatura viene comunemente misurata con la scala Kelvin (K), detta "scala assoluta",dove $0^{\circ} = -273$ C.Quindi $5776\text{ K} = 5776 - 273 = 5503$ C), caratteristica che conferisce alla sua luce un colore bianco estremamente intenso e cromaticamente freddo, che però spesso può apparire giallognolo, a causa dello scattering dell'atmosfera terrestre. La V (5 in numeri romani) indica che il Sole, come la maggior parte delle stelle, è nella sequenza principale, ovvero in una lunga fase di equilibrio stabile in cui l'astro fonde, nel proprio nucleo, l'idrogeno in

elio. L'enorme quantità di energia viene poi trasportata verso l'esterno con due mezzi: quello *radiativo* (emissione ed assorbimento di fotoni) effettuato dalla zona che prende tale nome, e quello *convettivo*, tramite celle di convezione (circolazione di celle di gas caldo e freddo) più esterno rispetto al primo, a carico della zona solare così denominata.



Nel diagramma HR, che lega la magnitudine assoluta alla temperatura ed alla classe spettrale il Sole si trova nella parte centrale della sequenza principale.

Tale processo di fusione nucleare genera ogni secondo una grande quantità di energia (equivalente a $3,83 \times 10^{26}$ J al secondo), emessa nello spazio sotto forma di radiazioni elettromagnetiche (radiazioni solari), flusso di particelle (vento solare) e neutrini. La radiazione solare, emessa fondamentalmente come luce visibile ed infrarossi, consente la vita sulla Terra fornendo l'energia necessaria ad attivare i principali meccanismi che ne stanno alla base; inoltre l'insolazione della superficie terrestre regola il clima e la maggior parte dei fenomeni meteorologici.

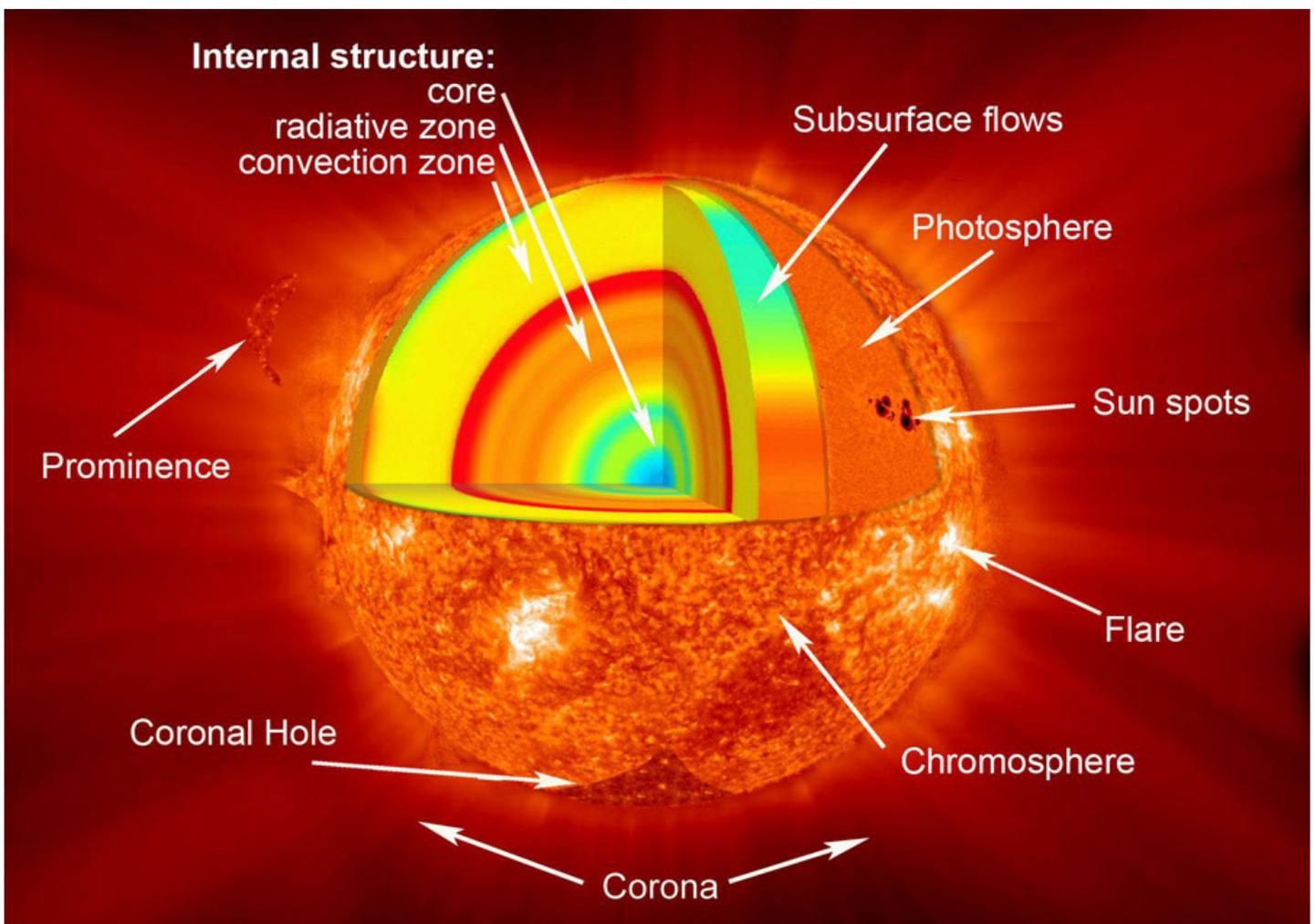
La fusione nucleare inoltre fa sì che la stella sia in uno stato di equilibrio, sia idrostatico, ossia non si espande (a causa della pressione di radiazione delle reazioni termonucleari) né si contrae (per via della forza di gravità, cui sarebbe naturalmente soggetta), sia termico. Una stella di classe G2 come il Sole impiega, considerando il valore della sua massa, circa 10 miliardi di anni per esaurire completamente l'idrogeno nel suo nucleo.

Il Sole si trova a circa metà della propria sequenza principale. Al termine di questo periodo di stabilità, tra circa 5 miliardi di anni, il Sole entrerà in una fase di forte instabilità dando vita ad una cd." gigante rossa": nel momento in cui l'idrogeno del nucleo sarà convertito in elio per circa il 10%, gli strati immediatamente superiori subiranno infatti un collasso dovuto alla scomparsa della pressione di radiazione delle reazioni termonucleari. Il collasso determinerà un incremento termico fino al raggiungimento di temperature tali da innescare la fusione dell'idrogeno negli strati superiori, che provocheranno l'espansione della stella fino ad oltre l'orbita di Mercurio; l'espansione causerà un raffreddamento del gas (fino a 3500 K), motivo per il quale la stella avrà una colorazione fotosferica tipicamente gialla intensa. Quando anche l'idrogeno dello strato superiore al nucleo sarà totalmente convertito in elio (entro poche decine di milioni di anni) si avrà un nuovo collasso, che determinerà un aumento della temperatura del nucleo di elio fino a valori di circa 106 milioni di K; a questa temperatura si innescherà repentinamente la fusione dell'elio. A causa delle elevatissime temperature del nucleo, la fusione dell'elio si esaurirà in breve tempo (qualche decina di milioni di anni) e i prodotti di fusione, non impiegabili in nuovi cicli termonucleari a causa della piccola massa della stella, si accumuleranno inerti nel nucleo; frattanto, venuta a mancare nuovamente la pressione di radiazione che spingeva verso l'esterno, avverrà un successivo collasso che determinerà l'innescò della fusione dell'elio nel guscio che avvolge il nucleo e dell'idrogeno nello strato ad esso immediatamente superiore. Queste nuove reazioni produrranno una quantità di energia talmente elevata da provocare una nuova espansione dell'astro, che raggiungerà così dimensioni prossime ad 1 UA (circa 100 volte quelle attuali), tanto che la sua atmosfera arriverà ad inglobare molto probabilmente Venere. Incerto è invece il destino della Terra: alcuni astronomi ritengono che anche il nostro pianeta verrà inglobato dalla stella morente; altri invece ipotizzano che il pianeta si salverà, poiché la perdita di massa da parte della nostra stella farebbe allargare la sua orbita, che slitterebbe di conseguenza sino a quasi 1,7 UA. Il nostro pianeta sarà però inabitabile: gli oceani saranno evaporati a causa del forte calore e gran parte dell'atmosfera verrà dispersa nello spazio dall'intensa energia termica. Entro 7,8 miliardi di anni, esaurito ogni processo termonucleare, il Sole rilascerà i suoi strati più esterni, che verranno spazzati via sotto forma di

"supervento" creando una nebulosa planetaria; le parti più interne collasseranno e daranno origine ad una nana bianca (circa delle dimensioni della Terra), che lentamente si raffredderà sino a diventare, nel corso di centinaia di miliardi di anni, una nana nera.

La struttura del Sole

La struttura solare si suddivide in otto parti:
Nucleo , zona radiativa, zona di transizione, zona convettiva, fotosfera, cromosfera, transizione cromosfera-corona (che non è una vera e propria zona, dato che temperatura e densità variano in essa in modo quasi continuo), corona.



Nell'immagine soprastante (fonte SOHO- NASA -ESO) viene illustrata la struttura interna ed alcune delle caratteristiche più importanti del disco solare.

Il nucleo solare rappresenta in volume il 10% della stella, in massa oltre il 40%. È qui che avvengono le reazioni di fusione nucleare, fonte principe dell'energia solare.

Con la fusione nucleare 4 nuclei d'idrogeno, in condizioni di temperatura e pressione estremamente alte si convertono in un nucleo di Elio ed alcune particelle minori (tra le quali i neutrini), il cui peso risulta inferiore a quello dei 4 nuclei d'idrogeno iniziali; la differenza è convertita in energia sulla base della celeberrima equazione Einsteniana $E = m c^2$.

Gli astrofisici ritengono che il nucleo solare abbia dimensioni prossime a 0,25 raggi solari (174.000 Km), con una densità superiore a 150 000 kg/m³ (150 volte quella dell'acqua), una temperatura che raggiunge 15 600 000 K ed una pressione di circa 500 miliardi di atmosfere (in media, in quanto dipende dal ciclo solare). E' la combinazione di simili valori a favorire la fusione nucleare dell'idrogeno in elio. Il nucleo è l'unica regione della nostra stella in cui, attualmente avvenga la fusione nucleare. Tali reazioni liberano energia sotto forma di radiazione γ che, una volta emessa dal nucleo, viene assorbita e riemessa dalla materia degli strati superiori, contribuendo a mantenere alta la temperatura; nell'attraversare gli strati della stella la radiazione elettromagnetica perde energia assumendo lunghezze d'onda sempre maggiori, passando dalla banda γ alla banda X e ultravioletta, per poi diffondersi nello spazio come luce visibile. Un altro prodotto delle reazioni nucleari sono i neutrini, particelle che raramente interagiscono con la materia e che dunque attraversano liberamente lo spazio.

la zona radiativa è situata all'esterno del nucleo, si estende da circa 0,25 sino a 0,7 raggi solari (circa 490.000 Km); essa assorbe l'energia prodotta dal nucleo e la trasmette per irraggiamento (dove il nome) agli strati superiori. Pressione e temperatura sono ancora abbastanza elevate da permettere il trasferimento dell'energia allo strato successivo.

La zona di transizione tra la porzione radiativa e quella convettiva prende il nome di tachocline e si estende, secondo recenti studi eliosismologici, a partire da 0,7 raggi solari. Gli astrofisici ritengono che essa svolga un ruolo determinante nella genesi del campo magnetico solare, in quanto interverrebbero nella dinamo solare (meccanismo grazie al quale si origina il campo magnetico della nostra stella) rinforzando i deboli campi poloidali per crearne uno più intenso di forma toroidale.

La zona convettiva ha uno spessore di circa 200 000 km e si trova nella porzione esterna del Sole, a partire da circa il 70% del raggio solare, dopo la zona di transizione.

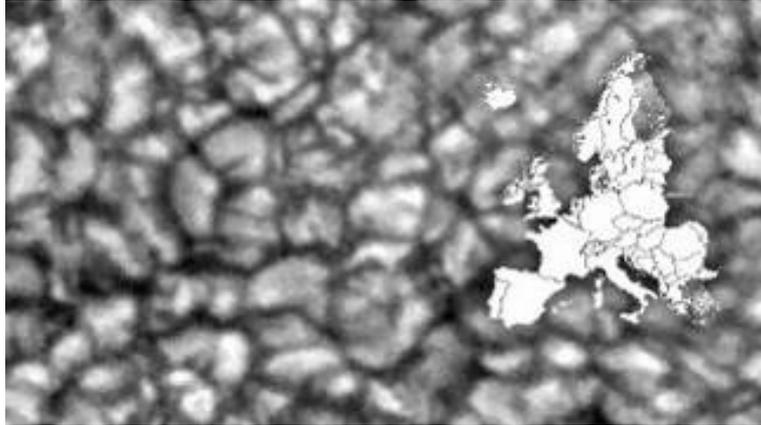
L'area è caratterizzata da temperature e densità inferiori a quelle degli strati sottostanti; di conseguenza, energia e calore non possono essere trasferiti per irraggiamento, ma attraverso moti convettivi. La materia più calda e meno densa

viene trasportata in superficie, dove cede parte della propria energia termica; una volta raffreddata, la materia risprofonda alla base della zona convettiva, dove riceve nuovamente il calore proveniente dalla zona radiativa. A differenza dello strato sottostante, dunque, nella zona convettiva la materia è in costante movimento. Questo costante e turbolento movimento sembra essere una delle cause fondamentali della dinamo solare e dell'origine dei granuli.

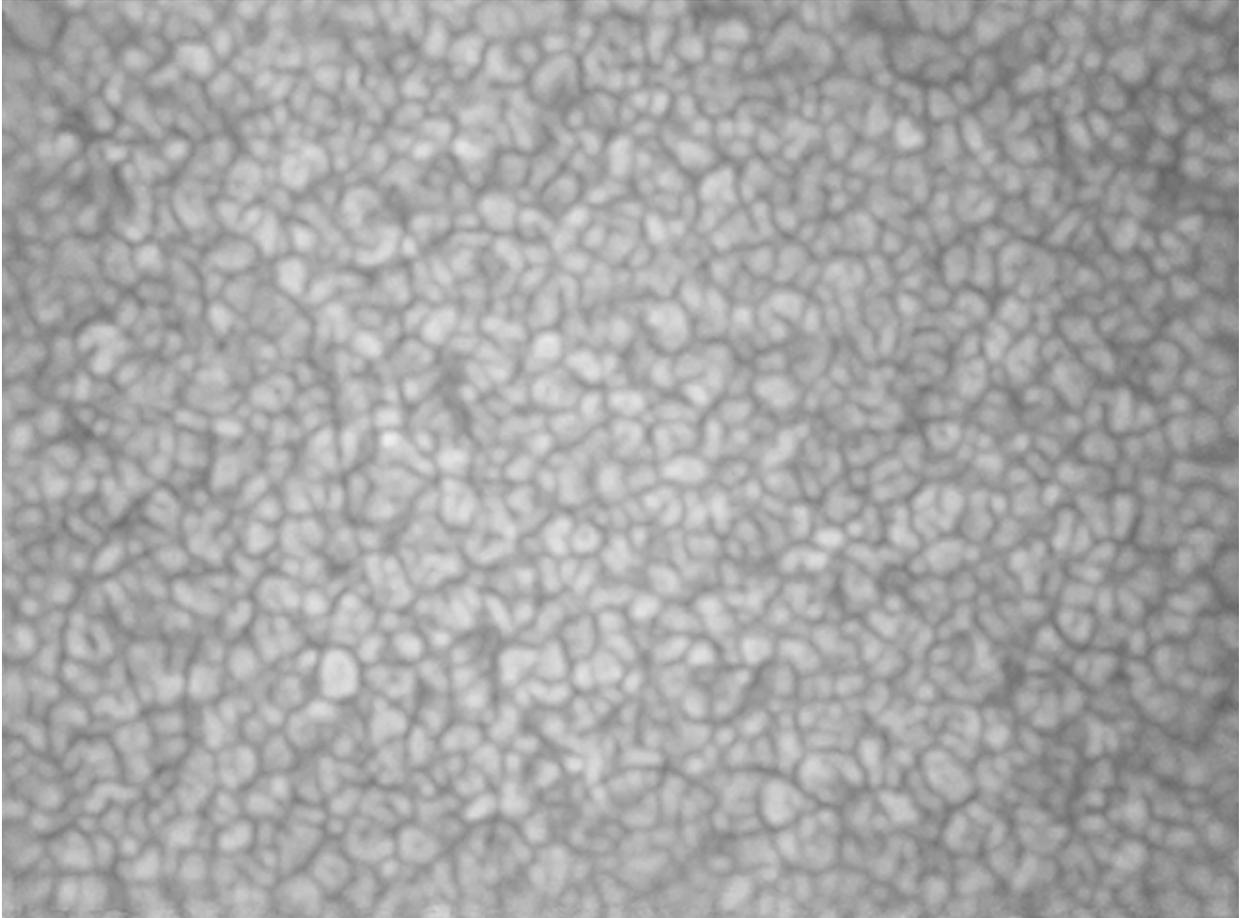
Le colonne termiche della zona convettiva lasciano segni sulla fotosfera solare che prendono il nome di granuli, mesogranuli e supergranuli solari. Il moto turbolento del plasma e delle particelle cariche della zona convettiva generano un potente campo magnetico, caratterizzato da poli appaiati (nord e sud) disposti lungo tutta la superficie solare. Il campo inverte il proprio verso ogni undici anni, in corrispondenza del massimo del ciclo solare. Il campo magnetico solare è all'origine di diversi fenomeni che prendono complessivamente il nome di "attività solare"; tra essi si annoverano le macchie fotosferiche, i flare (o brillamenti) i CME (eiezioni di massa coronale) e le variazioni nell'intensità del vento solare, che diffonde materia attraverso il sistema solare.

La fotosfera è lo strato superficiale del Sole, spesso mediamente 500 Km (il suo spessore dipende dal ciclo), al di sotto del quale la stella diviene opaca alla luce visibile; si tratta dunque del primo strato visibile, dal quale l'energia proveniente dall'interno è libera di propagarsi nello spazio e costituisce l'inizio dell'atmosfera solare, che prosegue con cromosfera e corona. È sede di fenomeni come le macchie solari. Lo spettro fotosferico presenta caratteristiche relativamente simili a quelle dello spettro continuo di un corpo nero riscaldato alla temperatura di 5776 K, e appare intervallato dalle linee di assorbimento della tenue atmosfera stellare. All'osservazione diretta la fotosfera presenta un aspetto granuloso, dovuto alla presenza della granulazione. Essa è sede di fenomenologie particolari e complesse, come la granulazione e le macchie solari.

I granuli fotosferici sono causati dalle colonne ascendenti e discendenti di plasma della zona di convezione, visibili nella loro parte superiore in fotosfera. Essi hanno un diametro di 800-1300 Km circa, un'estensione angolare media di 0.8-1.8 arcsec e durano da 4 a 15 minuti circa: sono formati da una zona periferica scura, che è la parte esterna della colonna di plasma discendente ed una centrale chiara, ascendente, più calda. Lo spazio intergranulare, più scuro, sottende circa 0.4-0.5 arcsec. Nella figura (fonte NST-BBSO) una zona di granulazione fotosferica paragonata all'estensione dell'Europa.



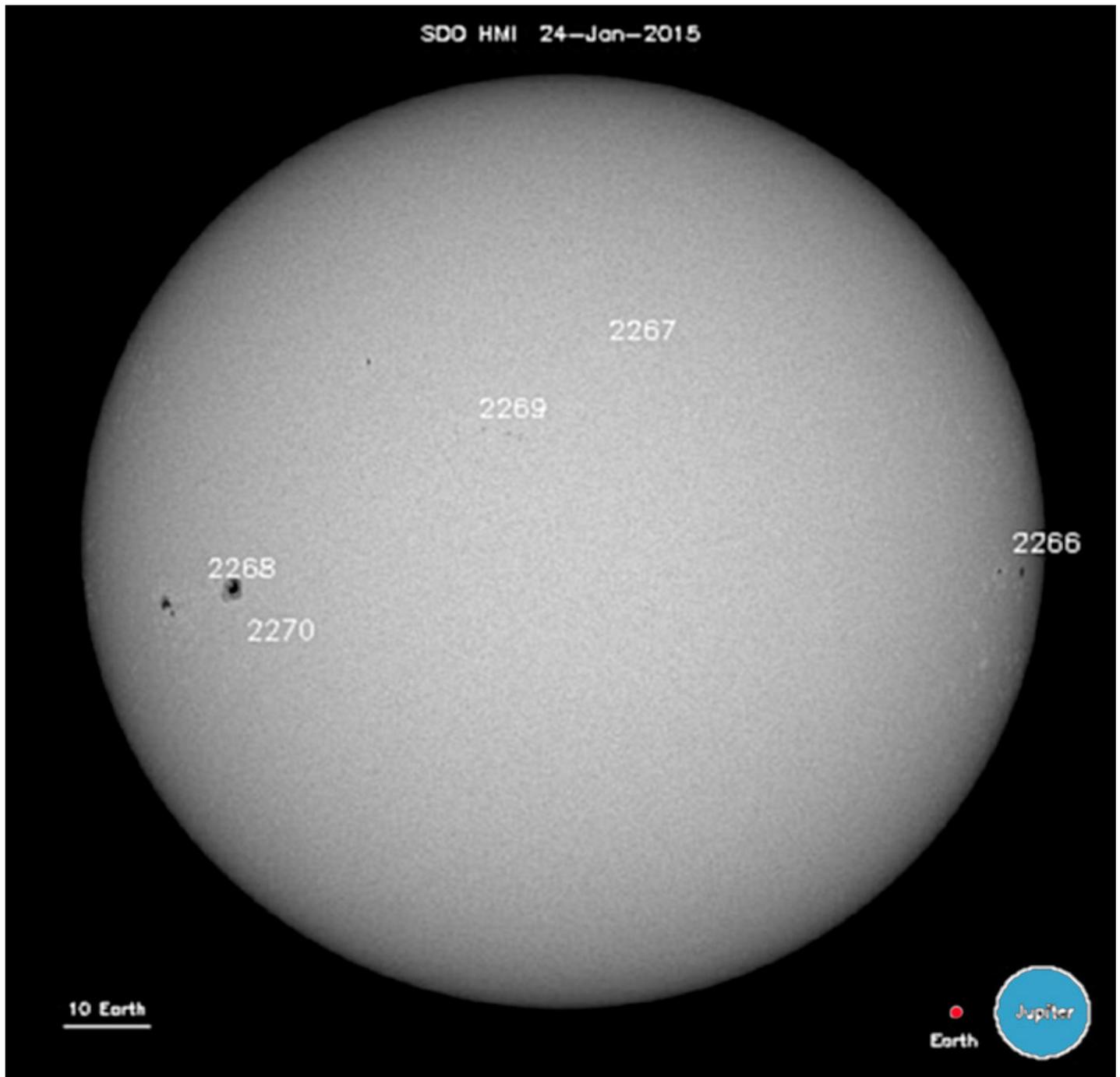
Nell'immagine che segue un'eccellente ripresa amatoriale della granulazione fotosferica effettuata dall'astrofilo Salvatore Lo Vecchio con un telescopio rifrattore apocromatico da 150 mm a 9.6 metri di focale equivalente ed una camera DMK 21. Come si osserva le dimensioni dei granuli sono varie, come anche la loro forma, che va da rotondeggiante a rettangolare, ovvero composita.



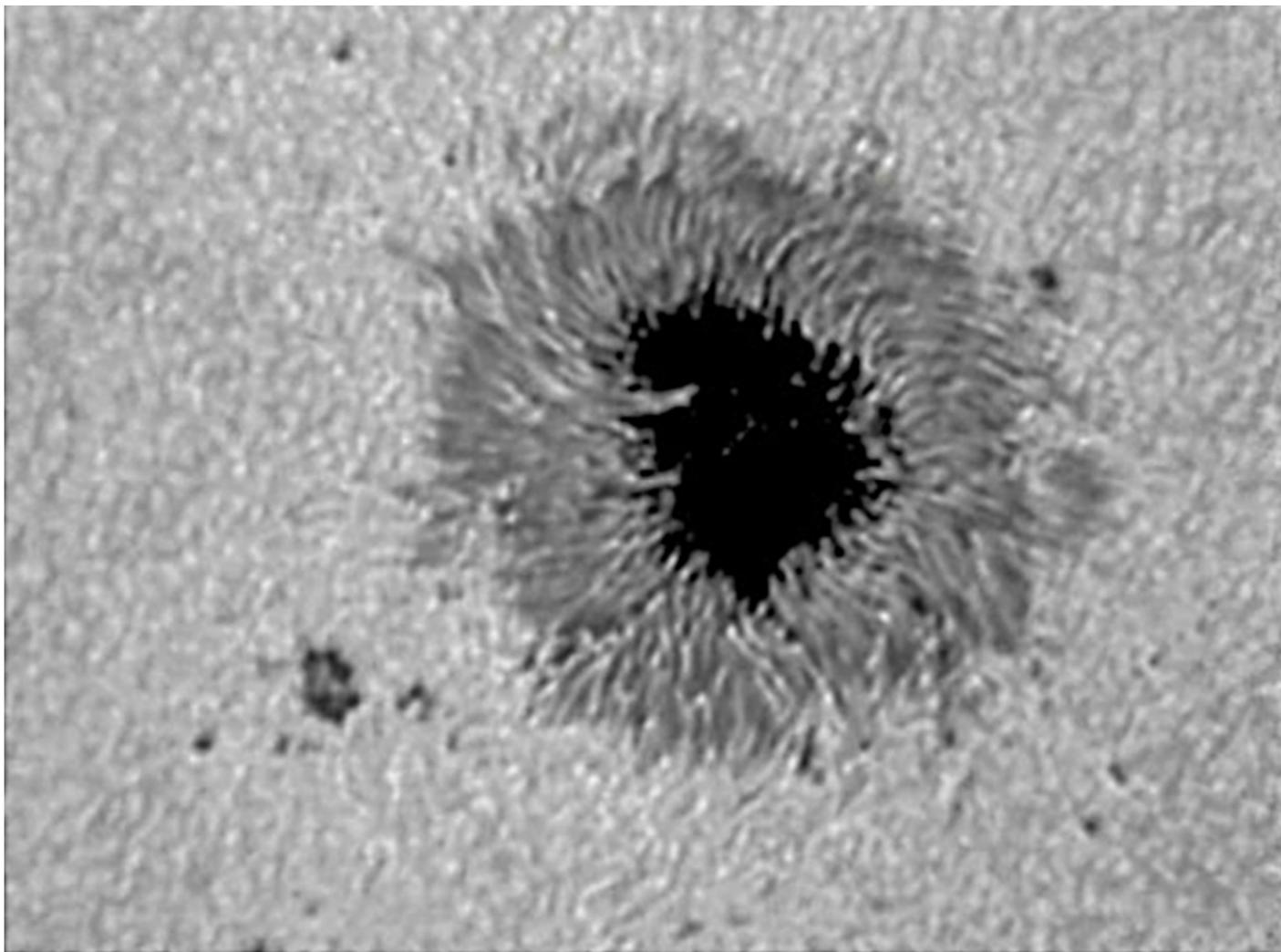
Le macchie solari sono zone del Sole distinte dal resto della superficie fotosferica per la temperatura inferiore ed una forte attività magnetica. Nonostante siano molto calde (tra 3000 e 4500 K) appaiono scure per contrasto rispetto alla restante superficie solare a 5776 K. Esse normalmente appaiono in coppie aventi opposta polarità magnetica.

Loro causa è la forte attività magnetica che inibisce la convezione. (infatti nelle macchie e nelle loro immediate vicinanze non è in genere visibile la granulazione). Il numero delle macchie solari cresce da un minimo ad un massimo con cadenza undecennale (cd "ciclo solare").

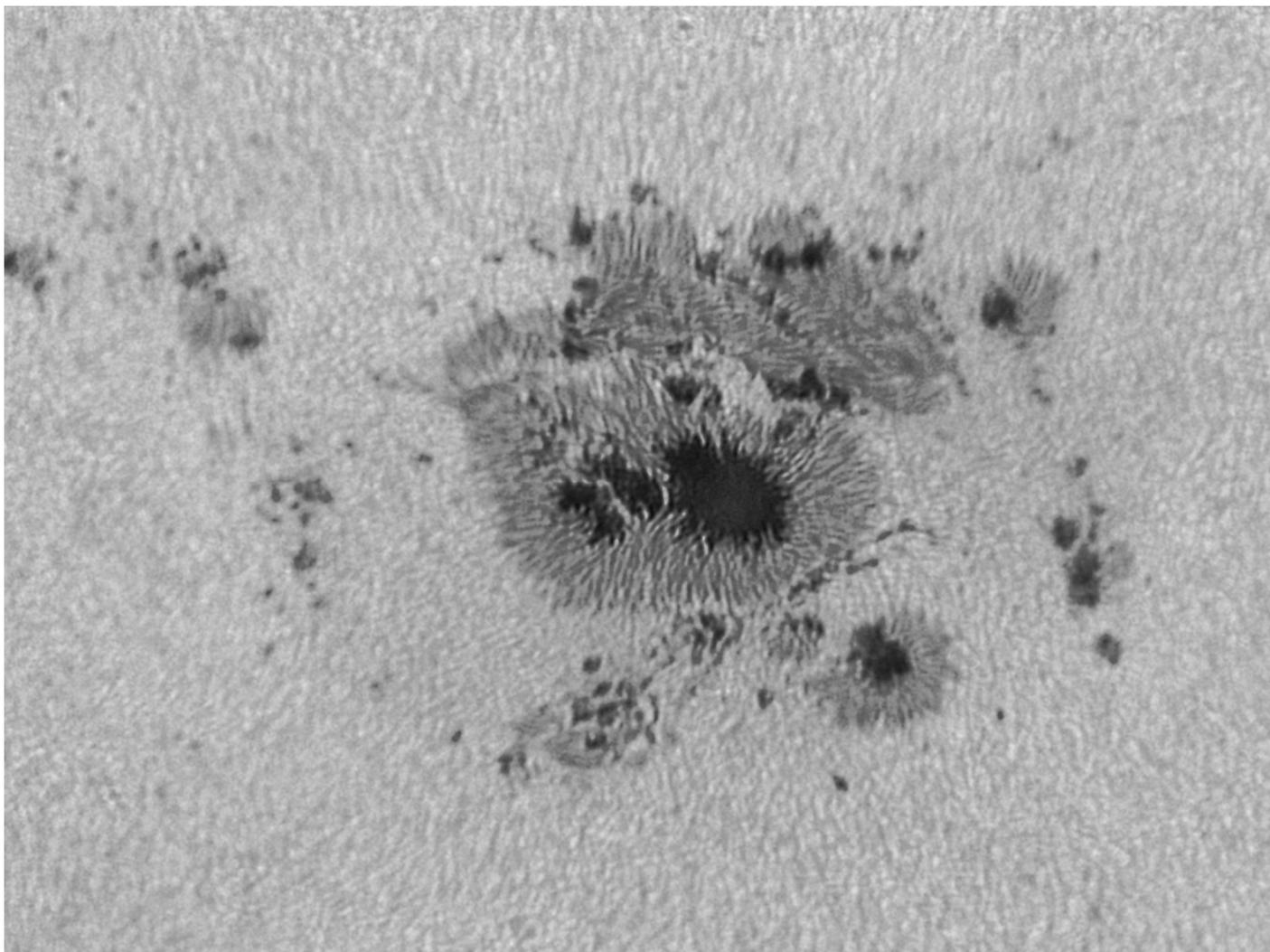
Nell'immagine seguente il disco solare con alcune macchie (fonte SOHO -SDO)



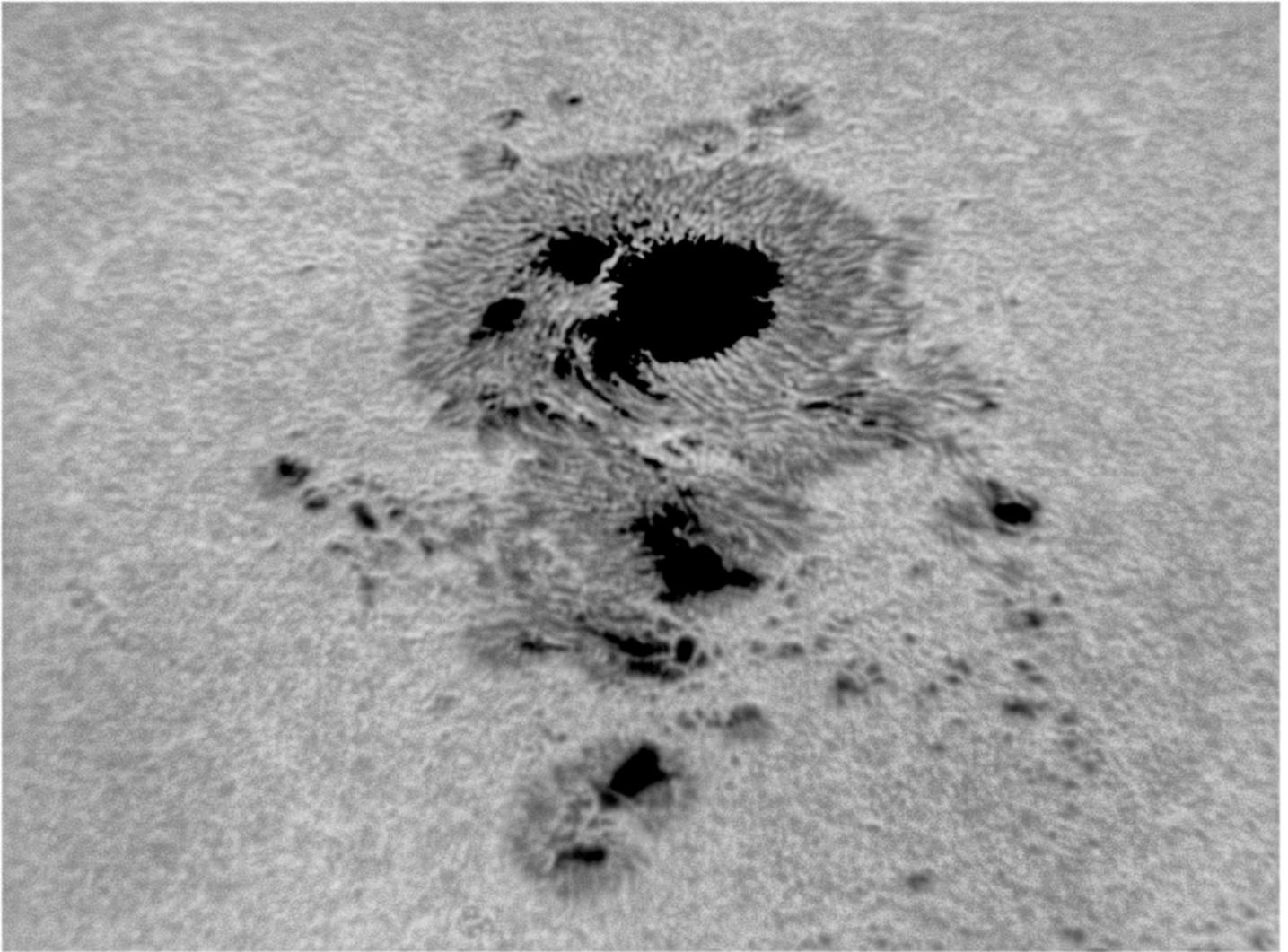
Quelle che seguono sono foto dell'autore di macchie solari ad alta risoluzione in luce bianca, ottenute la prima con un riflettore newton solare con specchio non alluminato da 200 mm e le altre due con un rifrattore apocromatico da 115 mm: notare la granulazione ed i filamenti della zona penumbrale , di circa 1 arcsec di dimensione angolare. Si osserva inoltre, netta , la distinzione tra la parte più scura centrale , l'ombra e quella periferica più chiara, la penombra. Il rapporto delle rispettive aree (A_u/A_p) oscilla tra 0.24 per le macchie piccole e 0.32 per le grandi (cfr "On umbra /penumbra ratio of sunspots"- Brandt and Schmidt-1990).



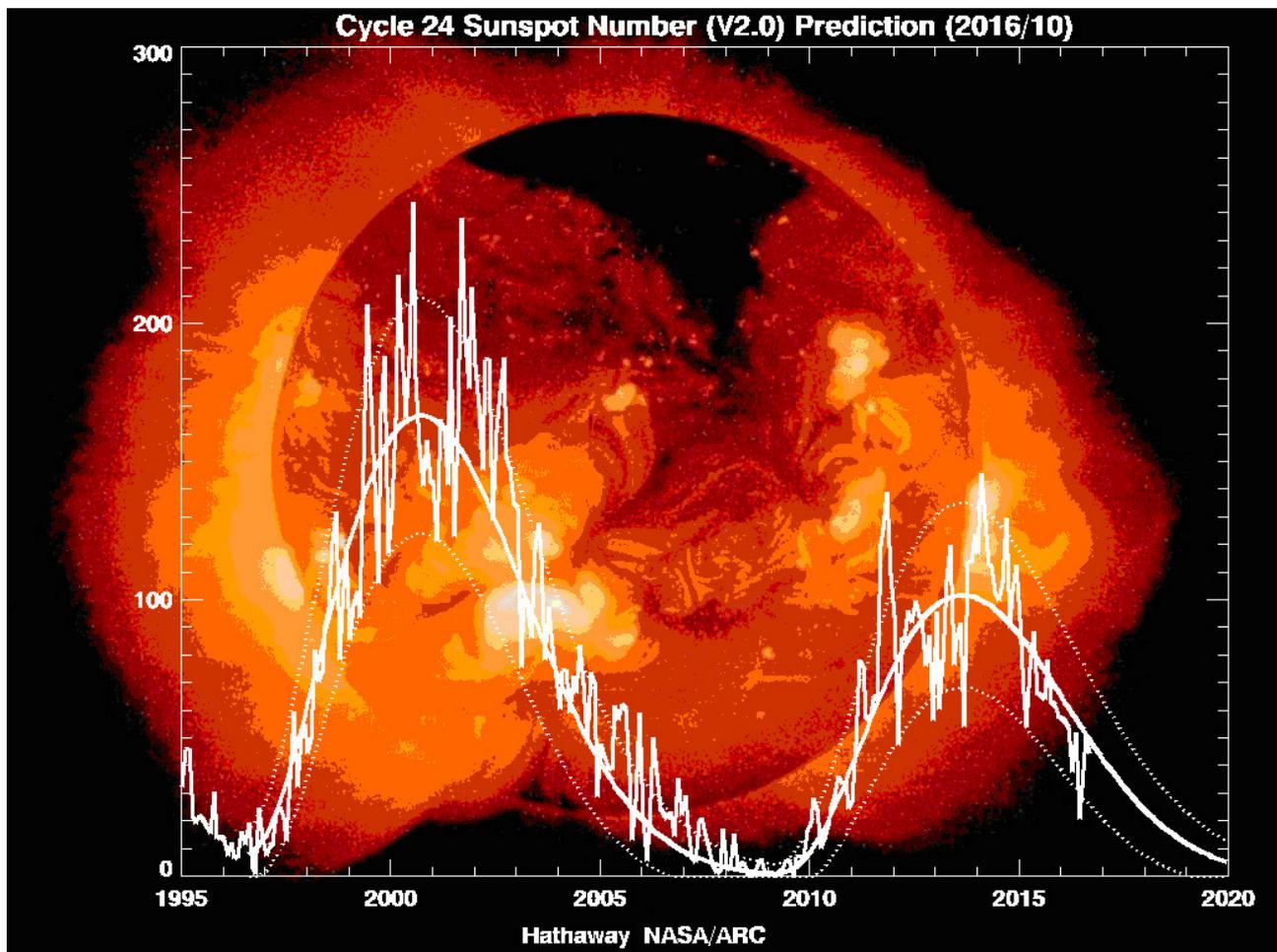
Nella macchia di seguito mostrata è visibile anche un cd "light bridge" un ponte di luce che attraversa l'ombra, con temperature del plasma superiori a questa. Esso può talvolta essere sintomo di un'incremento di attività in cromosfera. E' discussa la sua influenza a livello coronale.



L'immagine sottostante è stata ottenuta applicando un filtro IR-Pass da 720 nm (può sembrare un controsenso) dopo un prisma di Herschel, al fuoco di un rifrattore apo TMB LZO 115/800 portato a 4000 mm con una barlow 5X. Notare il rilievo della zona maculare rispetto al sole quieto.



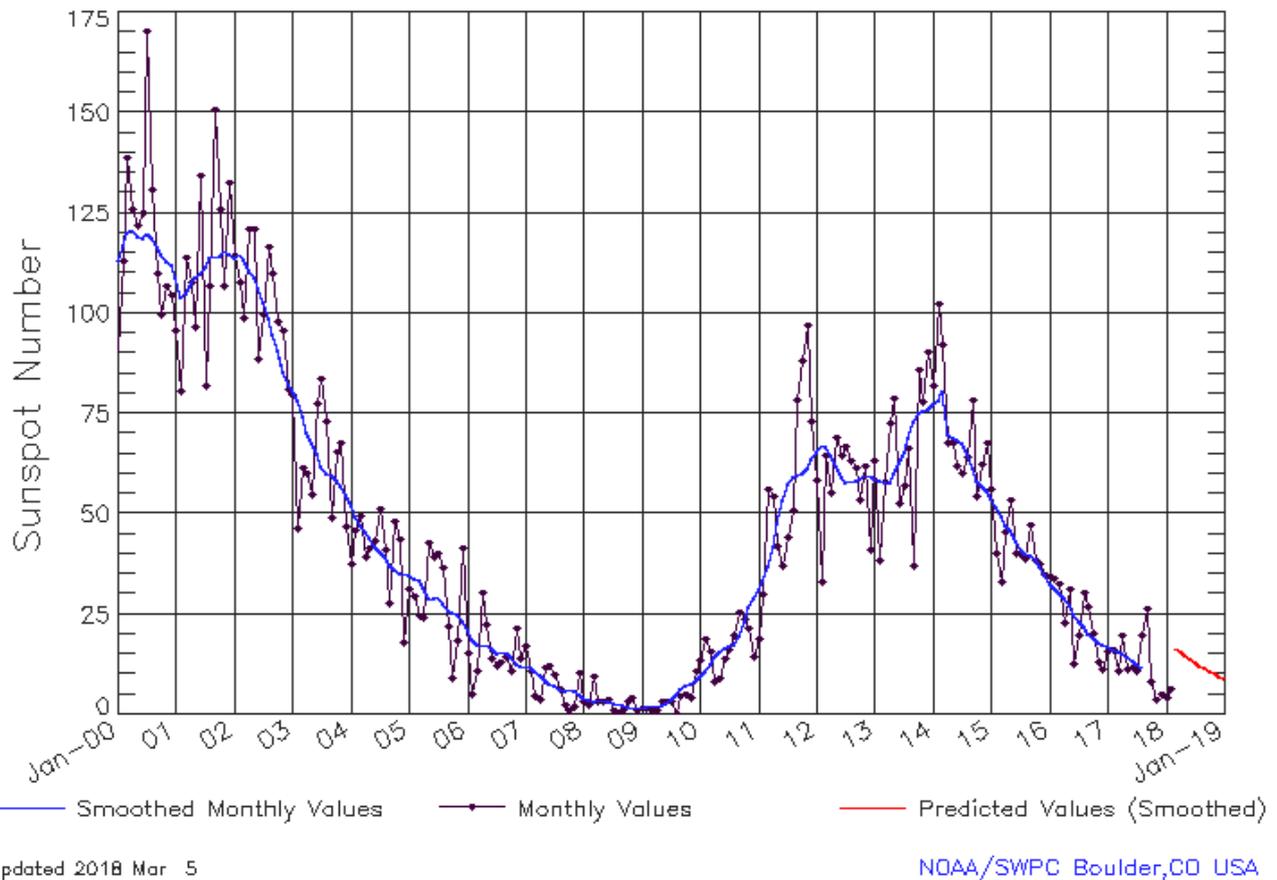
La macchie, col loro ciclo undecennale di massimo e minimo, costituiscono l'indice dell'attività solare. Lo scienziato svizzero Rudolf Wolf concepì nella metà dell'ottocento, un metodo sistematico di misurazione del numero delle macchie ancora oggi usato come indicatore dell'andamento del ciclo e dell'attività solare. Nell'immagine che segue (fonte NASA/ARC) la previsione del ciclo solare dal 1995 al 2020, con i dati reali sino all'ottobre 2016 e le proiezioni per l'arco temporale successivo. Come si osserva sembra che il numero di macchie (cd numero di Wolf) e quindi l'attività solare stia man mano decrescendo negli ultimi anni: tale ipotesi è tuttavia al momento oggetto di approfondita discussione, non essendo ancora chiaro se sussistono cicli di modulazione del ciclo solare.



Qui di seguito i dati reali del numero di Wolf per il ciclo 24 aggiornati al febbraio 2018 (fonte NOAA/SWPC).

ISES Solar Cycle Sunspot Number Progression

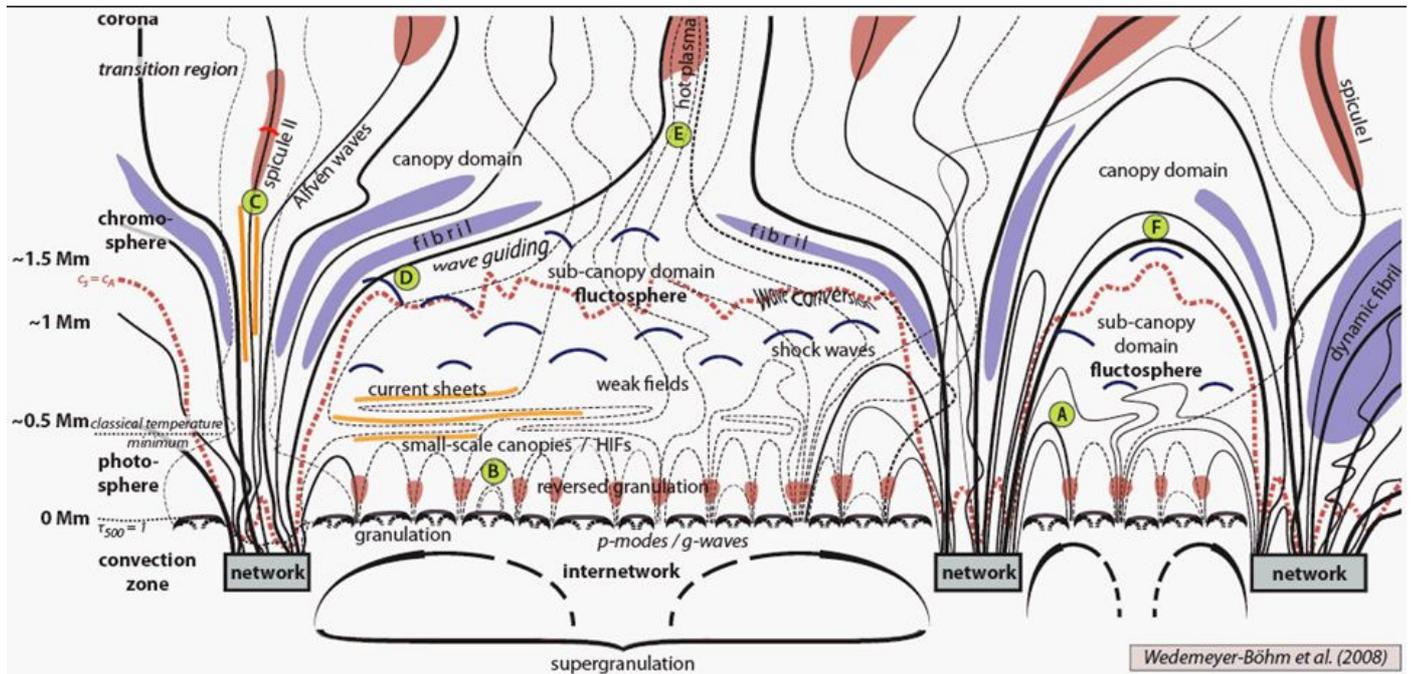
Observed data through Feb 2018



[La cromosfera](#) è una sottile fascia spessa circa 2300 Km, al di sopra della fotosfera essa è chiamata (dal greco χρώμα, χρώματος - chroma, chromat - , che significa colore) a causa dei suoi brillamenti colorati visibili subito prima e subito dopo le eclissi totali di Sole, chiamati "spettro flash". È un sottile involucro costituito da gas rarefatto che appare di colore rossastro; in realtà, lo strato è trasparente. La colorazione rossastra è dovuta agli atomi di idrogeno, in particolare di Idrogeno ionizzato alfa (H α) alla lunghezza d'onda di 6563 Å (rosso profondo) che alle più basse pressioni della cromosfera emettono radiazioni di tale colore. La sua temperatura, mediamente compresa tra 10000 e 20000 K, più precisamente è di circa 6000 K ai confini della fotosfera, comincia a decrescere immediatamente dopo sino a 3800 K, per poi crescere nuovamente sino ai 10000 K e poi 20000 K nei suoi strati più alti, raggiungendo anche i 30000 K ed oltre al confine superiore con la transizione con la corona.

Un'interessante analisi dell'atmosfera solare è stata recentemente effettuata grazie ai dati del satellite IRIS, lanciato nel 2013, la cui strumentazione è stata specificatamente realizzata per lo studio della cromosfera e della transizione alla corona.

Structure of the atmosphere



Corona

Transition region

Chromosphere

Photosphere



“Interface region”

(=> new IRIS spacecraft)

Wedemeyer-Bohm 2004

La figura sopra (fonte NASA- The cromosphere- Wedemeyer – Bohm 2004) mostra in dettaglio la struttura dell’atmosfera solare. Notare i loops magnetici della granulazione tra fotosfera e zona di convezione e la diversa altezza di spicules e fibrille.

Sono oggi particolarmente diffusi tra gli appassionati di osservazioni solari dei filtri a banda passante stretta (tra 0.3 e 1 Å) per l’osservazione in luce Idrogeno Alfa a 6563 Å della cromosfera e delle sue principali caratteristiche.

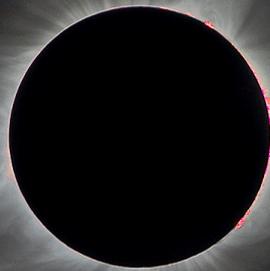
La cromosfera non è infatti normalmente visibile senza appositi filtri o telescopi solari; essa è tuttavia visibile in occasione delle eclissi solari totali, insieme alle protuberanze, come si osserva in questa bella immagine di Danilo Pivato, nella quale è visibile sia la cromosfera (sottile striscia rossa che circonda il disco solare) , sia le protuberanze, sia (in parte) la corona.

Total Solar Eclipse of 2017 August 21 - 11h 41m 35s - Hiland - Wyoming U.S.A.

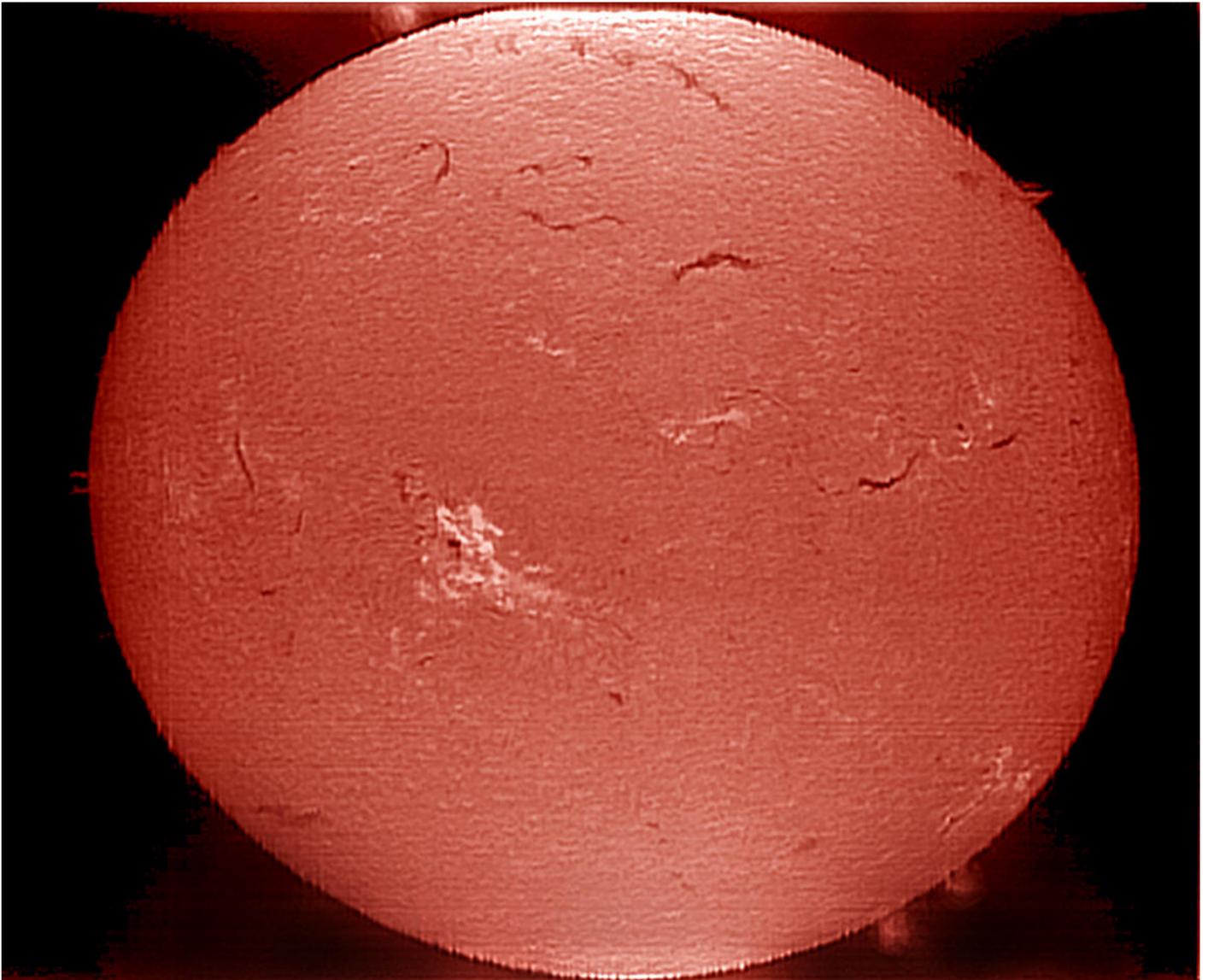
Teles.: Nikon 300mm f/4 + Teleconverter Nikon TC-14E II - Foc. eq. = 700mm

Photo: Danilo Pinato

WebSite: www.danilopinato.com



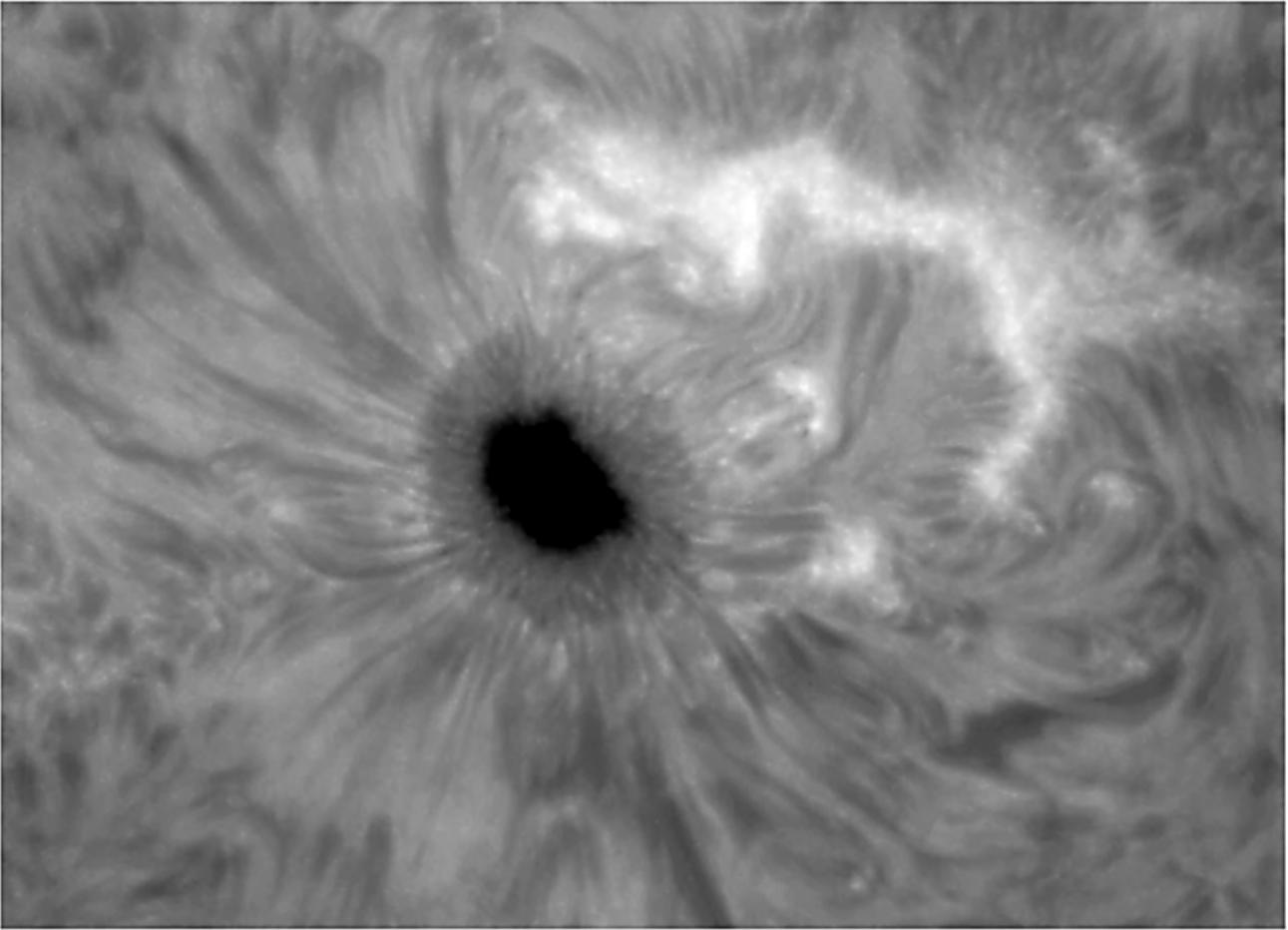
Nelle immagini riprese con filtri cromosferici centrati sulla riga H alpha dell'Idrogeno o con telescopi o spettroeliografi solari , la cromosfera mostra tutte le sue caratteristiche, come nella foto che segue, realizzata da chi scrive con uno spettroeliografo autocostruito.



Si notano le caratteristiche più importanti della Cromosfera:

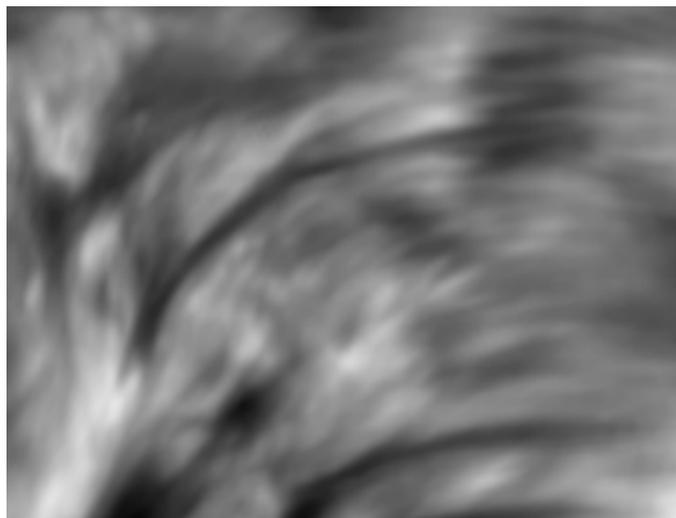
Il Cd "Cromospheric Network" che evidenzia la supergranulazione, meglio visibile in luce Idrogeno Alfa a Calcio ionizzato, con supergranuli di diametro di circa 30000 Km., quindi molto più grandi dei granuli fotosferici.

Le "Plages", strutture brillanti intorno alle macchie fotosferiche, dovute alla concentrazione di attività magnetica in tali zone "Attive", come nell'immagine seguente. In luce CaII K le zone brillanti, corrispondenti in genere alle regioni attive prendono il nome di facole.



Macchie solari cromosferiche ,plages e fibrille in un'immagine H alpha dell'autore

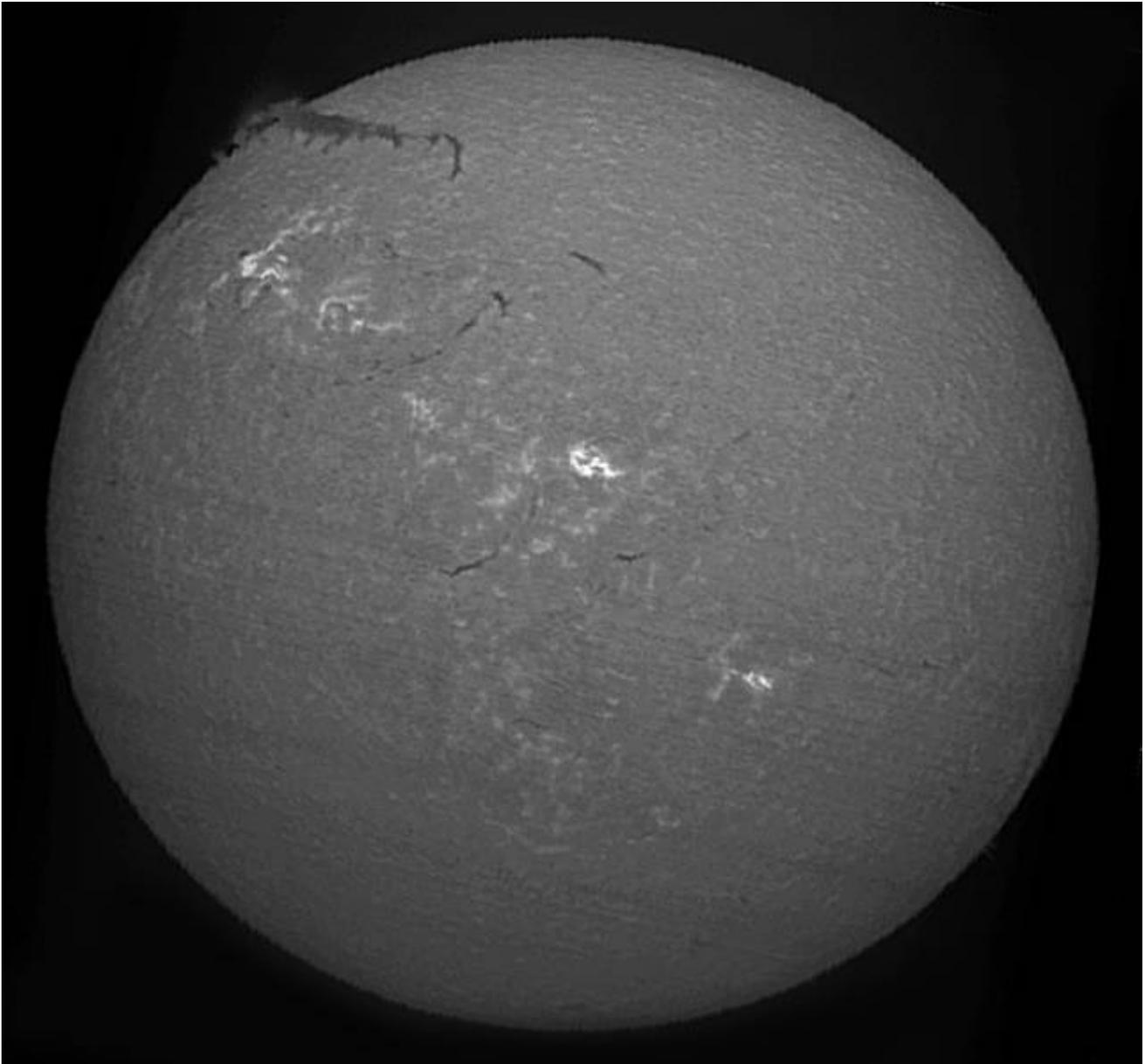
Intorno ad esse spesso si osservano strutture chiamate "fibrille" (fibrils). , come nell'immagine che segue (fonte DOT, H alpha) nella quale appaiono ancora più evidenti che in quella precedente.



I mottles 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, come si osserva nell'immagine seguente (foto spettroeliografica dell'autore con VHIRSS) nella quale si nota un' estesa protuberanza sul bordo che diviene filamento quando osservata sul disco.



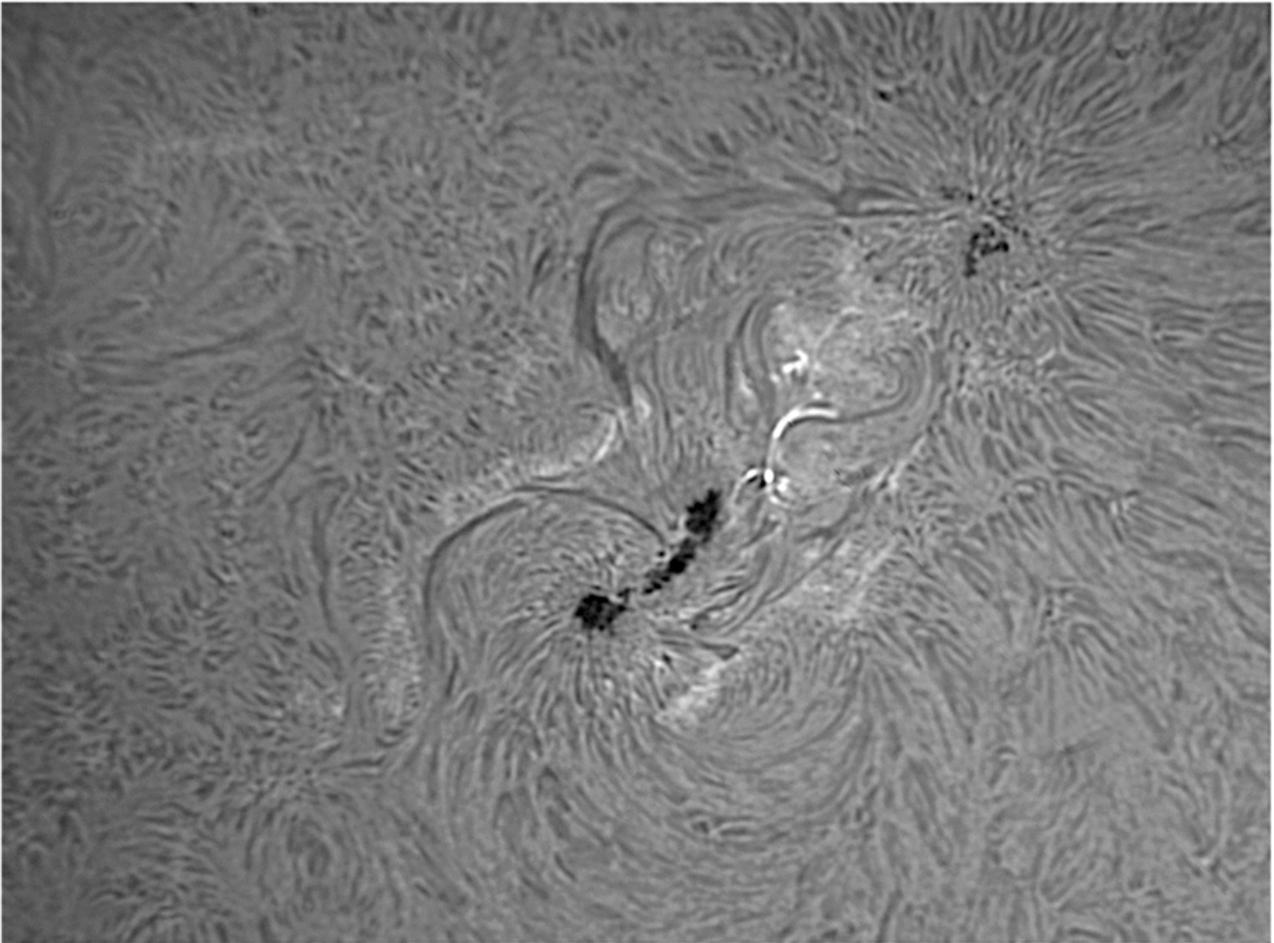
Le "Spicules", l'erba della cromosfera, piccole eiezioni di plasma sulla base della cromosfera; queste sono visibili nell'immagine che segue, in alta risoluzione, che mostra il bordo della cromosfera con le spicule ed una grossa protuberanza (foto dell'autore con Coronado Pst modificato).



Altri fenomeni che avvengono in cromosfera

Flares e Ellerman bomb

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. Essi possono essere associati, anche se non sempre, a fenomeni di eiezione di massa coronale (CME).



Un piccolo, ma esteso flare nell'AR 1302 del 2011: foto dell'autore

Ellerman bomb

Le "Ellerman Bomb" sono piccole strutture brillanti, simili a flares ma molto più piccoli, e somiglianti a baffi luminosi, di breve durata (meno di 5 minuti) che appaiono nelle regioni attive, sui bordi delle macchie.

la transizione alla corona si trova al di sopra della cromosfera, in essa la temperatura sale rapidamente dai circa 100 000 K degli strati più esterni della cromosfera, fino ad oltre il milione di kelvin della corona; tale incremento causa una transizione di fase dell'elio, che qui diventa completamente ionizzato per le elevate temperature. La transizione non può definirsi propriamente zona in quanto non possiede un limite di altitudine definito: forma infatti una sorta di alone attorno alle formazioni della cromosfera come le spicole ed i filamenti ed è in moto costante e caotico.

La transizione non è visibile facilmente dalla Terra, ma è ben rilevabile dallo spazio attraverso strumenti sensibili alle lunghezze d'onda dell'ultravioletto distante: questo è anche uno dei motivi per i quali le strumentazioni satellitari, come l'EIT di SOHO, effettuano riprese nella zona dell'estremo UV.

La corona è la parte esterna dell'atmosfera solare, non ha limiti definiti e si estende nello spazio per decine di milioni di chilometri in modo molto tenue. È costituita da plasma a elevatissima temperatura (oltre un milione di kelvin). Essendo il plasma molto rarefatto, la temperatura non è da intendersi nel significato convenzionale; si parla in questo caso di temperatura cinetica.

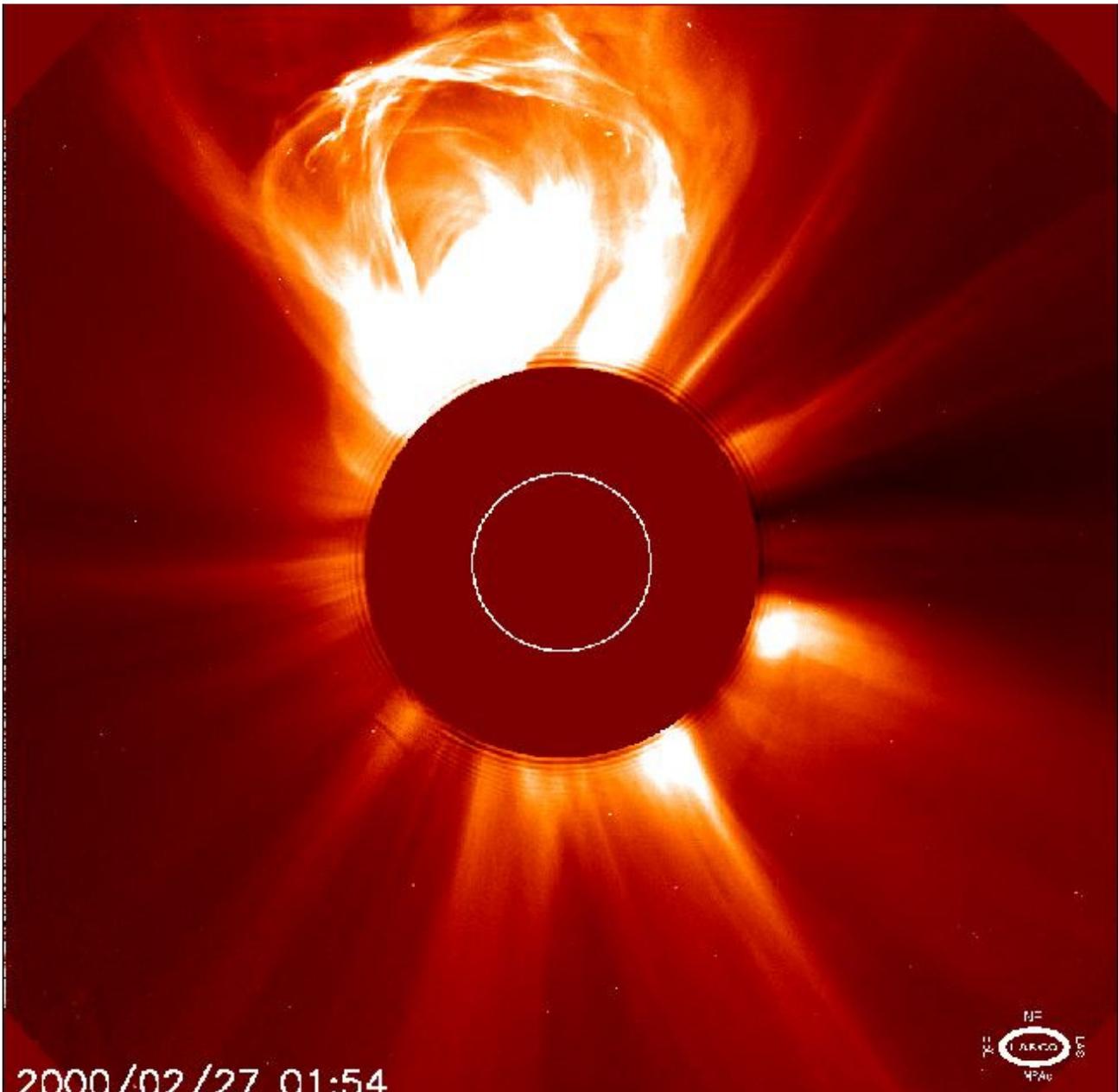
Gli strati interni della corona hanno una densità di $10^{14} - 10^{16}$ particelle al metro cubo (l'atmosfera terrestre al livello del mare ha una densità di 2×10^{25} particelle al metro cubo) ed è sede di numerosi fenomeni di tipo magnetico, come le espulsioni di massa (CME) e gli anelli coronali.

Gli astrofisici da tempo si chiedono perché la corona abbia una temperatura così elevata; essi ritengono che parte del calore sia originato oltre che dalla riconnessione delle linee del campo magnetico solare, anche dalle onde acustiche e, ancor di più, da quelle magneto acustiche.

Anche la corona non è normalmente visibile, ma lo è in occasione delle eclissi totali di sole, ovvero con uno speciale strumento detto coronografo, che simula un'eclisse occultando il disco solare.



Sopra una bellissima immagine della corona solare come appare nel periodo del ciclo vicino al minimo realizzata dall'astrofilo Danilo Pivato in occasione dell'eclisse totale di sole del 21 agosto 2017 dal Wyoming (U.S.A).
E' da notare che nel periodo di minima la corona si estende lungo tutto il perimetro solare, mentre in prossimità del massimo del ciclo essa si estende solo nelle latitudini equatoriali.



Un gigantesco CME (fonte SOHO-LASCO)

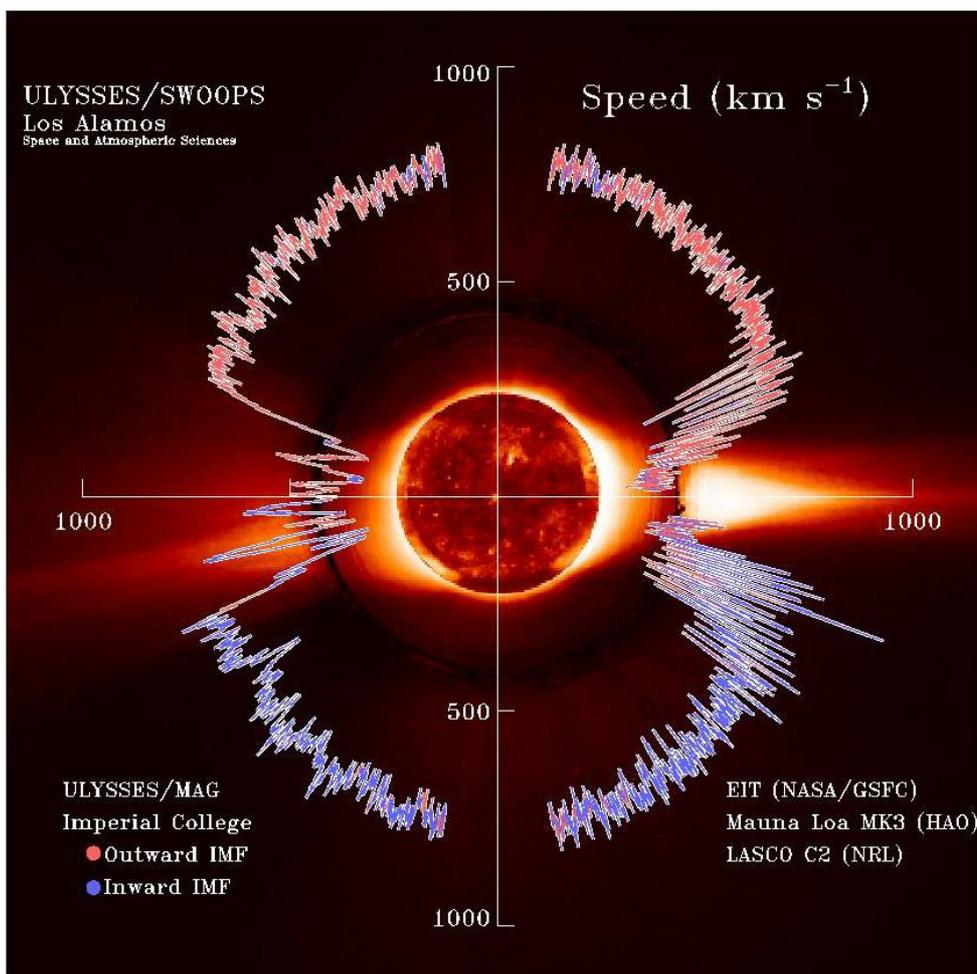
Sintetizzando, l'attività cromosferica e coronale presenta le seguenti caratteristiche esplosive principali:

- Proturberanze
- Brillamenti o flares
- Espulsioni di massa coronale (CME)

Tutte sono causate dall'interazione tra il gas ionizzato (plasma) ed il campo magnetico solare.

Il Vento solare

Il vento solare è un flusso di particelle cariche emesso dall'alta atmosfera del Sole: esso è generato dall'espansione continua nello spazio interplanetario della corona solare; detto flusso è normalmente composto da elettroni e protoni ad alta energia. In pratica si tratta di un plasma estremamente tenue, di velocità che va da 200 a 450 Km sec (vento solare lento) e da 450 a 900 Km sec (vento solare veloce). La velocità è maggiore nelle zone dei cd "buchi coronali" nei quali la corona appare scura. Esso impiega da 2 a 9 giorni per interagire con la magnetosfera terrestre, perturbandola a volte seriamente ed originando le aurore polari. Il vento solare non è uniforme, sia come direzione che velocità, come si può osservare dalla seguente immagine (Fonte NASA).



Gli Strumenti professionali dell'Osservazione solare

Gli strumenti per l'osservazione solare si suddividono in strumenti terrestri e satellitari.

Strumenti terrestri: i telescopi

Tra i principali telescopi operanti presso gli Osservatori solari si ricordano:

- Mc Math Pierce solar Observatory KPO (161 cm) (Arizona-USA)
- Big Bear Solar Observatory GST (160 cm) (USA)
- Swedish solar telescope (100 cm) La Palma, Canarie - Spagna
- Themis Solare telescope Tenerife- Spagna

Strumenti terrestri: Le torri solari

La torre solare, ora purtroppo in disuso nella maggior parte degli Osservatori europei in quanto superata dalla strumentazione su satellite, consiste in una struttura di una certa altezza (20-50 mt) in cima alla quale c'è un celostato, ovvero uno specchio piano su una montatura motorizzata che insegue il cammino apparente del sole sulla volta celeste e che ne reinvia l'immagine ad un secondo specchio, anch'esso piano, che a sua volta riflette l'immagine solare verso un terzo specchio, parabolico o sferico, di focale molto lunga. Tale immagine del sole viene poi foceggiata tramite un altro sistema di specchi sulla strumentazione alla base della torre, in genere uno spettroeliografo, ossia uno spettroscopio ad alta risoluzione da cui si ottengono immagini del Sole nelle varie lunghezze d'onda.

Tra le principali torri solari operative ricordiamo:

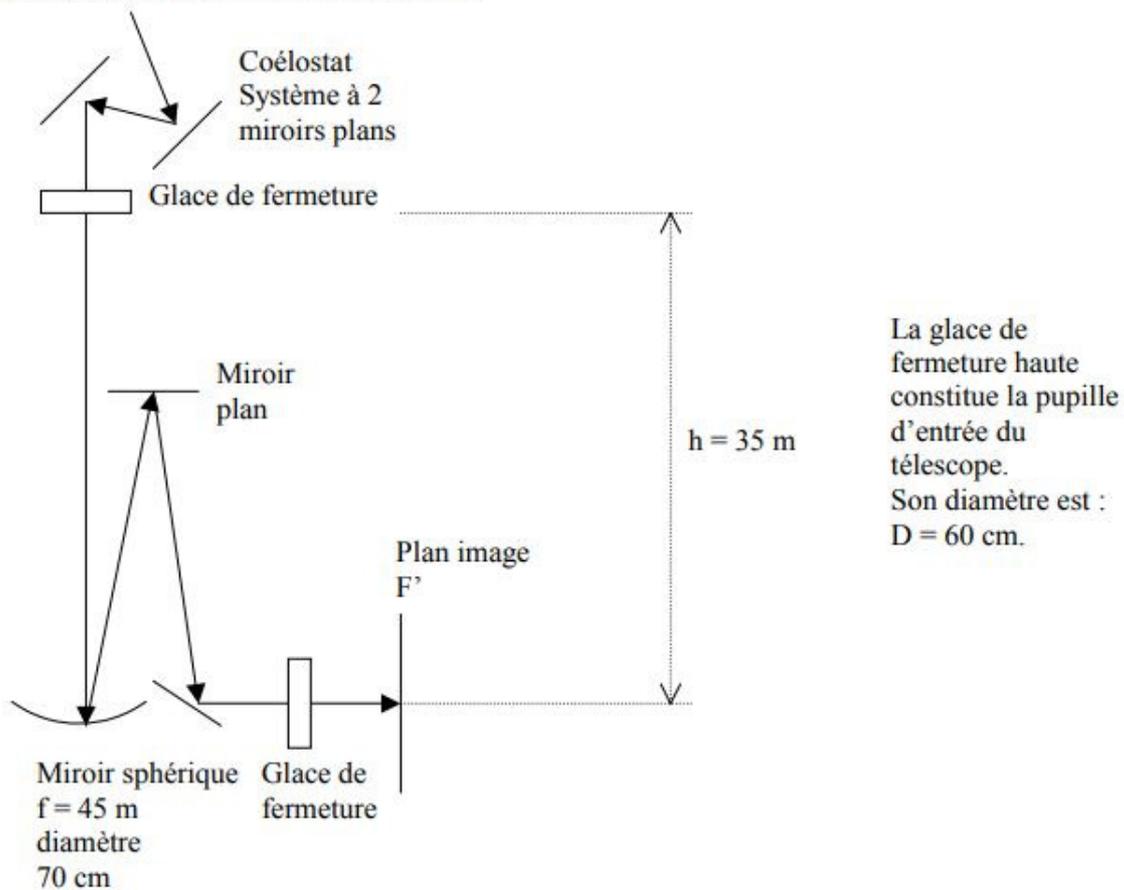
- La torre da 150 piedi (45 metri) di Monte Wilson (USA)
 - La torre solare dell'Osservatorio di Meudon, a Parigi
- La bellissima Torre solare dell'Osservatorio Di Roma (34 mt) e quella di Arcetri sono ora destinate ad esigenze didattiche.



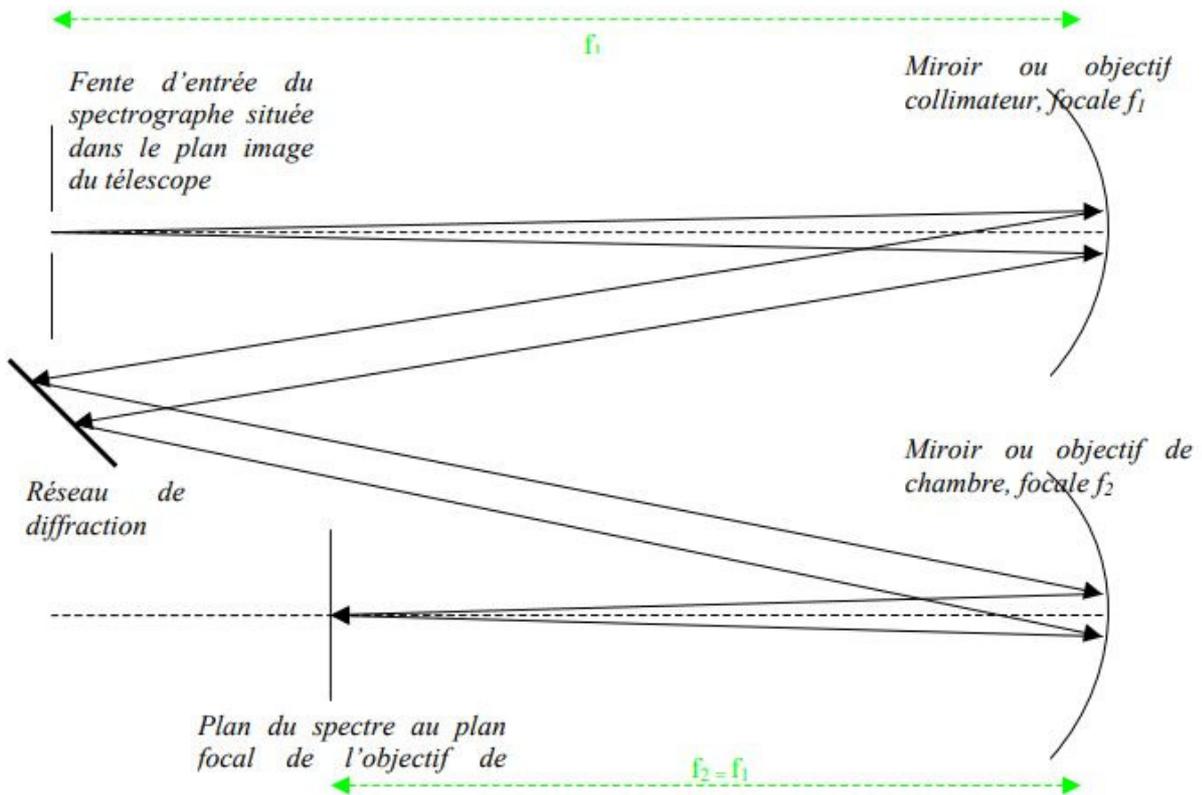
La Torre solare dell'Osservatorio di Roma, sulla collina di Monte Mario (fonte : INAF, Osservatorio di Roma)

Nelle immagini che seguono il layout del telescopio e dello spettrografo della torre solare di Meudon (Parigi) (fonte J.M Malherbe, 30.1.2013, PDF "Fiche spectrographe tour solaire simple passage"- BASS 2000) , peraltro in linea di massima simile a quasi tutte le strumentazioni del genere ancora esistenti.

1 - Tour solaire de Meudon : le télescope

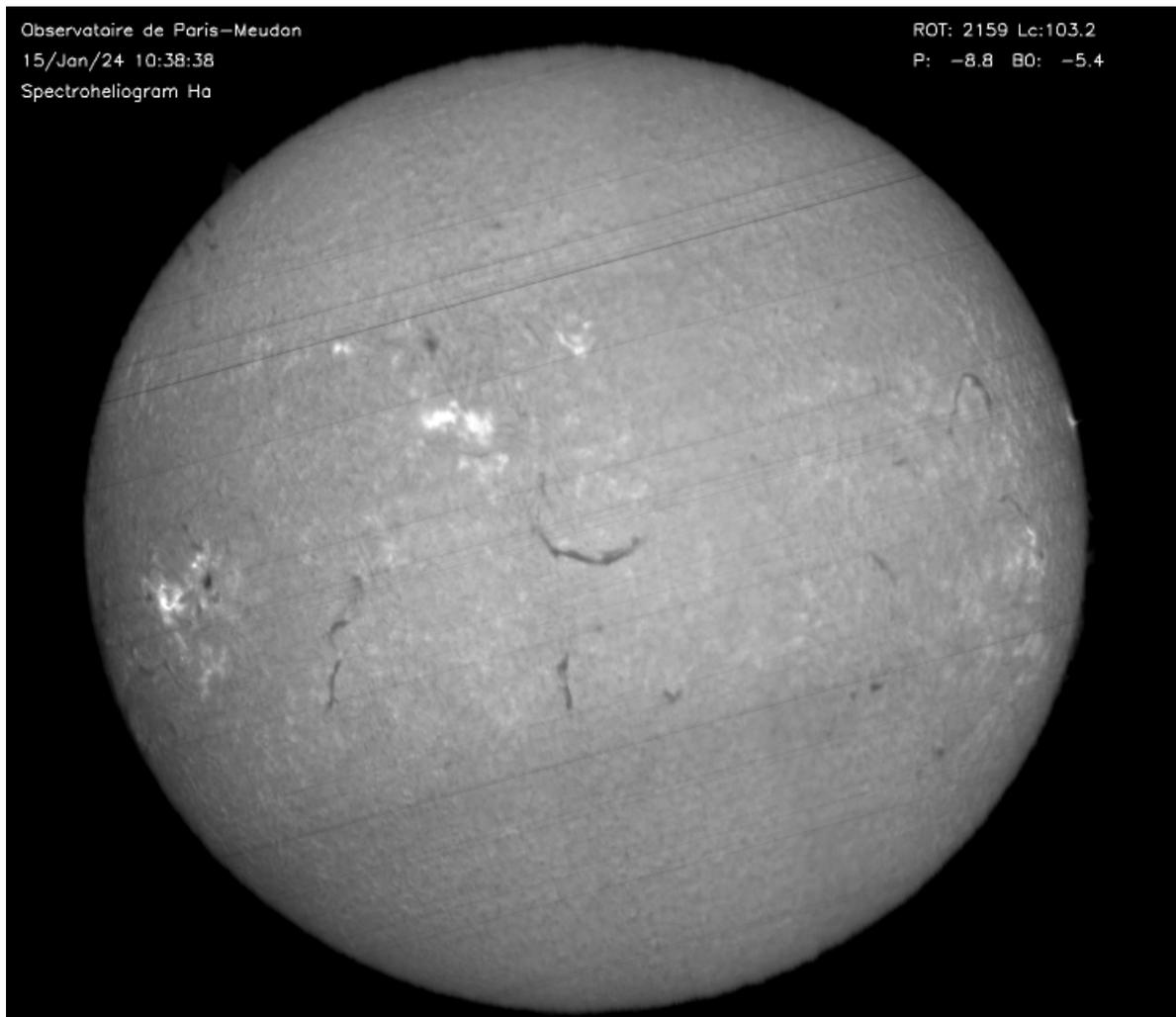


Schema del telescopio della torre solare di Meudon. Notare la focale di ben 45 metri dello specchio principale da 70 cm della torre solare.



Schema dello spettroscopio della torre solare

Un'immagine solare in luce H alpha ottenuta con lo spettroeliografo della torre solare dell'osservatorio di Paris- Meudon (fonte: Bass2000)



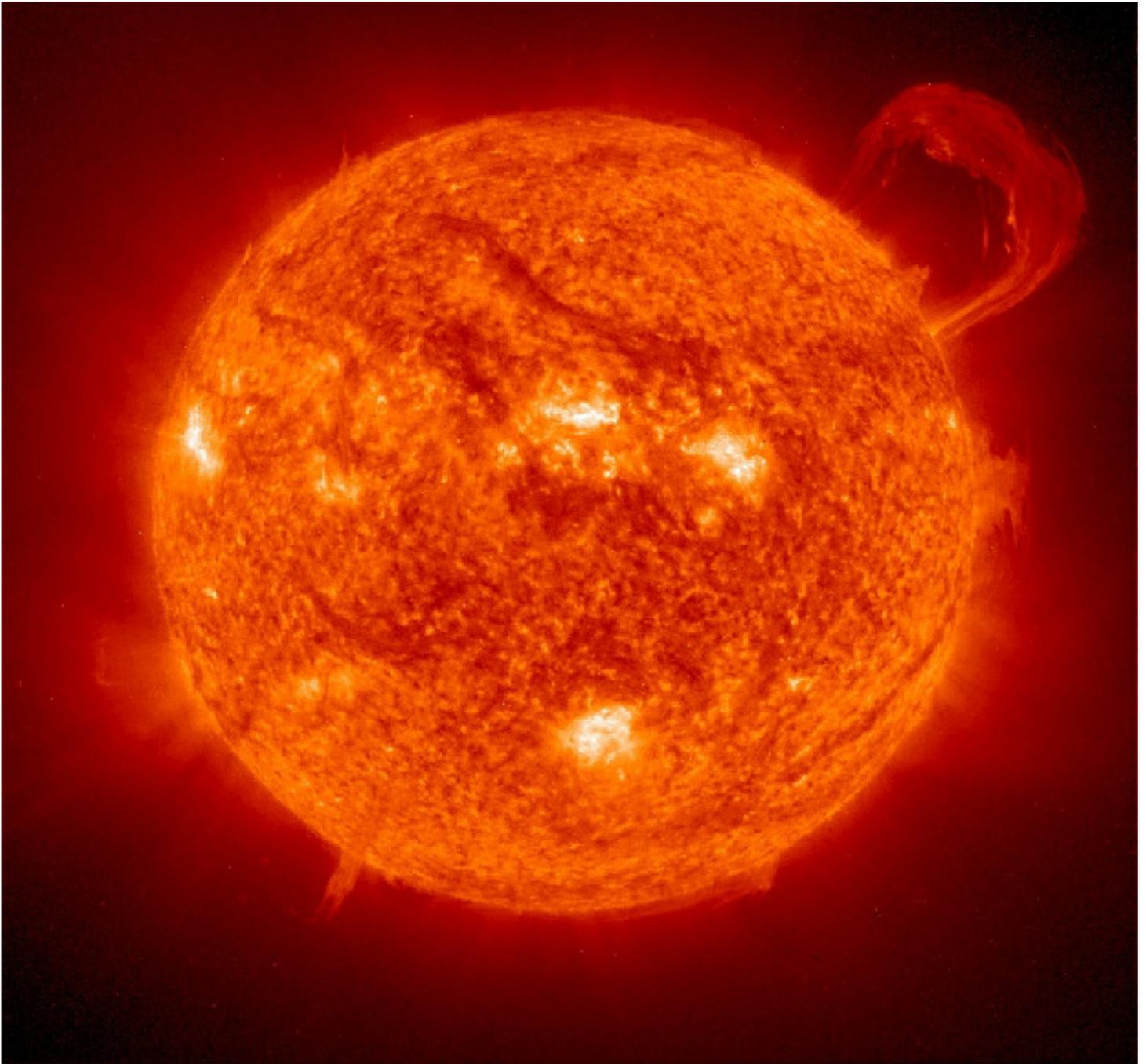
I principali sistemi di Osservazione satellitari: SOHO, SDO, STEREO, IRIS

1- SOHO (Solar and Heliospheric Observatory)

SOHO è in progetto di collaborazione tra ESA e NASA per lo studio della struttura del Sole, dal suo nucleo alla corona ed al vento solare. Il satellite fu lanciato il 2 dicembre 1995, con un pacchetto di dodici strumenti di costruzione Europea e Statunitense. La NASA fu responsabile del lancio e del controllo della missione. Soho ha fornito dati senza precedenti e di primaria importanza sulla struttura e la dinamica solare, quali:

- Immagini della struttura di Convezione al di sotto della fotosfera
- dati sulla rotazione interna e sul flusso di gas
- dati fondamentali sul vento solare
- la scoperta di onde coronali

L'EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope) di SOHO produce immagini alle lunghezze d'onda di 304,284,295 e 171 Å , alle quali corrispondono, nell'ordine , strati sempre più alti dell'atmosfera solare e temperature che vanno da 60.000 a 2 milioni di K.



Un'eccezionale protuberanza ripresa dall'EIT di SOHO a 304 Å (Fonte : SOHO - NASA)

2-STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory)

STEREO è la seconda recente missione del programma solare della NASA (Ottobre 2006). Impiega due osservatori spaziali quasi identici - uno davanti a Terra nella sua orbita (Stereo A), l'altro in una diversa posizione (Stereo B) per fornire la prima volta misure stereoscopiche per studiare il Sole e la natura delle sue espulsioni di massa coronale, o CME. Gli obiettivi scientifici di STEREO sono:

Comprendere le cause dei meccanismi di espulsione di massa coronale (CME) .
Caratterizzare la propagazione del CME attraverso l'eliosfera.
Scoprire i meccanismi e siti di accelerazione delle particelle energetiche nella bassa corona e il mezzo interplanetario. Migliorare le conoscenze della struttura del vento solare.

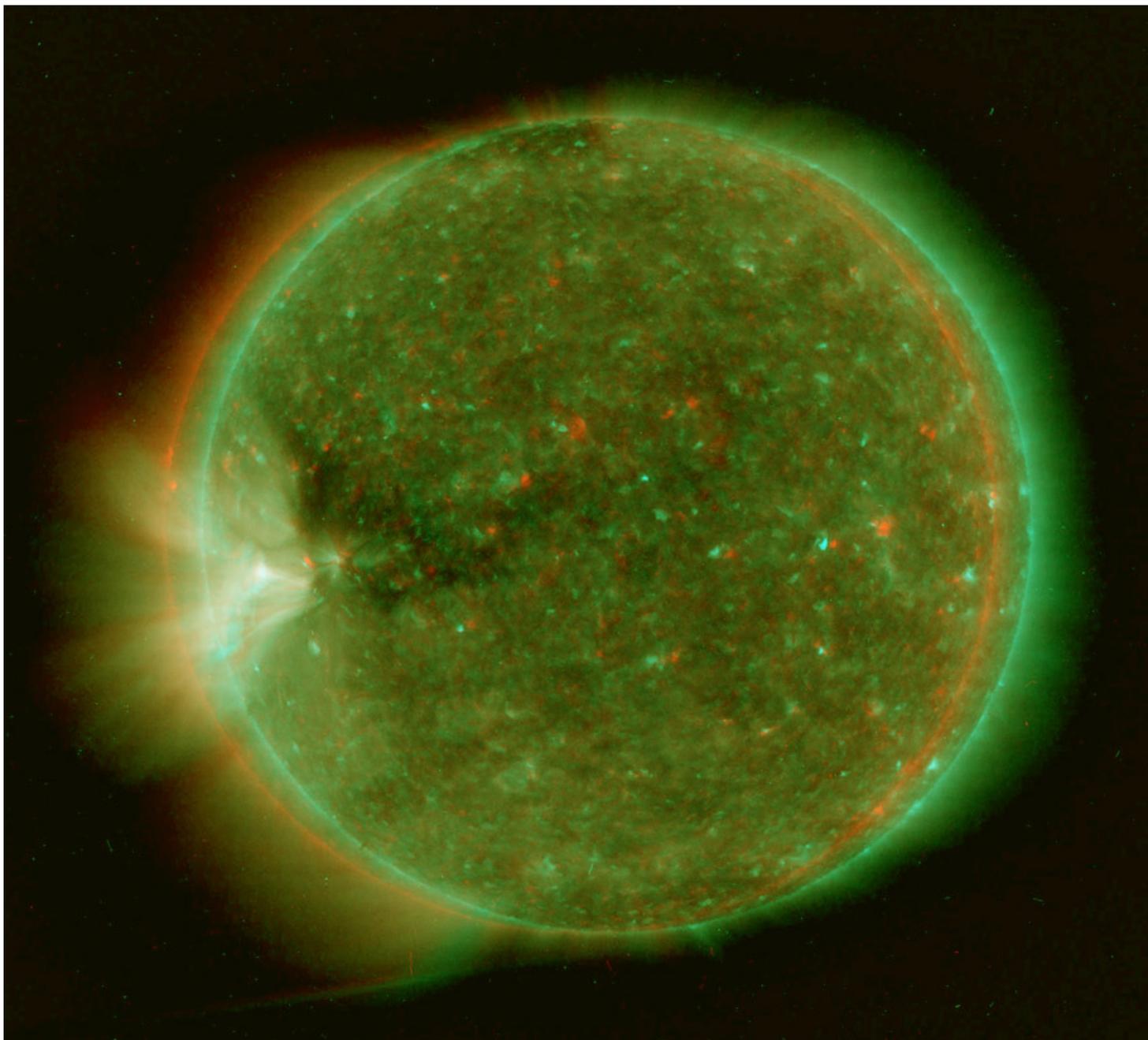
Dal 1 ottobre 2014 le comunicazioni con STEREO B si sono interrotte e non sono state riprese, prevedibilmente per un'anomalia tecnica. Successivamente l'anomalia fu corretta e la survey di Stereo riprese la sua funzionalità sino al 23 settembre 2016, data nella quale le comunicazioni cessarono nuovamente e tali sono rimaste.

La strumentazione consiste di un Imager ultravioletto(LMSAL),due coronografi, ed un imager eliosferico su entrambi i satelliti.

Tra le ricerche più recenti:

-Le immagini ed il sistema di processing di Stereo sono state utilizzate per individuare le strutture più fini della corona esterna.

-E' stato effettuato l'esame del vento solare e delle particelle accelerate, contribuendo all'individuazione delle sorgenti.



Un'immagine in 3D di Stereo nell'estremo UV a 284 Å

3- SDO (Solar Dynamics Observatory)

Il Solar Dynamics Observatory è stata la prima missione della NASA ad essere lanciata sulla base di un programma ideato per comprendere le cause della variabilità solare e il suo impatto sulla vita terrestre.

SDO è stato progettato per meglio comprendere l'influenza del Sole sulla Terra e nello spazio vicino alla Terra studiando l'atmosfera solare su piccole scale di spazio e tempo e contemporaneamente in molte lunghezze d'onda. L'obiettivo di SDO è di comprendere, con una capacità predittiva, le variazioni solari che influenzano i sistemi tecnologici della Terra e la vita dell'umanità determinando:

- come si genera il campo magnetico del Sole e come esso è strutturato
- come l'energia magnetica immagazzinata viene convertita e rilasciata nell'eliosfera sotto forma di vento solare, particelle energetiche, e variazioni di irraggiamento.

- SDO è stato lanciato in data 11 febbraio 2010 su un Atlas V dalla SLC 41 da Cape Canaveral.

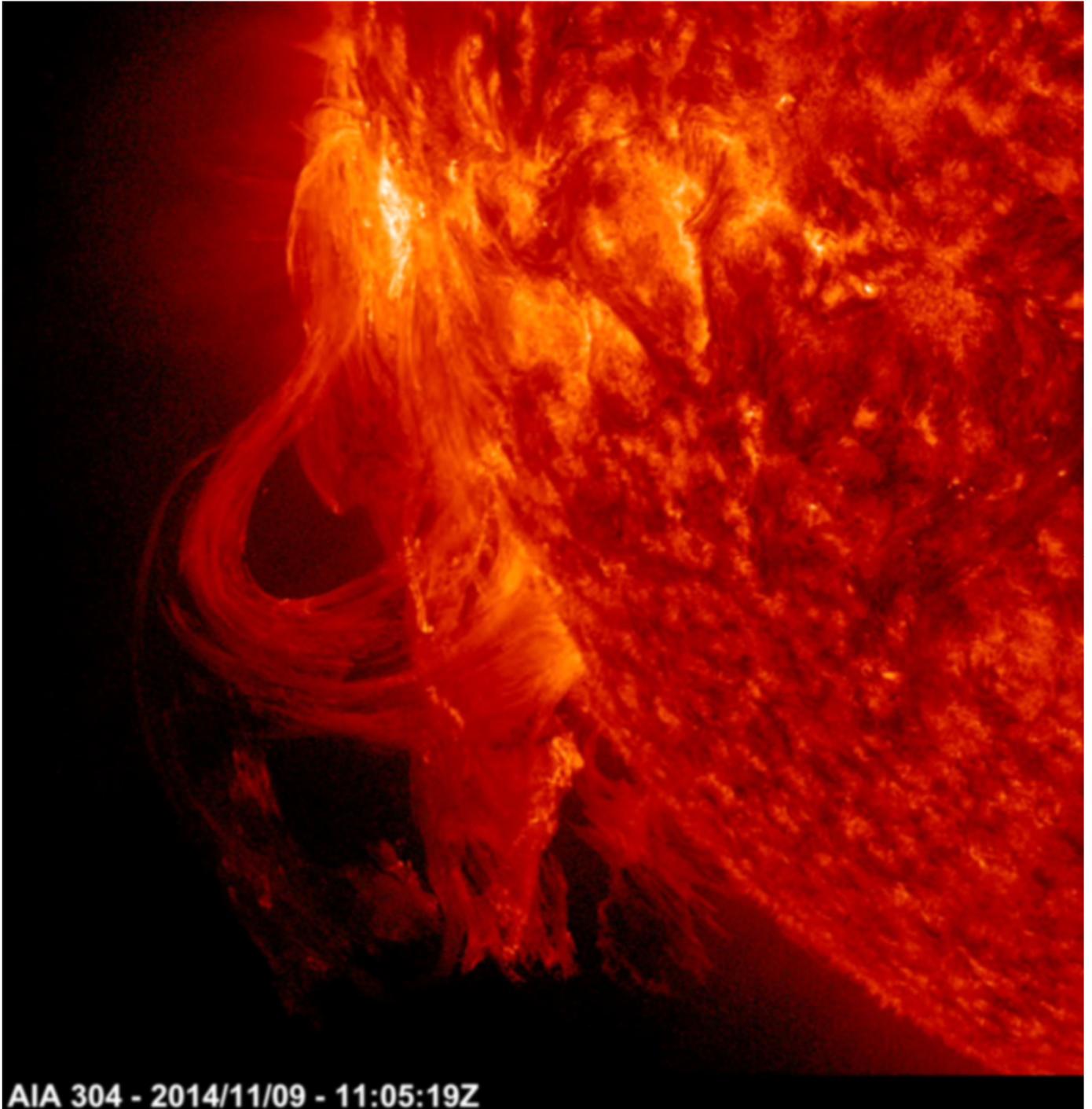
SDO usa tre strumenti per effettuare tre esperimenti scientifici principali:

- Heliosismic and magnetic Imager (HMI)
- Atmospheric Imaging Assembly (AIA)
- EUV Variability Experiment (EVE)

Ognuno di questi strumenti esegue misurazioni diverse volte a spiegare come e perché il Sole varia. Essi possono inoltre osservare il Sole contemporaneamente, eseguendo l'intera gamma di misure necessarie per comprendere le variazioni solari ed il loro impatto sulla terra.

In particolare, l'HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) estende le capacità del SOHO-MDI alla copertura continua del disco solare ad una più alta risoluzione, nonché alla magnetografia vettoriale del sole, ovvero alla misurazione dei campi magnetici solari. L'AIA (Atmospheric Imaging Assembly) ottiene immagini UV a risoluzioni 4 volte superiori a quelle di SOHO-EIT e 2 volte quelle di STEREO-Secchi. Esso effettua scansioni ed immagini del sole in 10 lunghezze d'onda ogni 10 secondi. EVE (Extreme ultraviolet Variability Experiment) misura l'irradiazione solare nell'estremo ultravioletto (EUV) con una risoluzione mai sperimentata prima. Attualmente SDO è la missione di riferimento per tutti i ricercatori solari su scala planetaria Le osservazioni dello strumento AIA dell'SDO a 304 Å e molte altre possono essere consultate al sito web di Helioviewer:

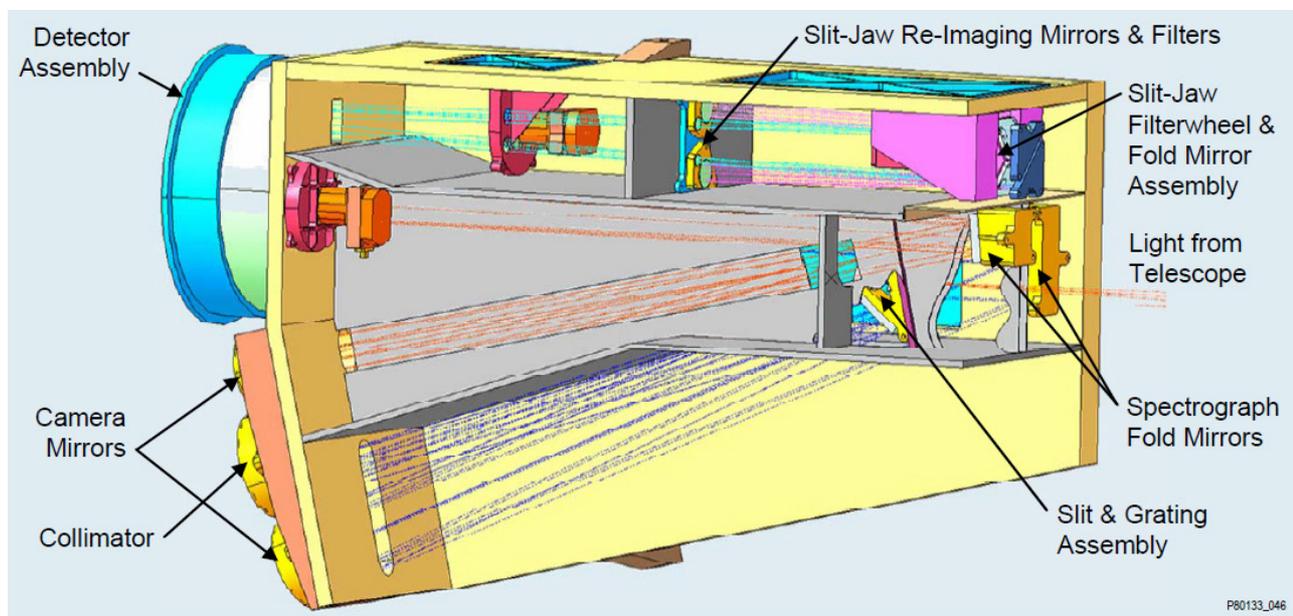
<https://www.helioviewer.org/>



Un' eccezionale eruzione solare del novembre 2014 ripresa da SDO-AIA in luce UV a 304 Å

4- IRIS

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:

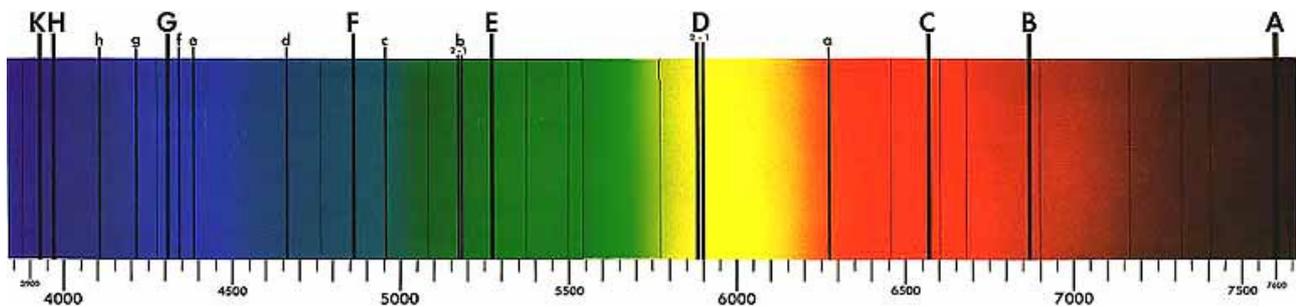


Iris costituisce lo stato dell'arte e l'espressione più moderna ed avanzata della spettroeliografia, della quale è ora il caso di entrare nel vivo.

Lo spettro solare

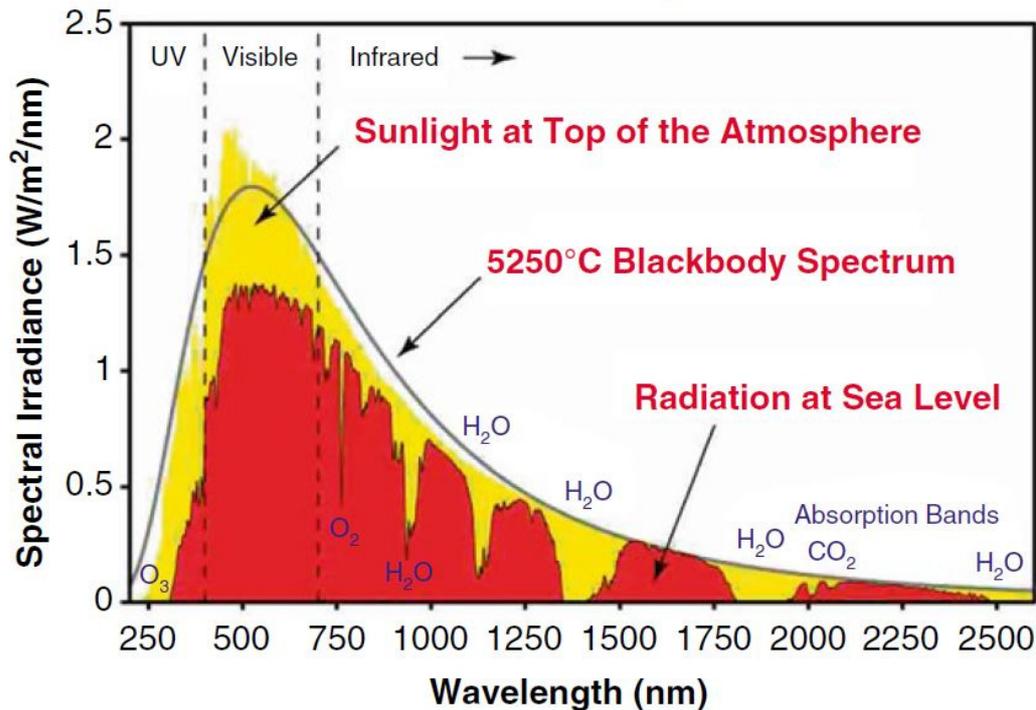
Dello spettro solare ho già parlato nel mio testo di spettroscopia; tuttavia mi sembra il caso di richiamare, in questa sede, alcuni aspetti dello studio dello spettro solare, fondamentali dal punto di vista della spettroelioscopia e spettroeliografia.

Lo spettro del sole fu osservato e studiato sin dai tempi di Newton, ma, dopo la prima esperienza di William Wollaston che osservò delle righe scure, fu Joseph Von Fraunhofer, fisico ed astronomo tedesco, a osservare e classificare per la prima volta le maggiori righe di assorbimento, che da lui presero il nome. Egli catalogò 574 linee scure dello spettro solare, assegnando una lettera alle più evidenti (famoso le H e K del Calcio e le C e F dell'Idrogeno).



Von Fraunhofer non fu in grado di dare una spiegazione di tale fenomeno. Solo nel 1859 Gustav Kirchoff lo interpretò come un assorbimento selettivo della luce da parte degli elementi chimici presenti nell'atmosfera solare. Fraunhofer 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 fotocamere 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.

Solar Radiation Spectrum



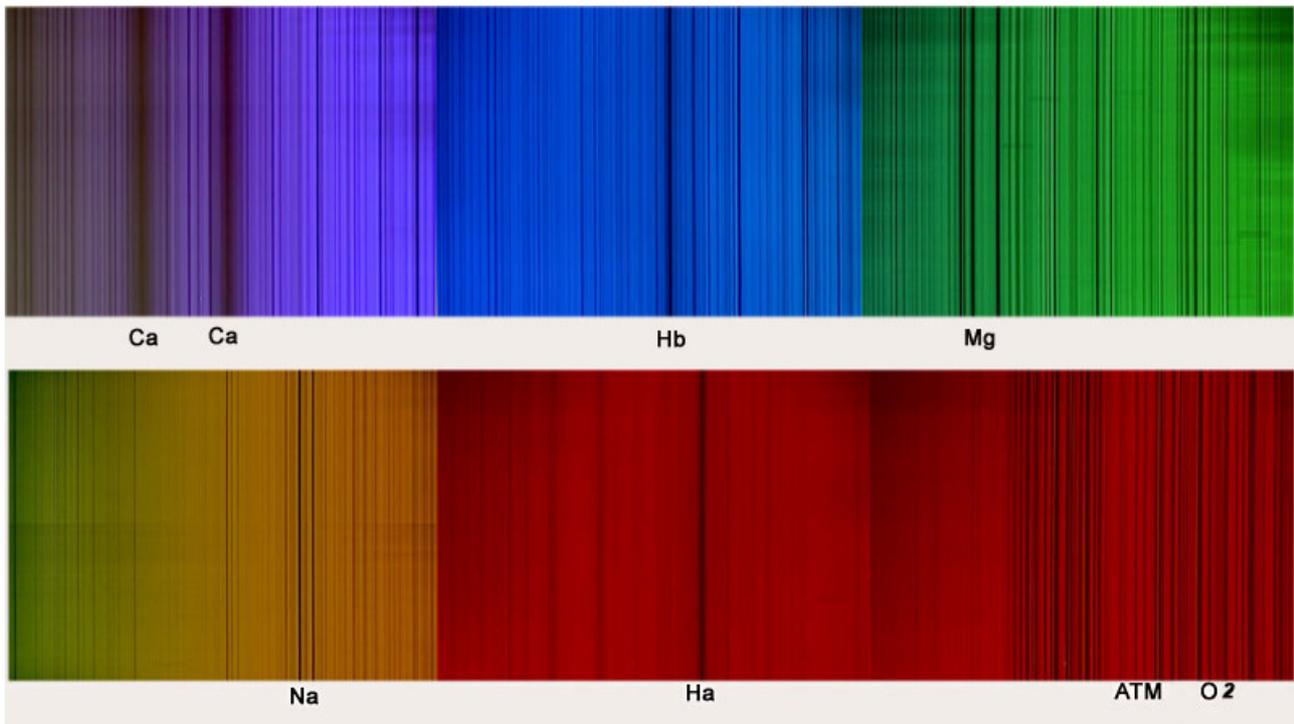
Distribuzione dell'energia del Sole in funzione della lunghezza d'onda, con lo spettro di corpo nero e la radiazione al livello del mare (WIKI).

Dal grafico soprastante si possono anche desumere dati sulla distribuzione relativa di tale energia col 7% nell'UV (<3800 Å), il 53% circa nel visibile (3800-7000 Å) ed il 40% nell'Infrarosso (> 7000 Å), 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 Å, cd "Balmer jump" o discontinuità di Balmer.

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): la maggior parte delle righe deboli appartengono infatti al vapore acqueo (H₂O) e cambiano

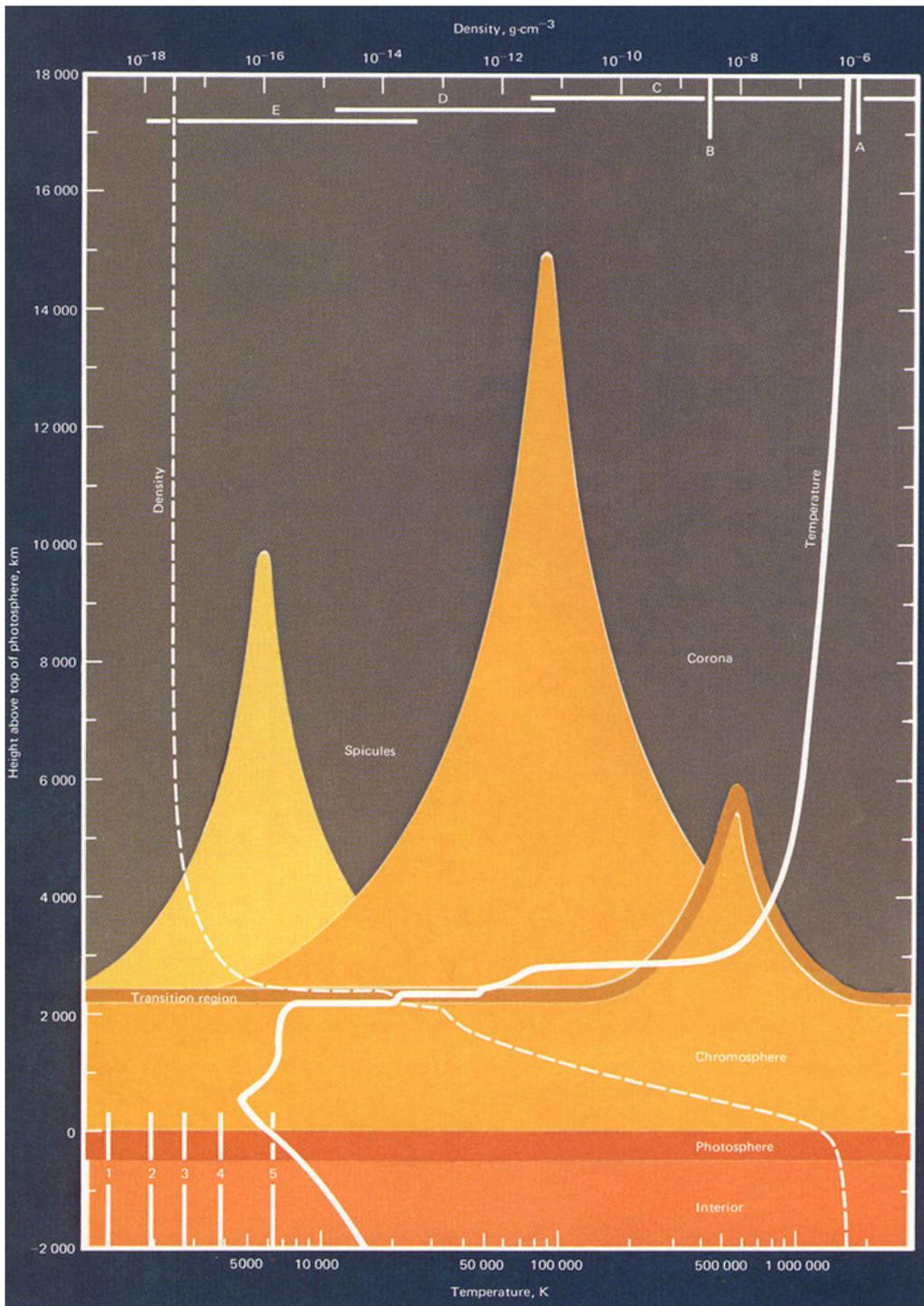
di intensità a seconda del grado di umidità, mentre altre appartengono all'Ossigeno diatomico (O₂), queste ultime concentrate in gran parte nel rosso profondo ai confini dell'IR. Lo spettro solare vero e proprio costituisce tuttavia un laboratorio unico per gli appassionati di fisica e, perché no, anche 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:



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

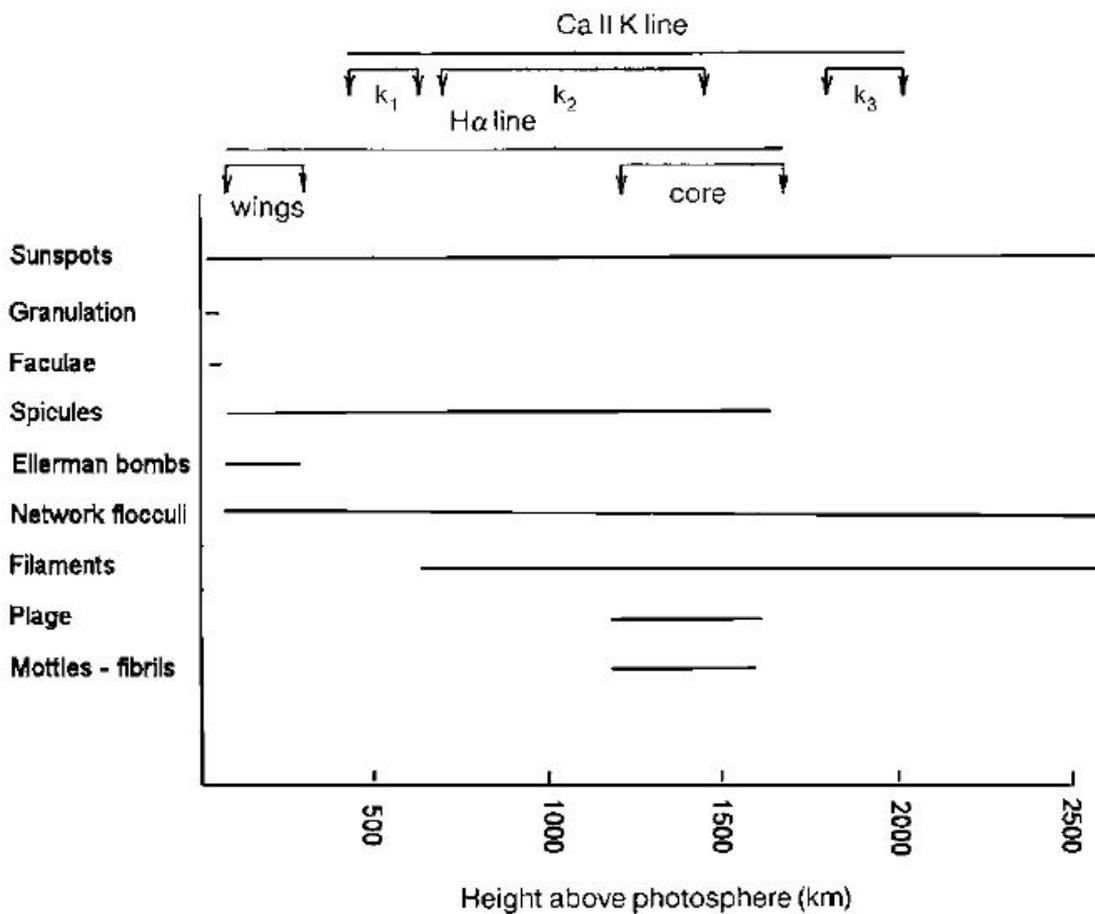


Nella tabella sottostante (<https://solarnutcase.livejournal.com/9556.html>) sono invece riportati, per le principali righe, l'elemento di appartenenza, la EW e la loro collocazione nell'atmosfera solare, coi dati relativi all'altezza ed alla temperatura

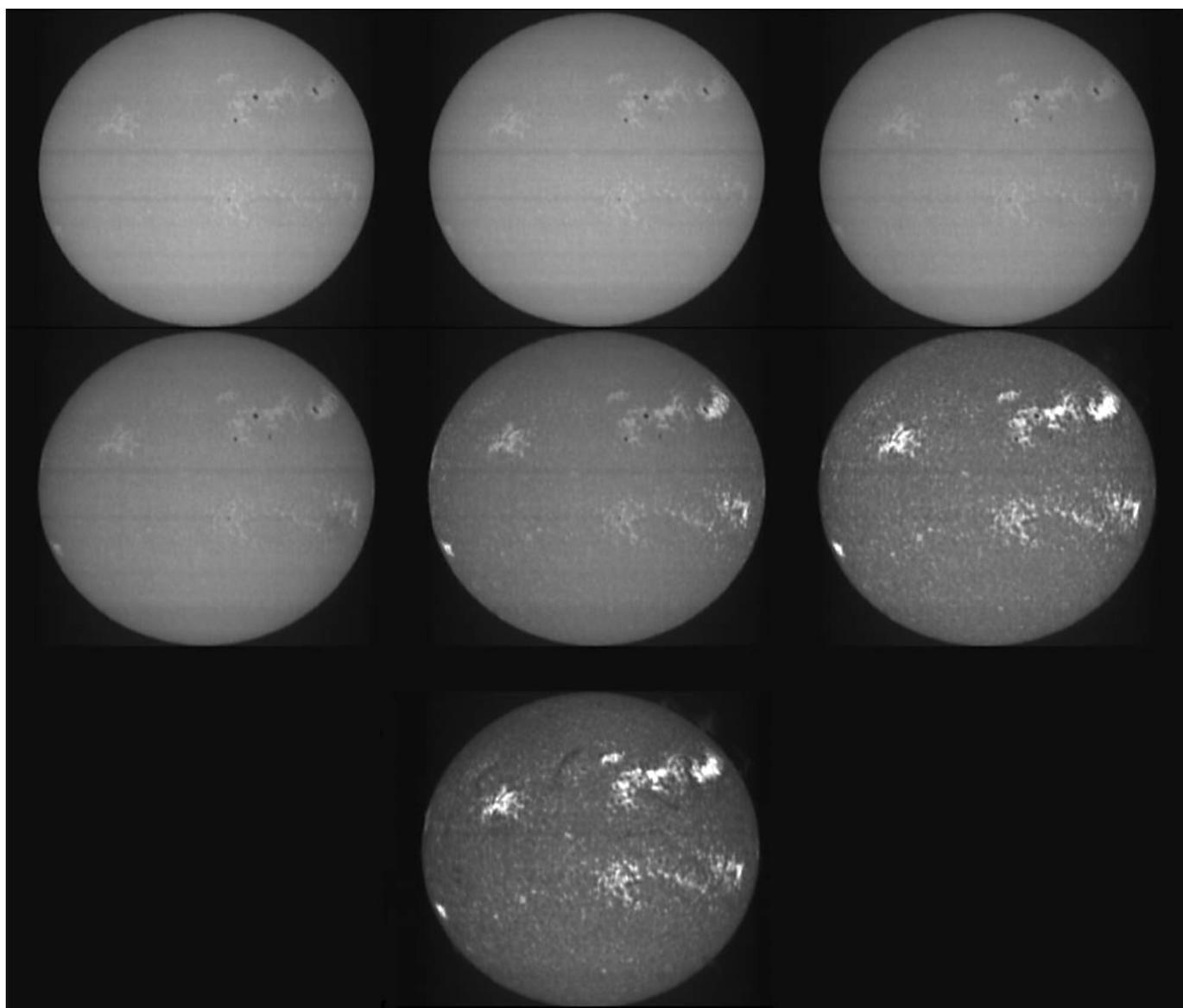
Wavelength (nm)	Name	Species	Equivalent width (nm) Disk Centre	Region	Height above Photosphere (Km)	Temp (K)
Soft X-rays				Corona	>5000	2,000,000
121.57	Lyman α	H		Upper chromosphere	2200	20,000
155		C IV		Transition region	2500	100,000
279.54	k	Mg II	2.2	UV emission, high chromosphere	500-1600	
280.23	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)		
2231.06		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.



Mentre il "core" della riga H alpha a 6562.8 Å misura circa 1.0-1.2 Å, con le ali essa può estendersi sino a 10 Å dal centro, la CaIIK a 3933.68 Å, il cui centro, compresi i punti di stazionarietà ed il CaII K 3 copre circa 2.2- 2.4 Å , con le ali può raggiungere i 20 Å di estensione.

Come si vede, quindi, la spettroeliografia non è 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 ad altissima risoluzione potrebbero anche essere 7-8000: di queste le più importanti, 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) che si prestano ad essere registrate senza problemi da strumenti amatoriali a medio-alta risoluzione.

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

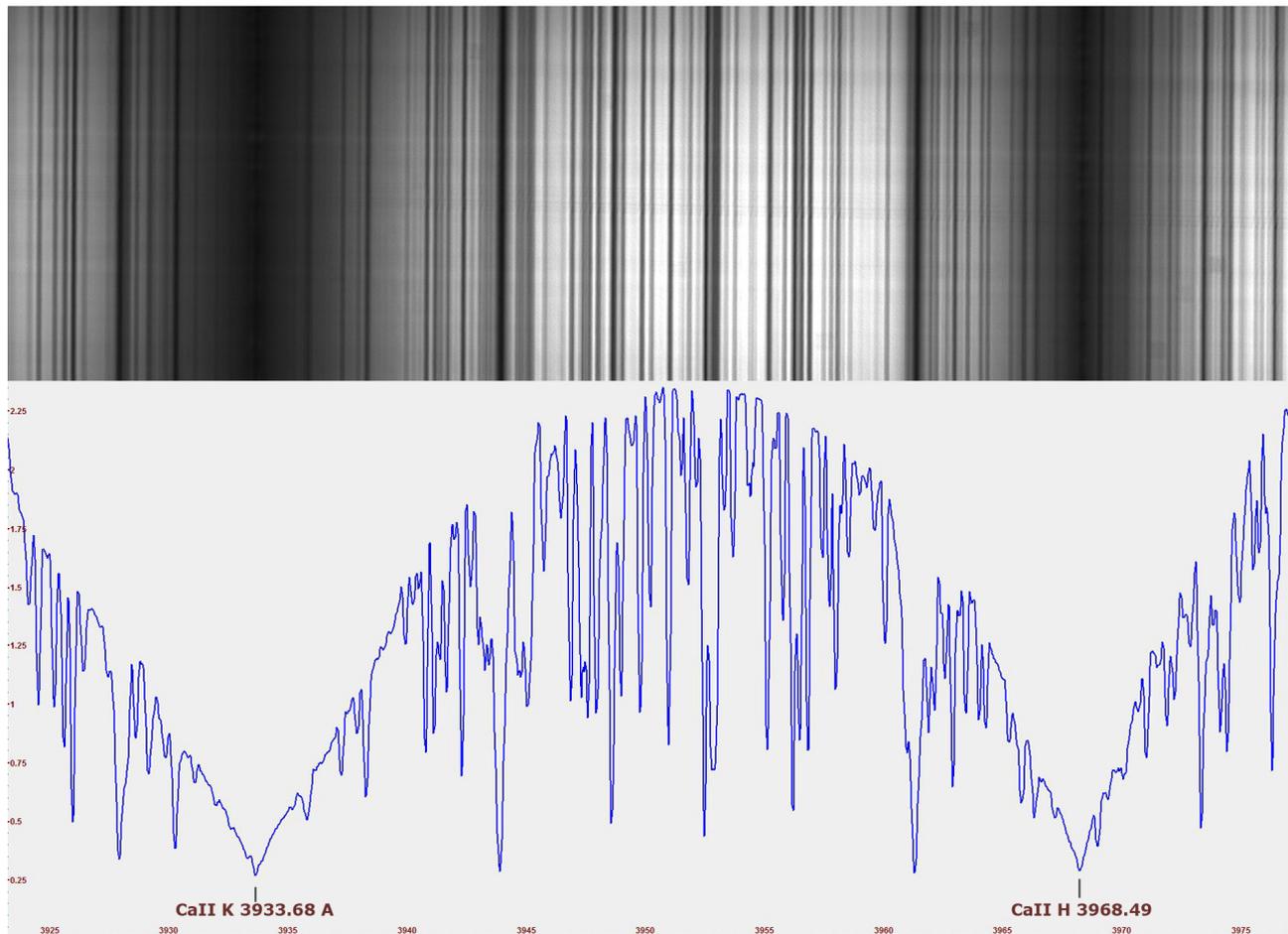
Wavelength (nm)	Line Width (nm)	Element		Wavelength (nm)	Line Width (nm)	Element
393.3682	2.0253	Ca II		440.4761	0.0898	Fe I
394.4016	0.0488	Al I		441.5135	0.0417	Fe I
396.1535	0.0621	Al I		452.8627	0.0275	Fe I
396.8492	1.5467	Ca II		455.4036	0.0159	Ba II
404.5825	0.1174	Fe I		470.3003	0.0326	Mg I
406.3605	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 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 esistono. Qui invece dimostrerò come si possano esplorare i segreti più riposti della nostra stella con cifre da un minimo di 500 ad un max di 1000- 1500 €.

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

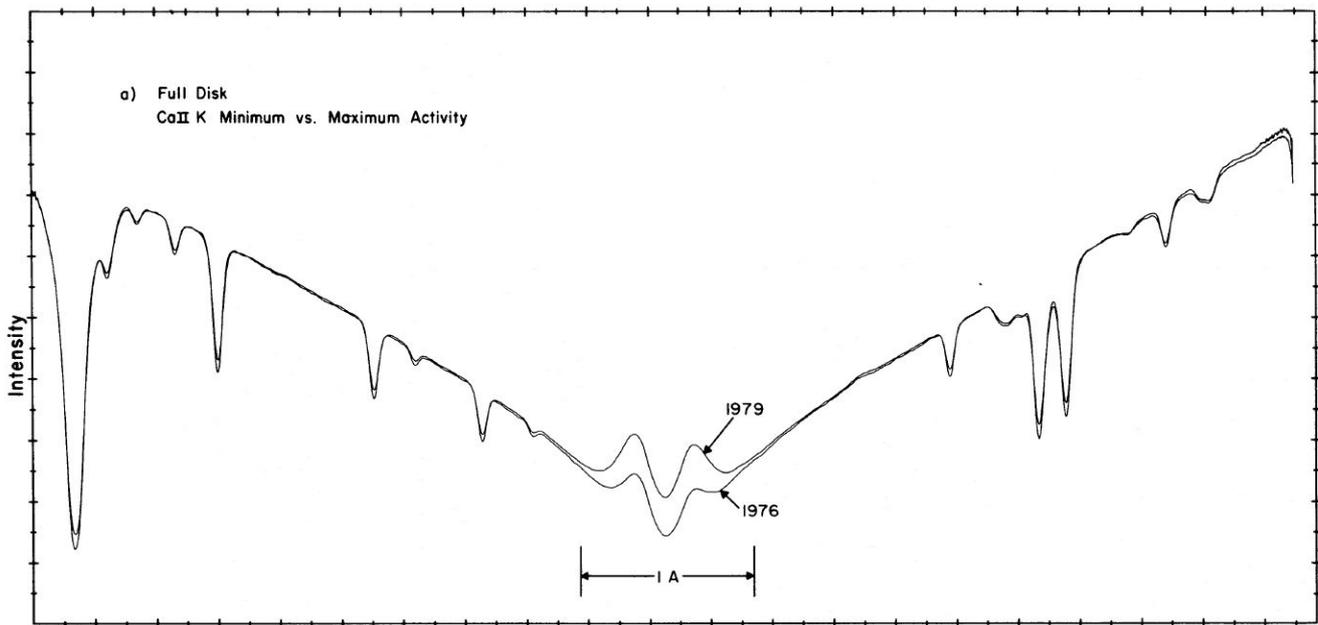
Le righe del Calcio ionizzato CaII K e H

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 Å 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 Å (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.

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 un' orbita ad energia minore rilascia una certa quantità di energia sotto forma di radiazione avente una determinata lunghezza d'onda , dando origine ad una riga di emissione.

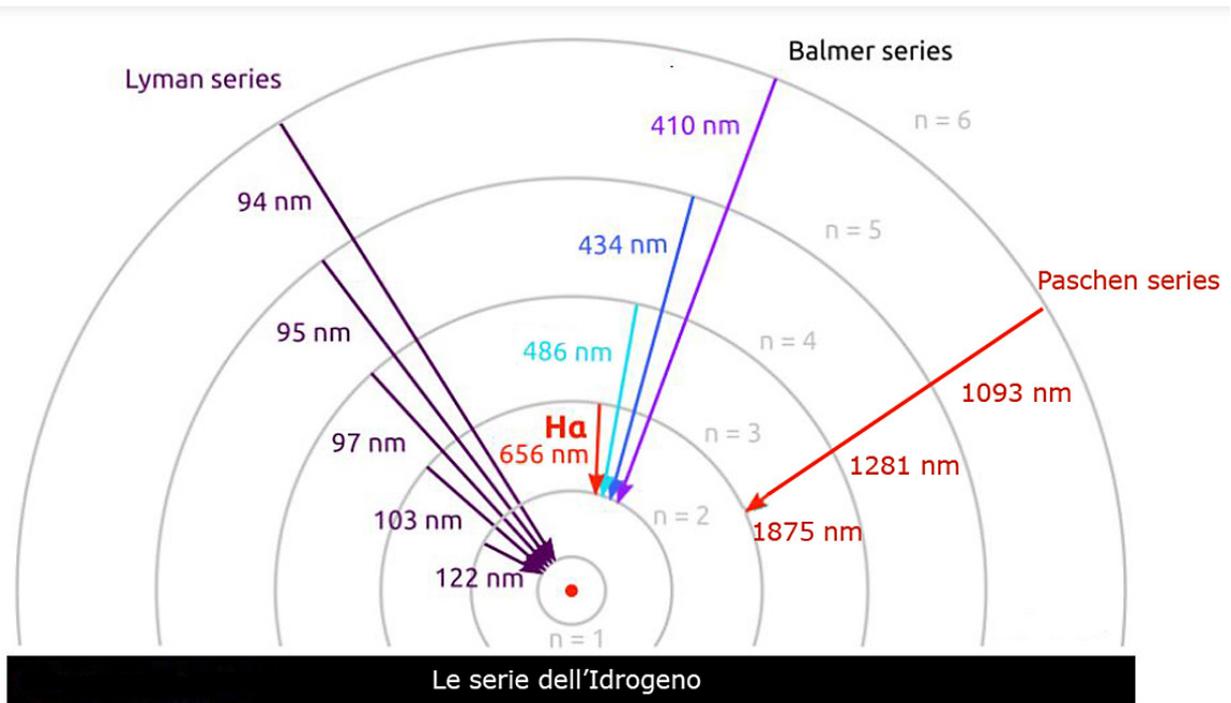
Le transizioni che gli elettroni compiono dalle orbite periferiche a quelle più interne si possono ordinare secondo valori decrescenti di energia: le variazioni più elevate si registrano quando un elettrone passa da un'orbita periferica a quella corrispondente allo stato fondamentale. L'insieme di tutti 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 $L\alpha$, $L\beta$, $L\gamma$ 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 $H\alpha$, la seconda dalla 4 alla 2 e viene indicata con $H\beta$ mentre la terza indicata con $H\gamma$ 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'I.R.

Serie di transizione dell'Idrogeno

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

Nella figura che segue lo schema dei livelli energetici e delle principali serie dell'atomo di idrogeno.



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, dandogli peraltro il colore rosso che la contraddistingue.

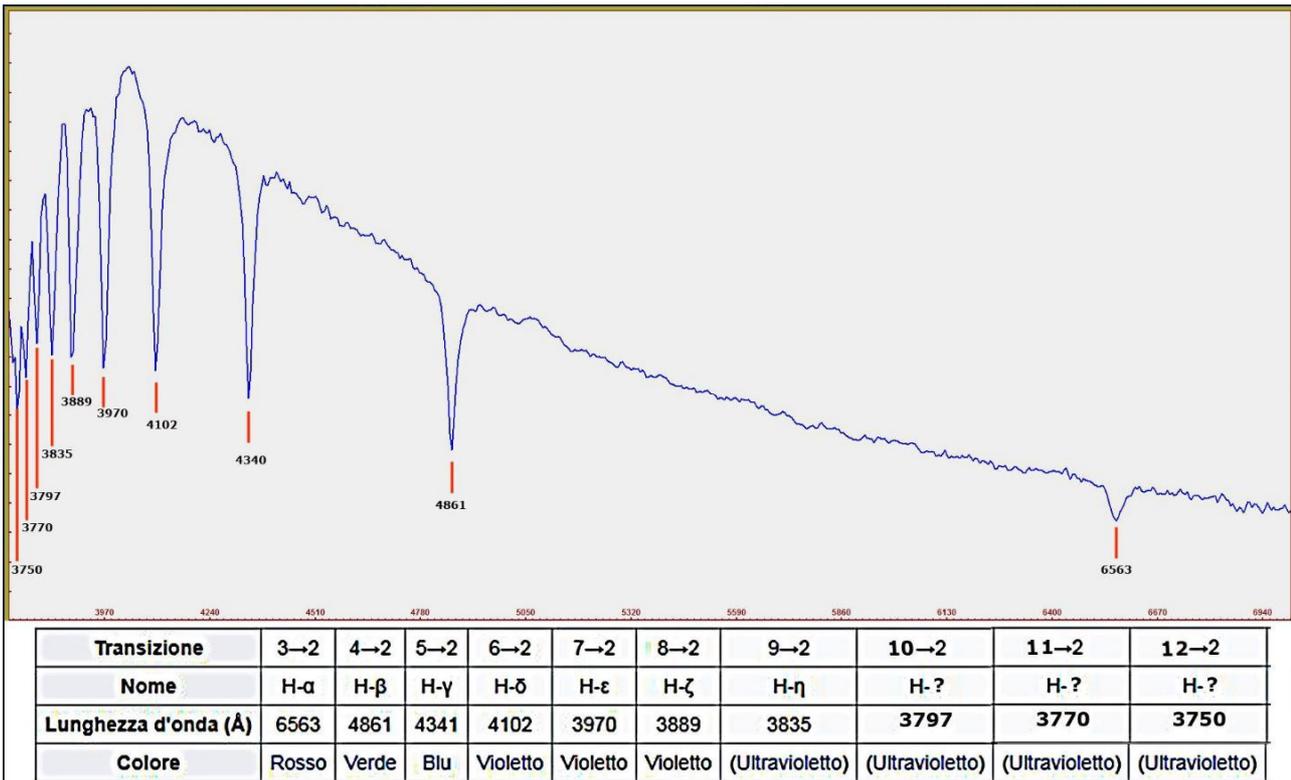
La formula di Balmer per la serie che da lui prende il nome, nel visibile, è la seguente:

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

dove B è il limite di Balmer a 3646 Å; m è un qualsiasi intero $m > n$

Qui di seguito, lo spettro di assorbimento della serie di Balmer dell'Idrogeno da me calcolato sulla stella Vega sino alla transizione $12 > 2$:
Ad esempio, per la transizione $10 > 2$ è :

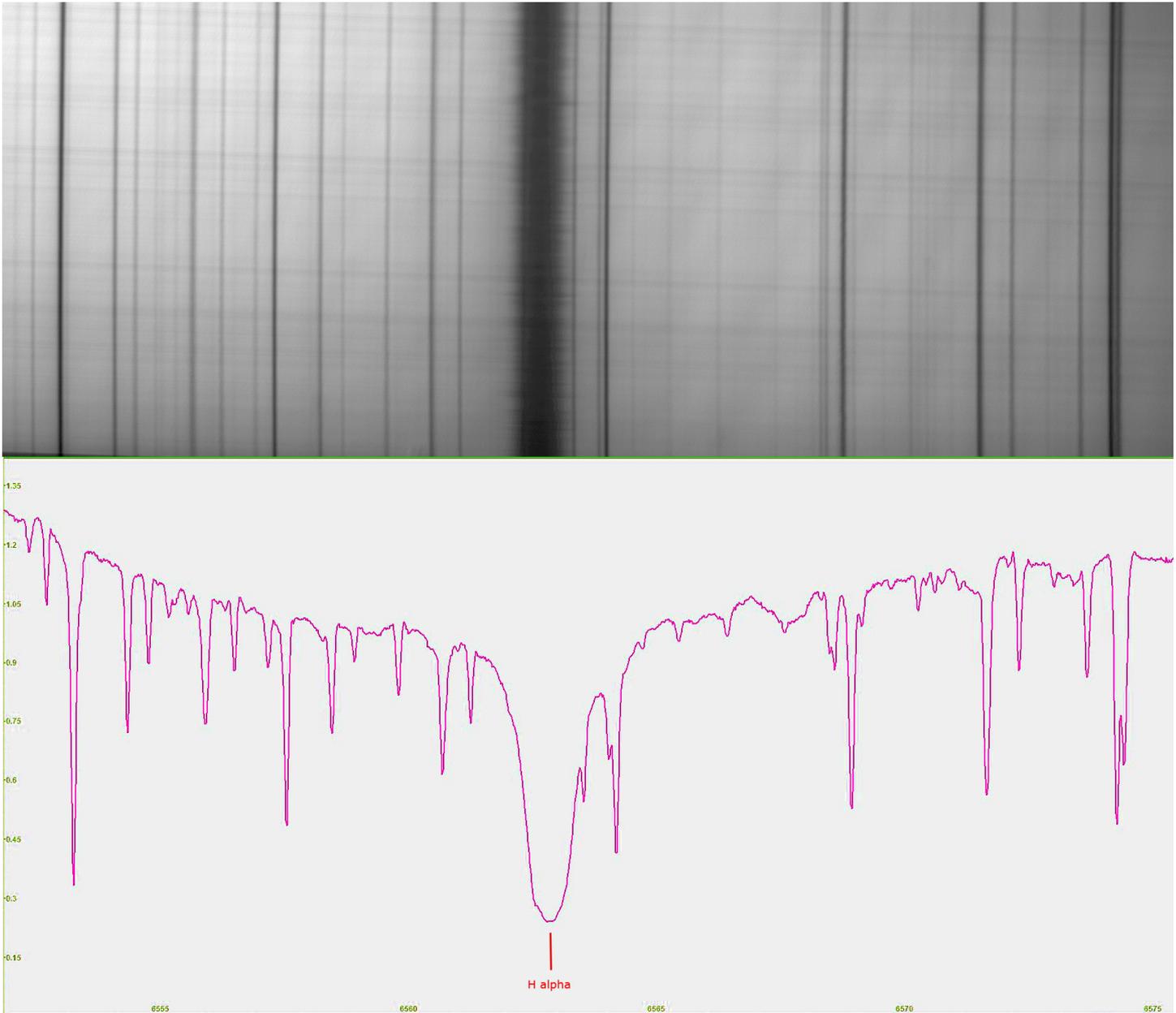
$$3646 \times \left(\frac{100}{96} \right) = 3797 \text{ \AA}$$

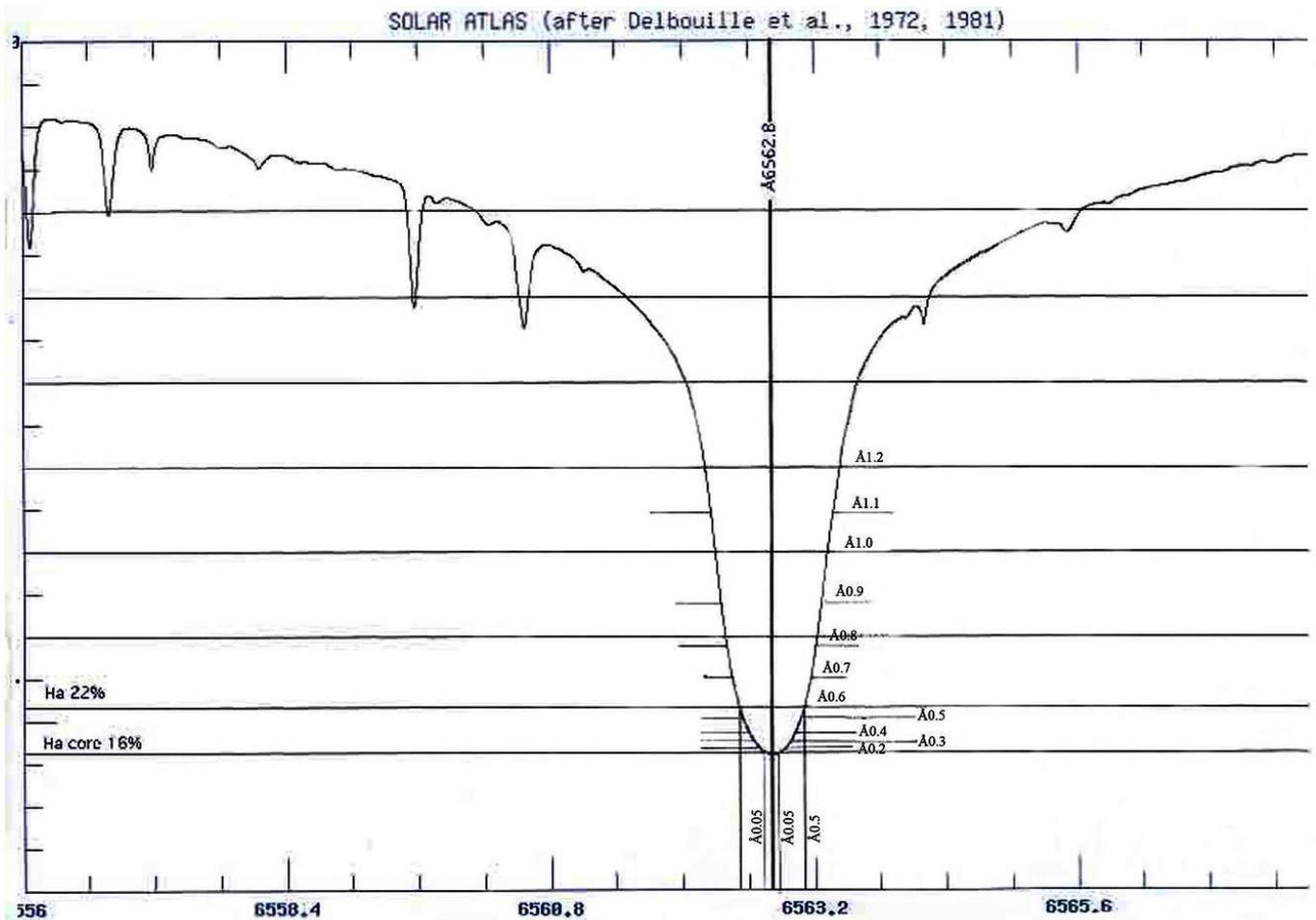


La riga H α

Come si è detto, la transizione $3 \rightarrow 2$ dell'Idrogeno a 6562.8 \AA (riga H α) costituisce l'elemento che caratterizza la cromosfera e le dà il caratteristico colore rosso profondo. 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, come si osserva nella figura a pag 44.

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



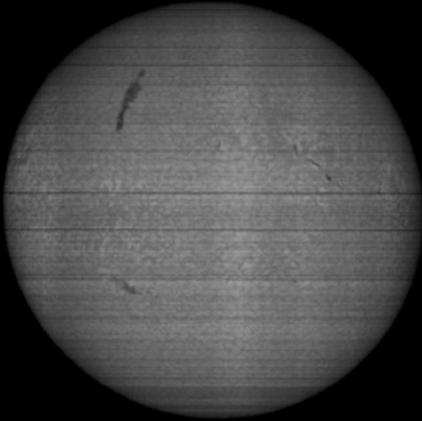


Profilo della riga H α in assorbimento con la estensione in Angstrom del core e delle ali: come si osserva la FWHM è mediamente di 1-1.2 Å (fonte: Debouille Solar Atlas_ Bass 2000).

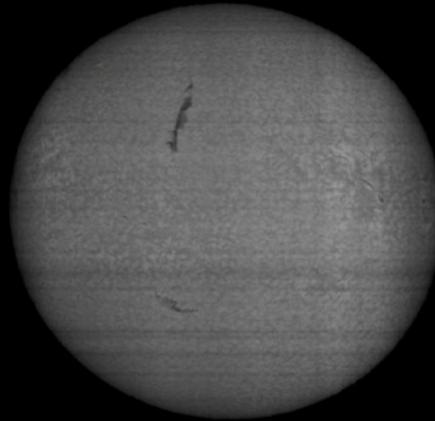
La riga H β

La riga H β a 4861.34 Å sembrerebbe a primo acchito 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 "F-Croma" ha potuto verificare tale caratteristica con un piccolo flare osservato il 27 settembre 2015: nell'immagine che segue la sequenza delle osservazioni in luce H β da me effettuate durante la campagna con VHIRSS.

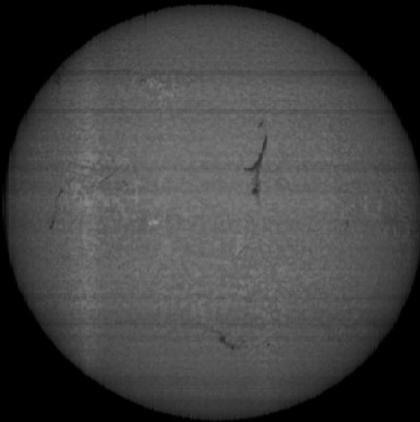
15-09-21



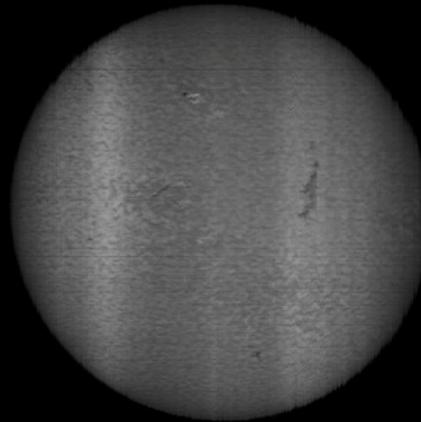
15-09-22



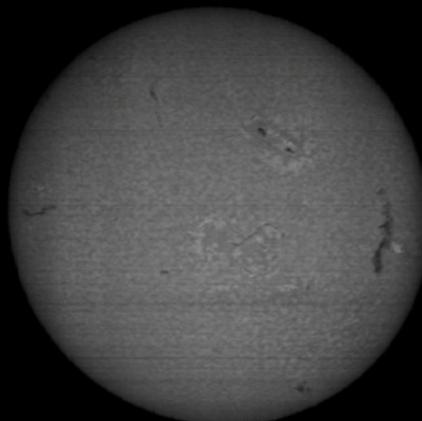
15-09-24



15-09-25

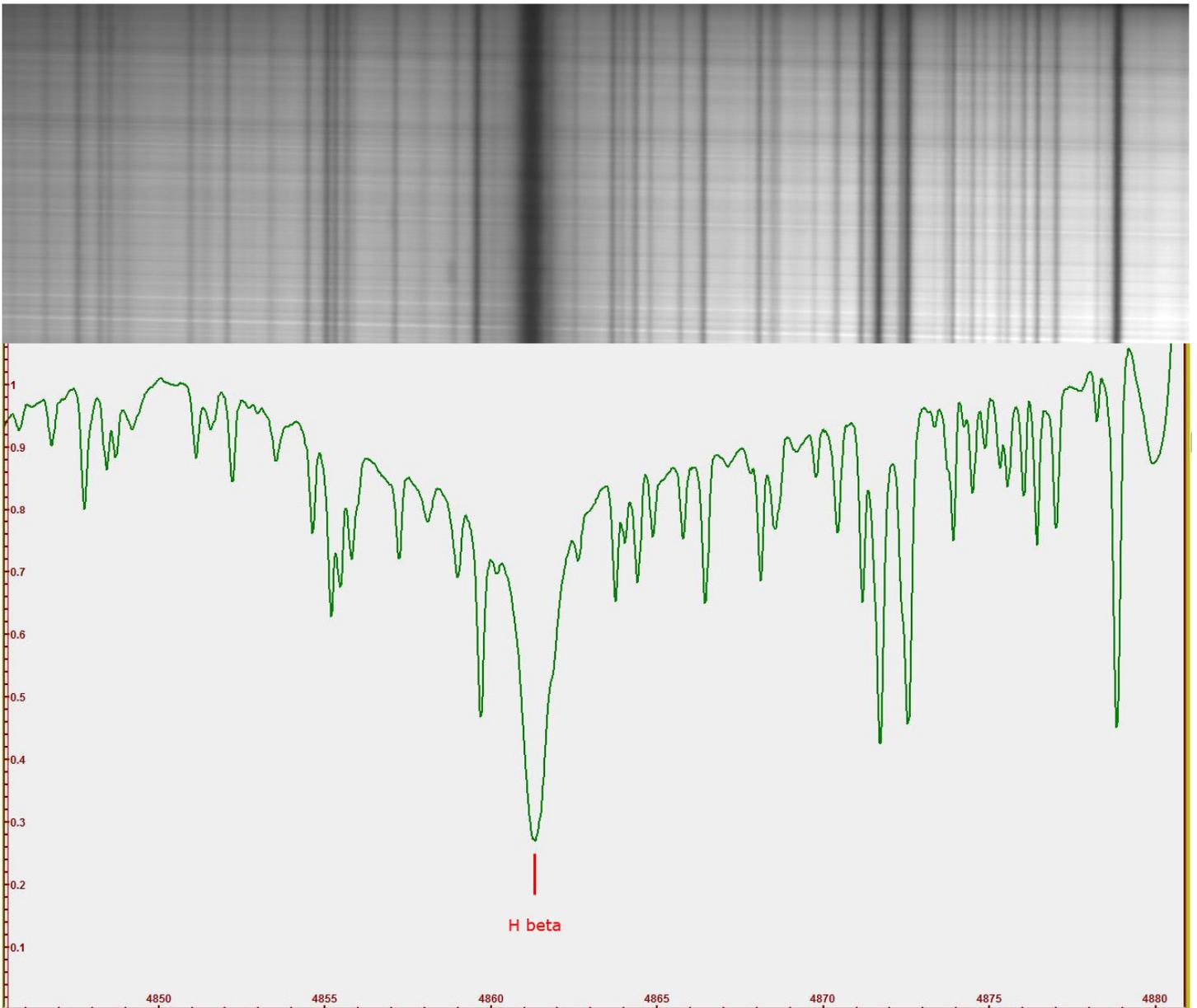


15-09-27



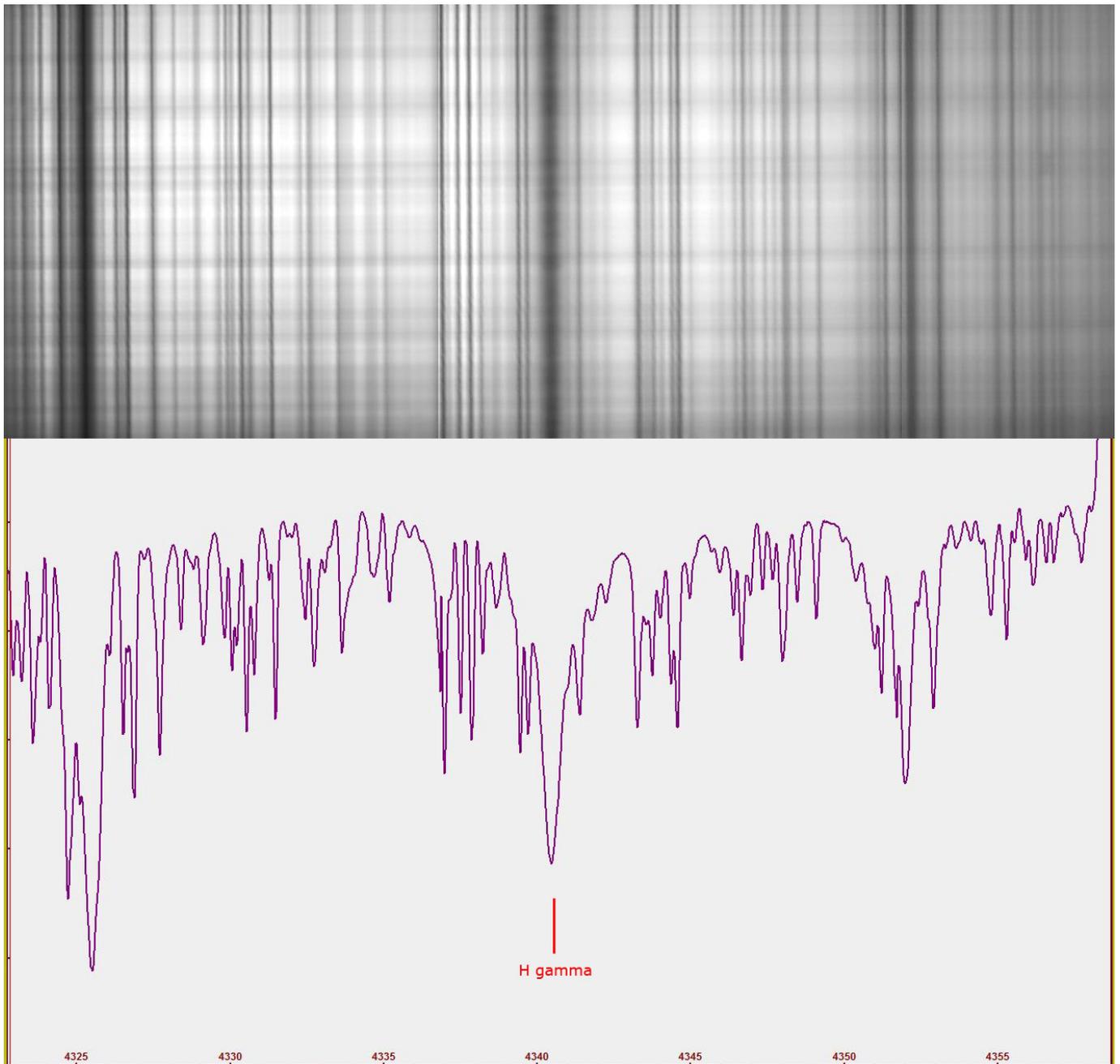
Sun in Hbeta light 486 Nm and AR 12 422 evolution September 21-27-2015 -
VHIRSS digital spectrohelioscope Fulvio Mete, Rome , Italy

Nell'immagine sottostante la riga H β come ottenuta al fuoco di VHIRSS.

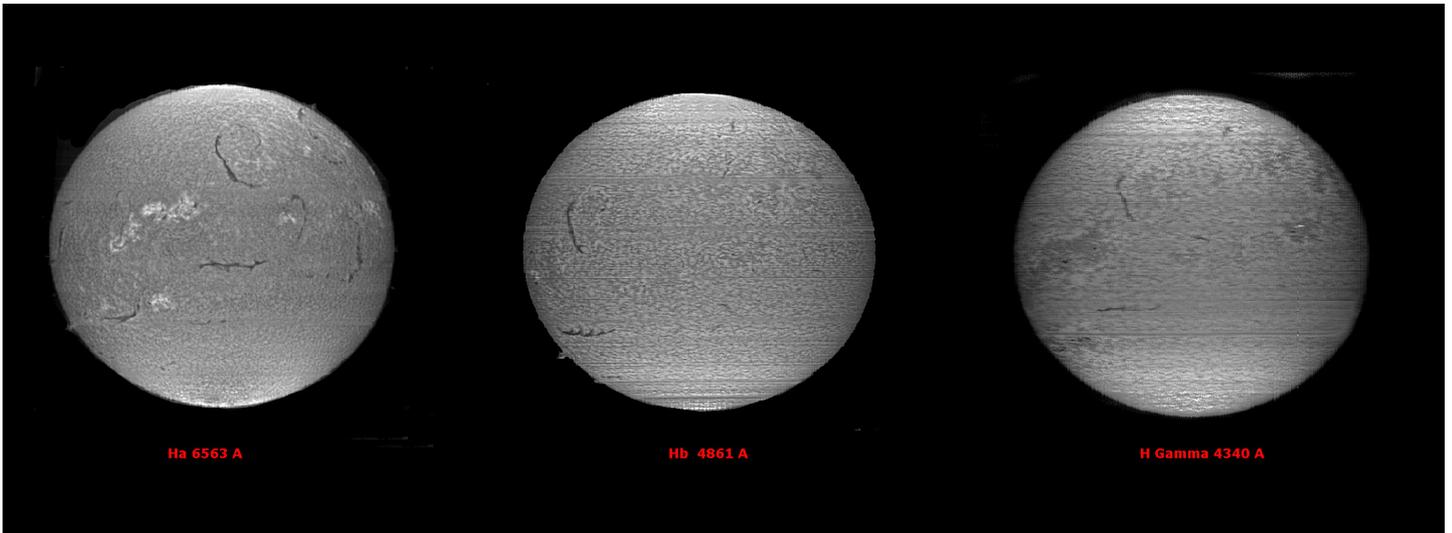


La riga H γ

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 che segue 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.

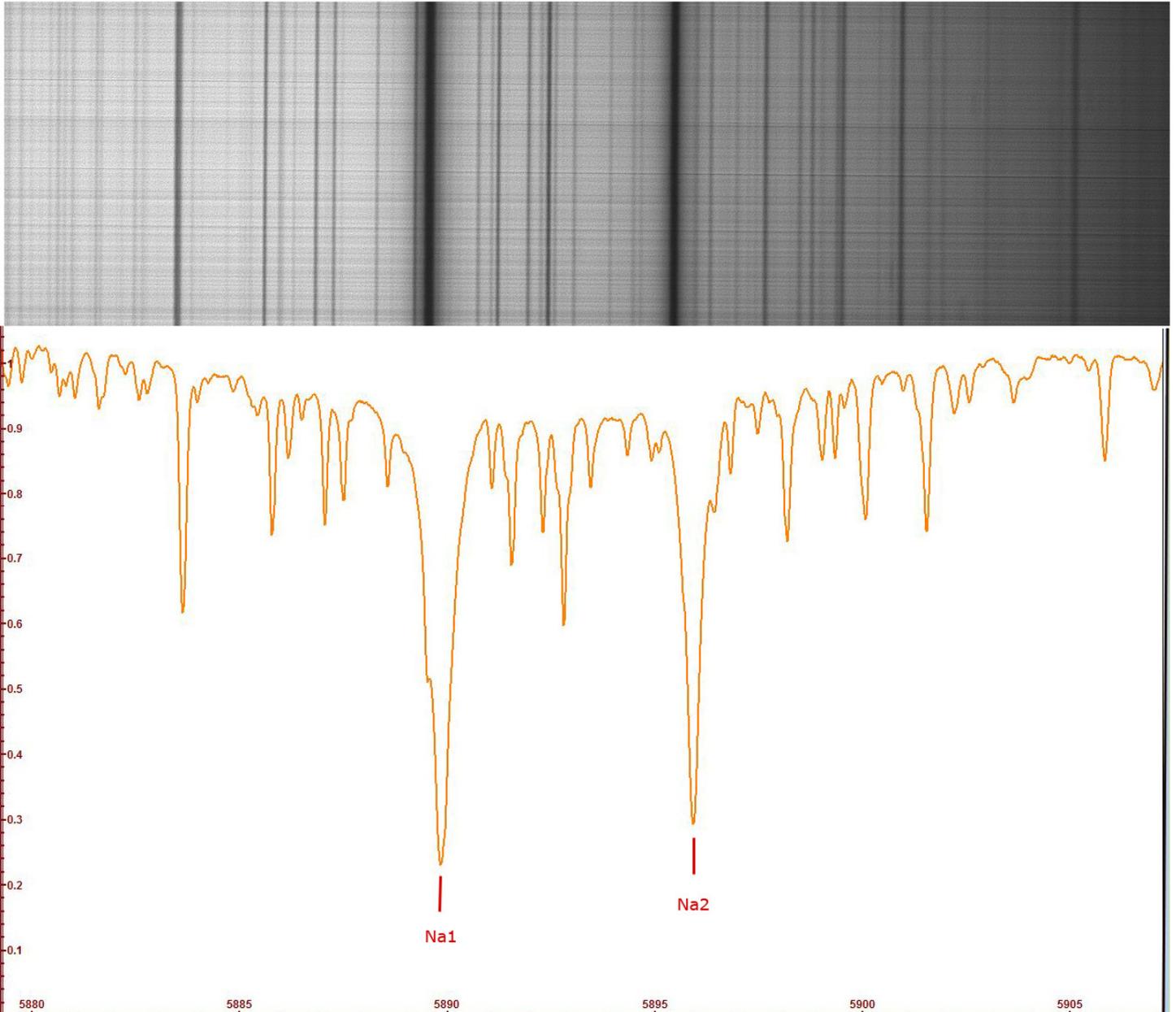


Le righe Na 1 e 2 (doppietto del sodio).

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.

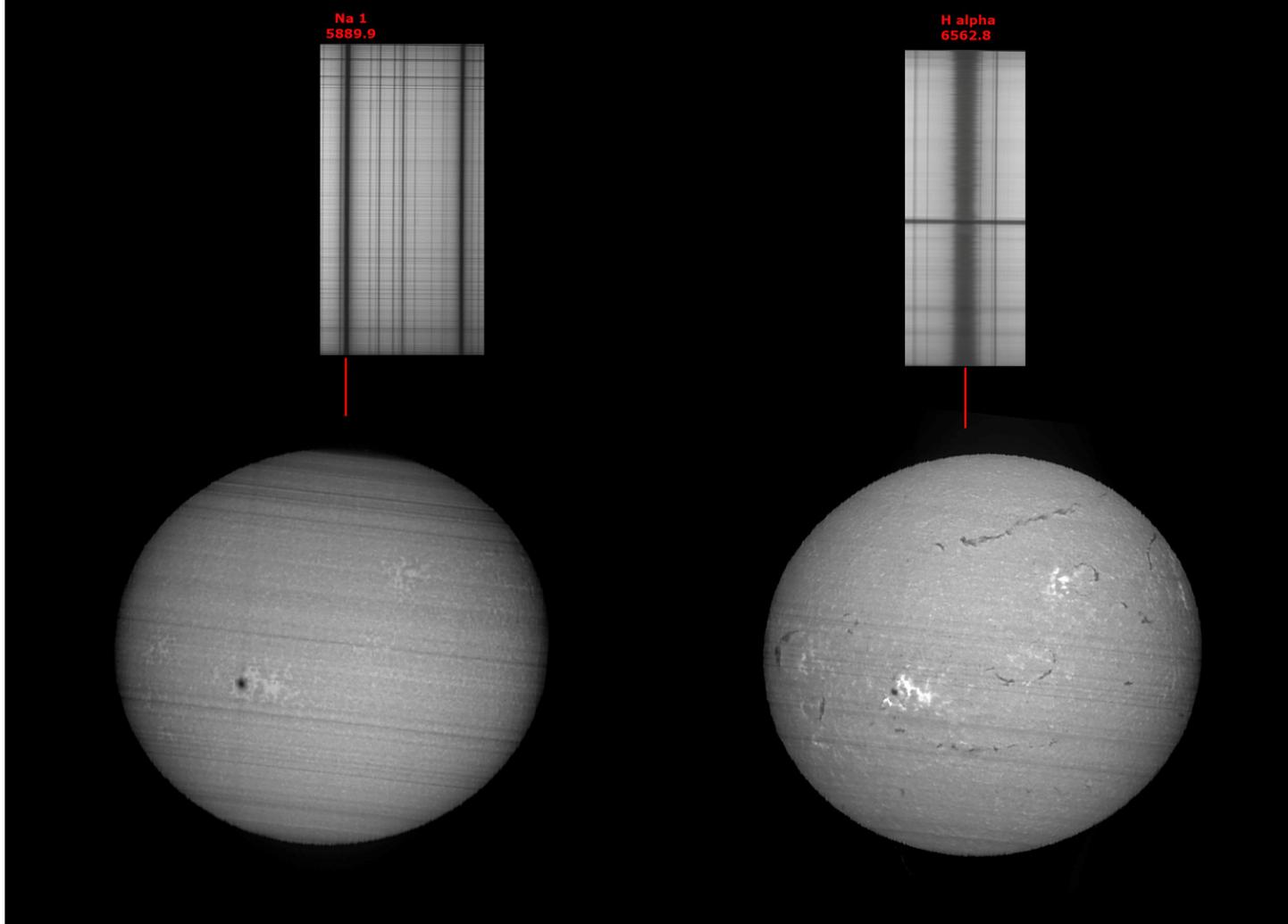
Per inciso, le righe in questione sono state quelle usate dallo strumento GOLF (Global Oscillations at Low Frequencies) a bordo della sonda SOHO qualche anno fa, al fine di misurare la velocità della fotosfera lungo la linea di vista per tutto il disco in modo da osservarne piccole oscillazioni, nonché 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 strumento Solarscan (molte righe all'interno del doppietto e nelle sue immediate vicinanze non appartengono al Sole, ma all'atmosfera terrestre)



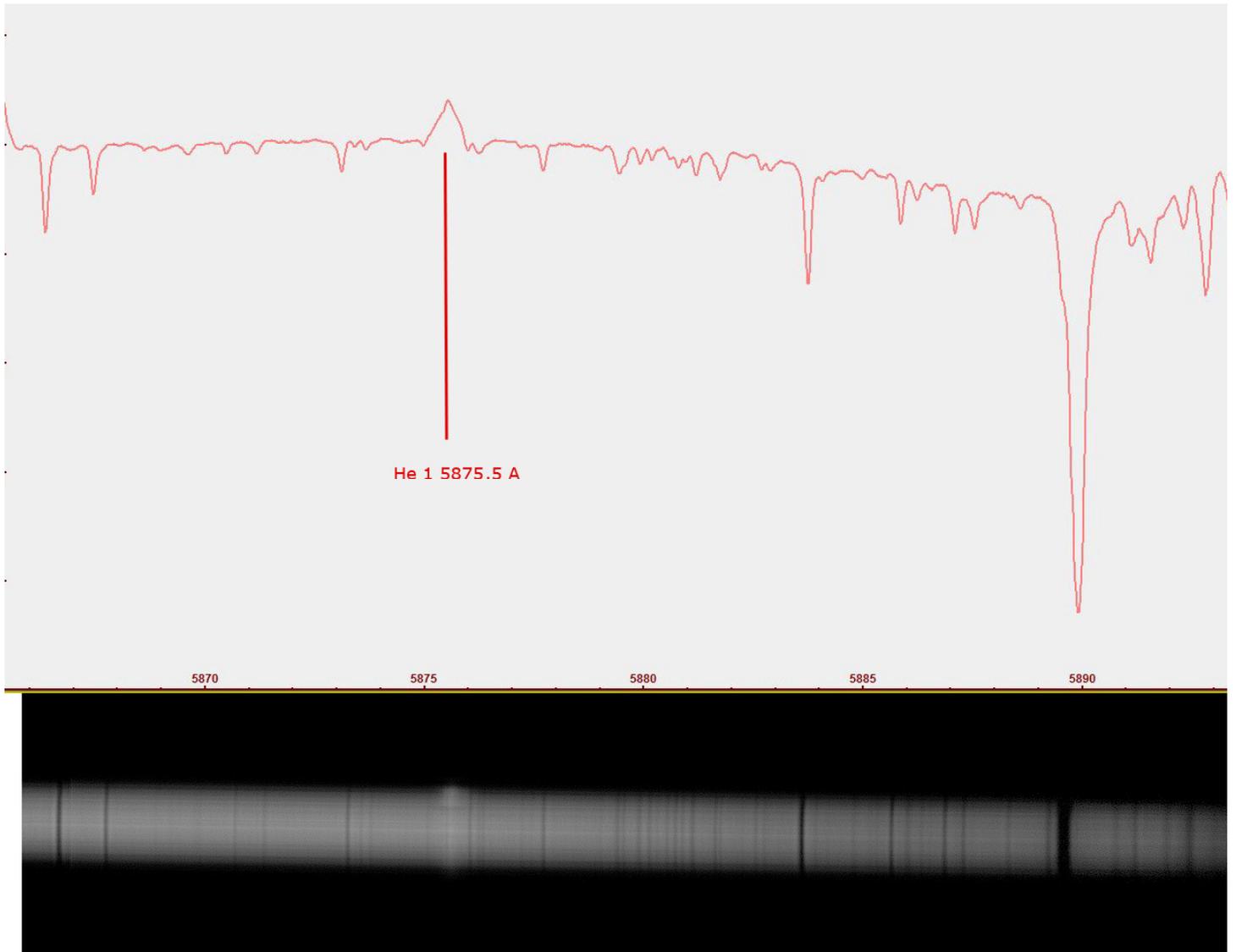
Nell'immagine che segue, una comparazione tra gli spettroeliogrammi in luce sodio NaI e Idrogeno Alfa, ovvero tra bassa ed alta cromosfera e tra due elementi molto diversi, un metallo alcalino ed un gas che è il primo elemento chimico della tavola periodica e l'elemento più diffuso nell'Universo osservabile.

Appearance of sundisk in Na 1 line at 5889.9 Å and H alpha at 6562.8 Å: a tomography of cromosphere
Solarscan in spectrohelioscope mode- May 22 2016 - Fulvio Mete Rome Italy



La riga dell'Elio

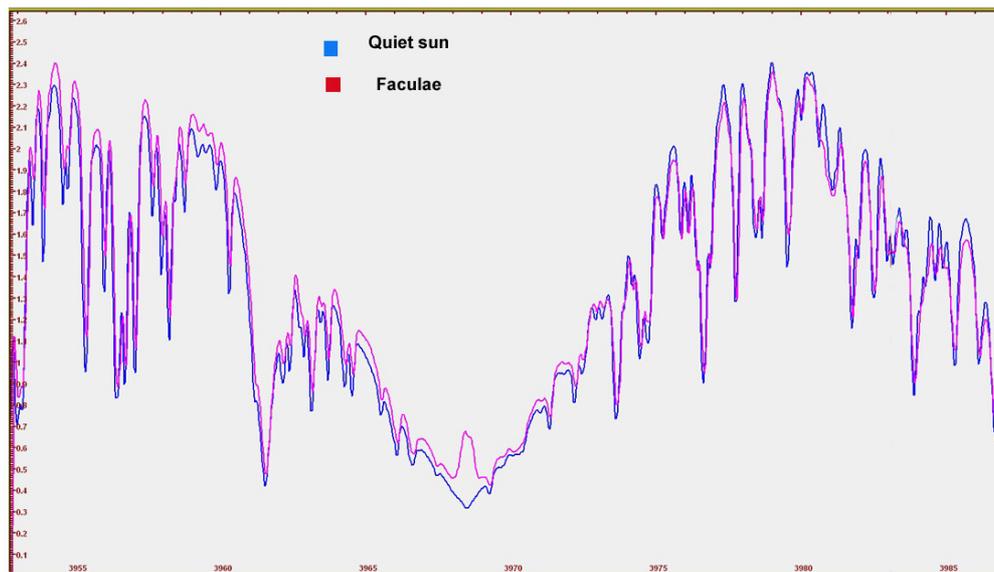
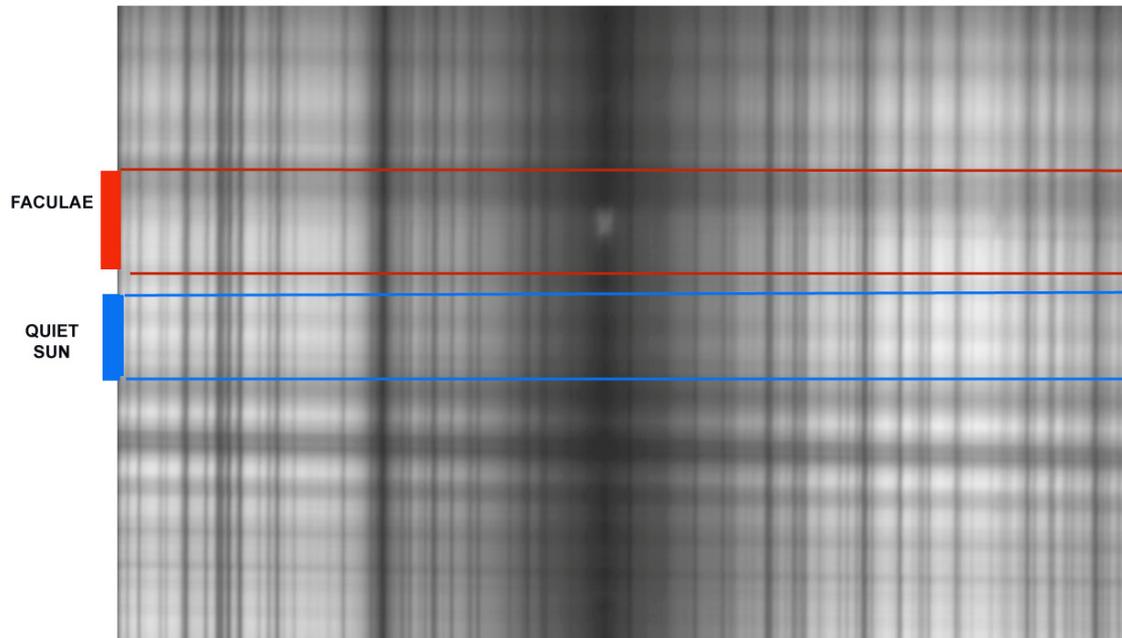
La riga dell'Elio a 5875 Å in assorbimento è piuttosto difficile da individuare per la sua elusività: molto più facile la riga in emissione, che si può riprendere ponendo la fenditura dello spettrografo sul bordo del disco solare.



Le righe CaII K e H

Sono le famose righe del Calcio ionizzato a 3933.68 \AA , e 3968.49 \AA 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 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 .

Lo spettroelioscopio (spettroeliografo per la fotografia) fu sviluppato da George Ellery Hale 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.



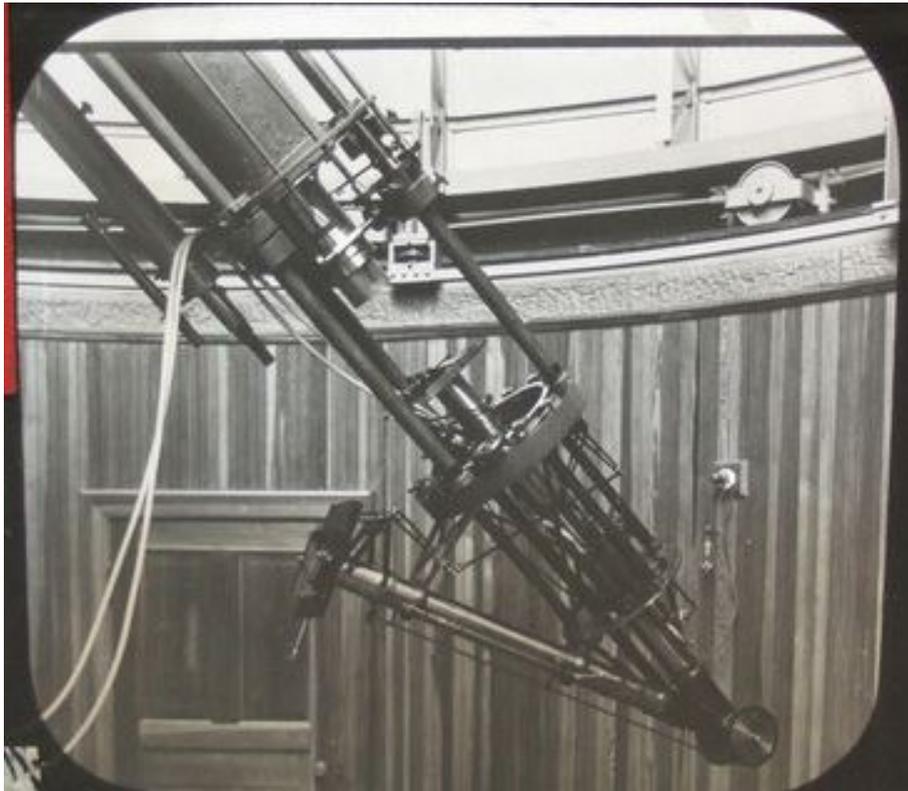
Lo spettroeliografo fu, ad onor del vero, inventato indipendentemente da Hale e dal francese Henri Alexandre Deslandres, ma ad Hale va il merito di aver perfezionato l'invenzione sino a creare un potentissimo mezzo d'indagine della fisica solare. Lo sviluppo della lastre al collodio, unitamente all'invenzione 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 datava 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.



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

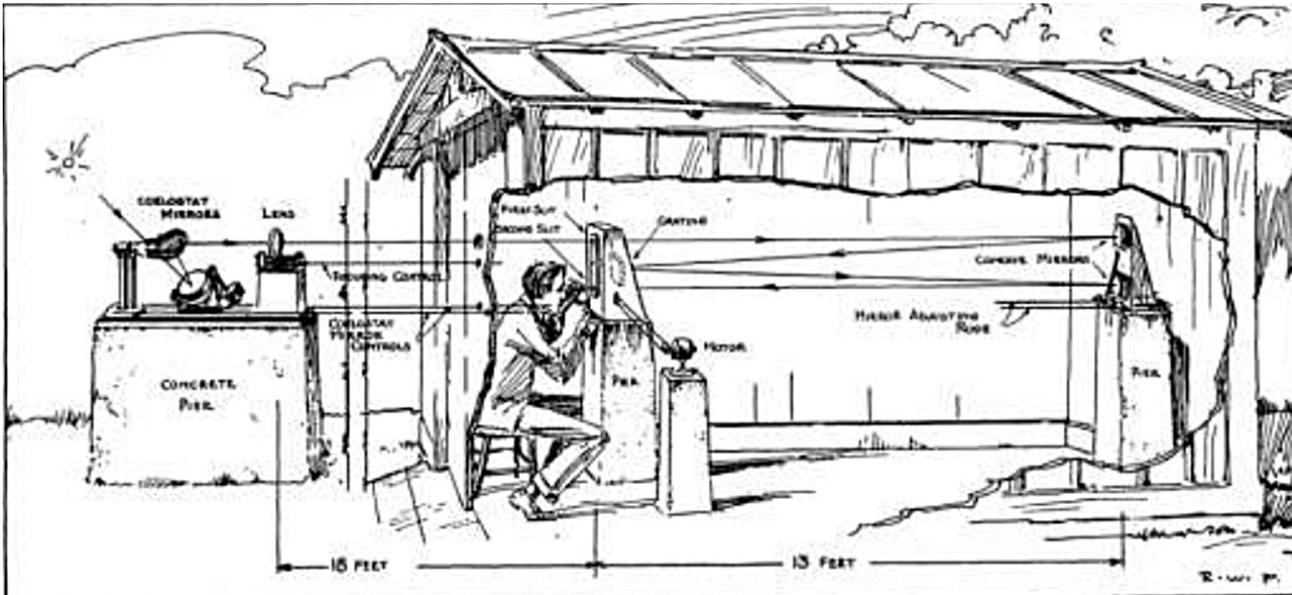
Il Kenwood fu l'Osservatorio personale di Hale, costruito nel 1890 dal padre William Hale, presso il quale fu installato il rifrattore Brashear da 12" con lo spettroeliografo.



Lo spettroeliografo di Hale al fuoco del rifrattore Brashear

Non molti lo sanno, ma Hale fu anche in Italia, a Firenze, dove discusse di astrofisica solare con Abetti e Tacchini, ed a Catania, dove andò sull'Etna allo scopo di riprendere, col suo spettroelioscopio la corona solare senza eclisse; lo strumento fu applicato al telescopio dell'osservatorio di Bellini sulla sommità dell'Etna e la lunghezza d'onda prescelta fu quella del CaII K nell'UV vicino, per ridurre il glare dell'atmosfera, tuttavia l'esperimento non ebbe successo. 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 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. Scopri l'inversione della polarità dei campi magnetici delle macchie al cambio del ciclo. Hale morì nel 1938 dopo una vita di intensa attività scientifica.

Intorno al 1920, dopo la messa a punto dello spettroeliografo, Hale esaminò la possibilità di usare il suo spettroeliografo per osservazioni visuali, usandolo come spettroelioscopio, e perfezionò tale idea nel 1924.



Layout dello spettroelioscopio (SHS) di Hale: l'unica differenza con uno spettroeliografo è la sostituzione dell'oculare al posto della camera di ripresa, dopo la fenditura di uscita.

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

Di seguito alcune foto dello Spettroeliografo di Meudon a Parigi (fonte : BASS 2000).

Lo spettroeliografo, con un obiettivo di 240mm e 4000 mm di focale, dà un'immagine solare di ben 86 mm sul piano focale. La sua finalità è di ottenere immagini dell'intero disco del Sole nelle varie lunghezze d'onda d'interesse.

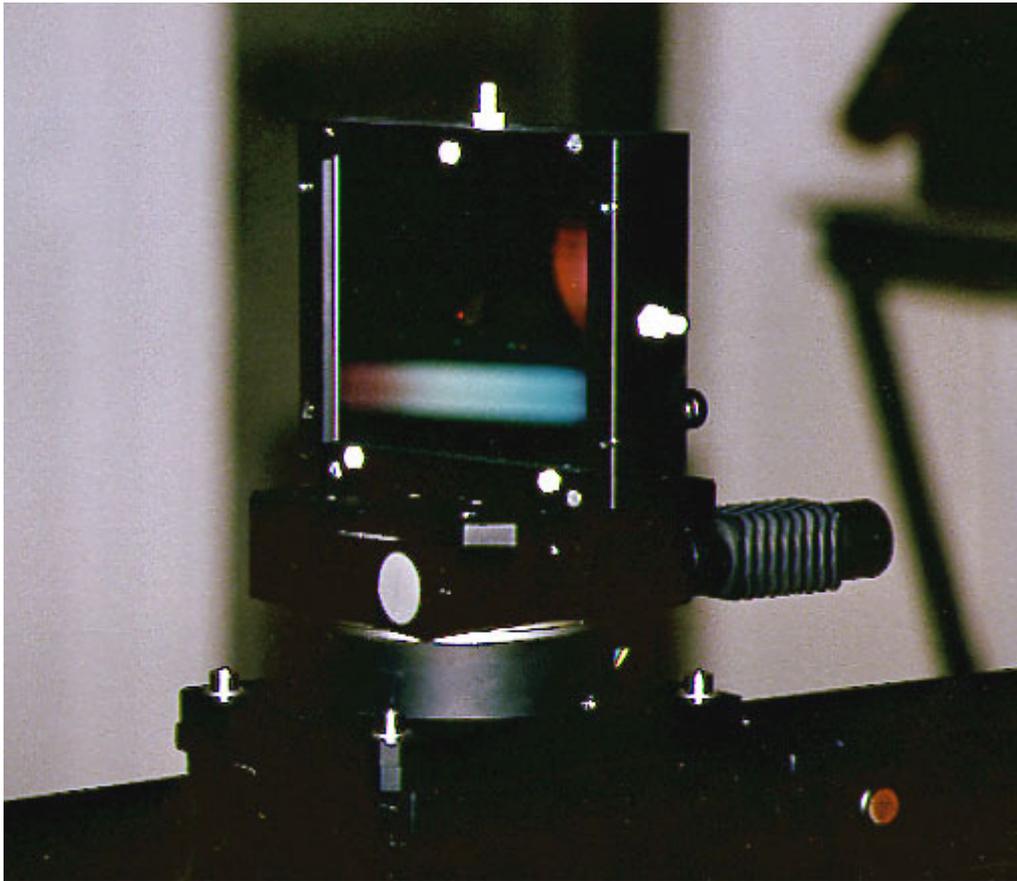


Il celostata che alimenta l'obiettivo da 240 mm e l'obiettivo stesso





Lo spettrografo nella sala di controllo. Questo fornisce una dispersione di 3.33 Å/mm nel 3° ordine in H α , equivalente a circa 0.03 Å/pixel con una camera con pixels da 10 micron e 0.016 con una camera con pixel da 5 micron.



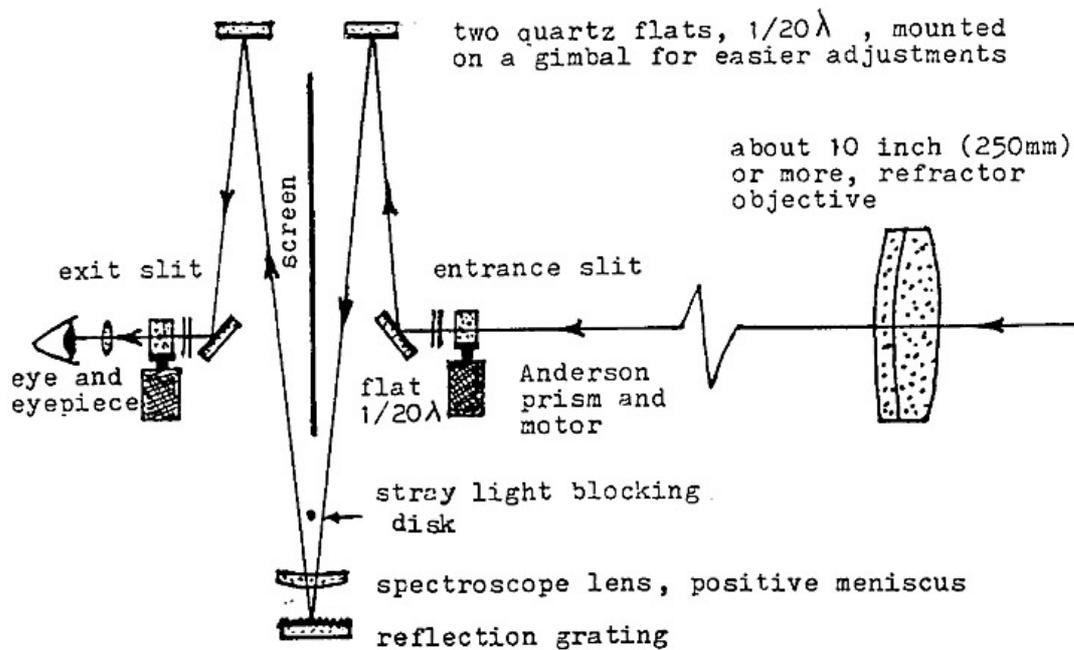
Il reticolo di diffrazione, di grandi dimensioni ma di sole 300 l/mm

La spettroeliografia amatoriale

Spettroeliografi amatoriali "Classici"

Ma che cos'è uno spettroeliografo classico (SpectroHelioGraph, SHG in inglese)? Si tratta in pratica di uno spettroscopio, alimentato da un telescopio che invia un'immagine del disco solare di adeguate dimensioni sulla fenditura di ingresso del medesimo, la luce solare diffratta viene poi selezionata nella riga di interesse da una seconda fenditura , detta di uscita. Immediatamente prima e dopo le due fenditure, sono posti due sintetizzatori d'immagine, (in genere prismi rotanti detti di Anderson) comandati da un sistema motorizzato, il primo alimenta la fenditura di ingresso, ed il secondo forma l'immagine in uscita. La rotazione dei prismi ad una data velocità consente, per effetto moviola, di formare un'immagine del disco solare nella lunghezza d'onda corrispondente alla riga esaminata che viene osservata all'oculare o ripresa con una fotocamera o camera CCD.

Si tratta tuttavia di strumenti che, seppur eccellenti, sono molto complessi da autocostruire specie per la loro parte elettronica e meccanica, in primo luogo i sintetizzatori, dei quali esistono vari tipi, e per le loro dimensioni, dato che è necessario utilizzare focali elevate per ottenere un'immagine sulla fenditura di ingresso dello spettroscopio piuttosto grande e quindi un'immagine spettroeliografica solare finale di adeguata risoluzione. Nella figura un esempio di layout di spettroelioscopio/spettroeliografo che alimenta uno spettroscopio in configurazione Czerny-Turner e che usa come sintetizzatori due prismi di Anderson.



Nella figura che segue, i prismi di Anderson la cui rotazione sincronizzata, prima della fenditura di ingresso e dopo quella di uscita permette di ottenere l'immagine del sole nella riga in esame.

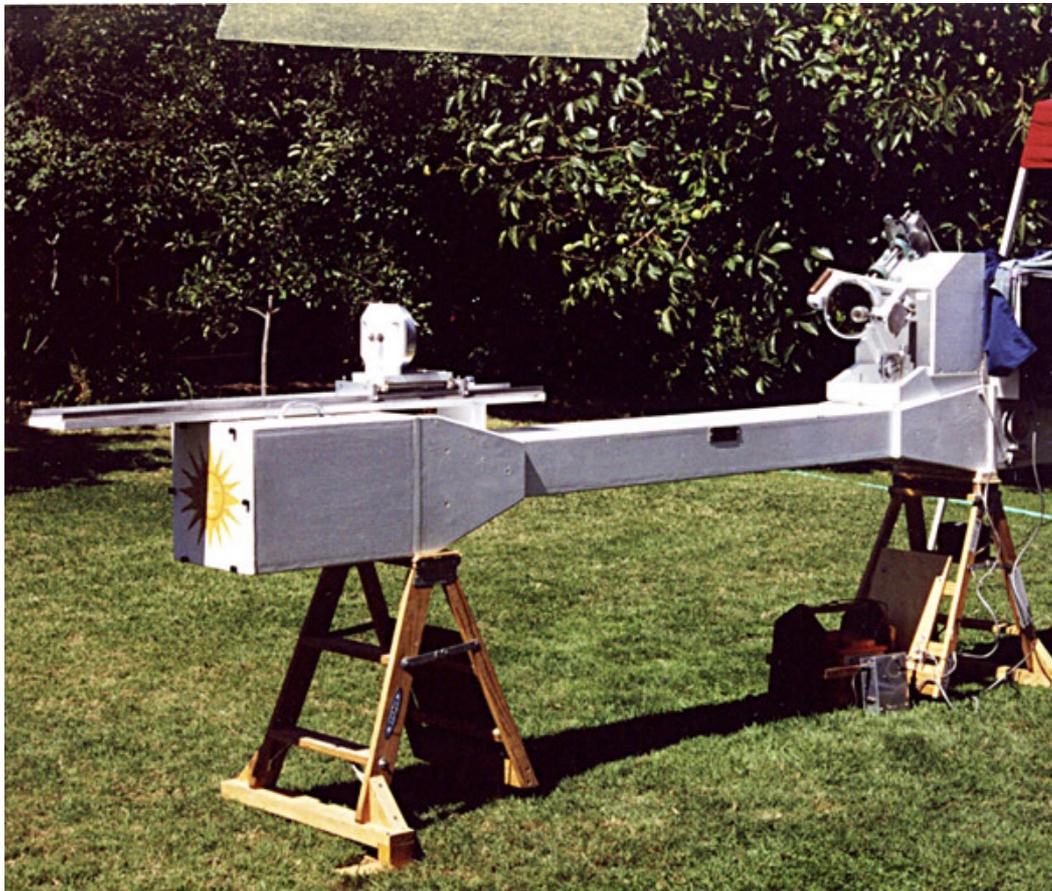
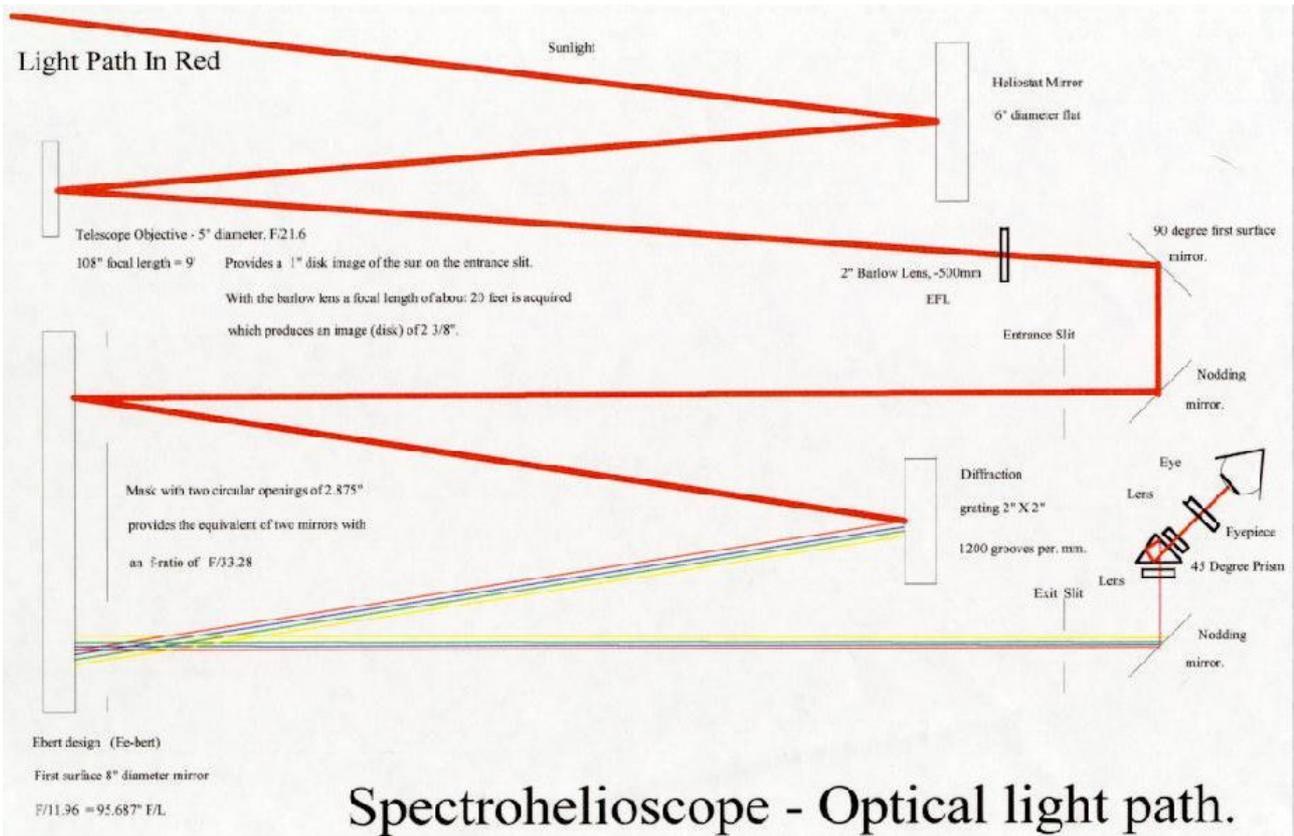


Prismi di Anderson

Qui di seguito è mostrato lo schema (l'ultimo di una serie di progetti) di uno spettroelioscopio/spettroeliografo amatoriale del noto autocostruttore americano Leonard Higgins con la guida e l'aiuto dell'altrettanto noto auto costruttore ed esperto di spettroeliografia Fredrick Veio (fonte: Spectroheliroscope .org).

Anche qui si tratta di un obiettivo rifrattore di lunga focale che alimenta uno spettroscopio Ebert; La differenza rispetto al progetto precedente è l'uso di specchi oscillanti (nodding mirrors) prima delle fenditure d'ingresso e di uscita al posto dei prismi di Anderson.

Notare le cospicue dimensioni dello strumento, che è alimentato da un celostata. (Fonte: Spectroheliroscope.org)



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, come vedremo, non potrebbero operare a meno di non avere un filtro solare in ingresso, cosa che pregiudicherebbe la raccolta di luce dello strumento (può sembrare strano data l'intensità della luce solare, ma in campo spettroeliografico, dovendosi osservare sottili righe in assorbimento in alta risoluzione e con fenditure chiuse al massimo, la raccolta di luce è importante in quanto i fotoni raccolti sono pochi anche con aperture notevoli). Le configurazioni "tutto lenti" o quelle miste, come nell'esempio di cui sopra, sono quelle più diffuse tra gli amatori.

La rivoluzione della Spettroeliografia Digitale

Lo sviluppo dell'informatica degli ultimi anni ha permesso, negli spettroelioografi amatoriali, di sostituire apposite procedure informatiche al compito svolto dai sintetizzatori: è 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. La digitalizzazione delle immagini spettroeliografiche ha sostituito l'uso dei sintetizzatori- la cui realizzazione e messa a punto è particolarmente complessa- con semplici programmi informatici. All'inizio la resa finale delle immagini degli spettroelioografi digitali era qualitativamente inferiore a quella degli spettroelioografi tradizionali, ma, col progredire dello sviluppo dei sensori CCD ora i particolari visibili sono praticamente gli stessi, 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 di Veio 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. Naturalmente strumenti come quelli di Veio hanno dalla loro il maggior potere risolutivo dato il diametro e la lunga focale delle ottiche, ma la mia esperienza, come vedremo, con ottiche di corta focale, hanno dimostrato che, perlomeno nelle immagini a tutto disco, il gap è molto ridotto od inesistente.

E' bene premettere ed evidenziare che strumenti specifici del genere non esistono nel mercato consumer, e quindi l'unica strada percorribile per l'amatore è l'autocostruzione, a meno di non voler utilizzare strumenti ad alta risoluzione per uso stellare, come lo Shelyak LHires III col reticolo da 2400l/mm, che tuttavia usa ottiche di ridotta focale e che, non essendo stato progettato specificatamente per tale uso, monta 4 fenditure riflettenti.

Ovviamente chi già possiede un tale strumento può utilizzarlo, anche se le fenditure riflettenti suscettibili di creare luce diffusa ,andrebbero a mio avviso sostituite con una singola fissa o regolabile, non riflettente.

In definitiva per strumenti dedicati a tale attività la strada dell'autocostruzione è al momento l'unica percorribile.

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 CaI K 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 , CaI K 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.

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 impossibile 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, antepoendovi 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 costerebbe cifre notevoli, dell'ordine di oltre 2-300 € (quindi quasi quanto il resto dello SHG, come vedremo). Per ora, la Hoya ha in catalogo un filtro UV-IR cut da 77 mm del costo di circa 150 €, sul quale non posso dare alcun parere non avendolo mai provato, ma che comunque avrebbe una bandpass 4000-7200 Å che di fatto escluderebbe le righe del calcio ionizzato.

Restano quindi le due configurazioni degli strumenti a specchio e rifrattori.

Telescopi a specchio

Newton

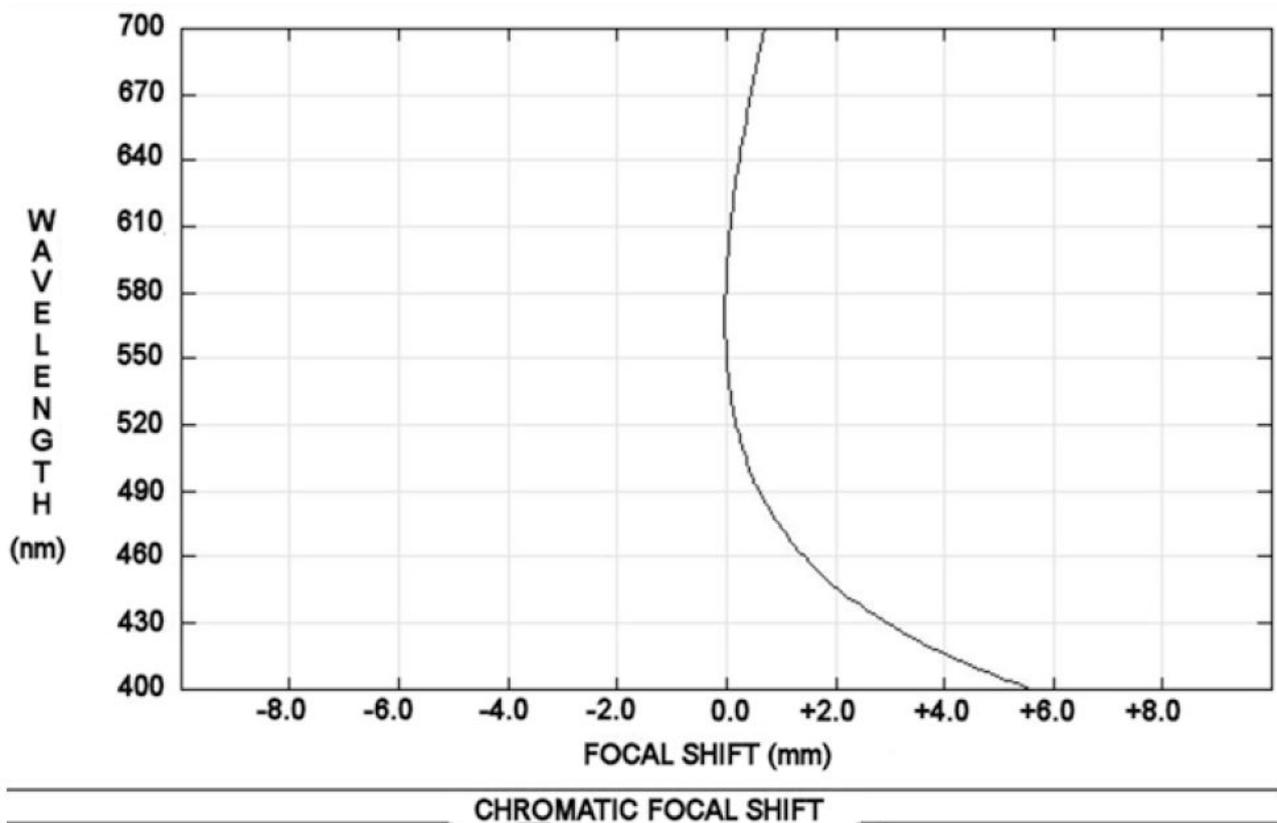
Il newton sarebbe in linea di principio lo strumento ideale come ottica per alimentare uno SHG digitale, non fosse altro per la sua totale acromaticità. Tuttavia, la configurazione "piegata" del fascio ottico, nonché la vicinanza del punto di fuoco al tubo tendono a complicare in modo notevole il progetto dello strumento, rendendo, tra l'altro, necessario un elemento estrattore di fuoco (una telecentrica) per portarlo sulla fenditura. L'astrofilo francese Phil Rousselle, del quale parlerò più avanti, 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. Di tale strumento, comunque interessante, parlerò in seguito.

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: basso costo; possibilità di impiegare un vasto range di focali e di diametri; inoltre, se ben realizzati il cromatismo sarebbe in ogni caso bypassato dal fatto che essi lavorerebbero 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, il che vuol dire che se, ad esempio, ho messo a fuoco l'SHG sulla riga H α e voglio andare sulla riga CaII K dovrò rifoceggiare 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 precede è indicato il focal shift di un obiettivo acro 90/850. (fonte Edmund Optics). Come si può osservare, lo shift che è contenuto sino a 5200Å, da quella lunghezza d'onda diventa sempre più consistente, sino a superare i 6 mm al di sotto dei 4000Å.

b- I 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: tripletti spazati in aria, tripletti spazati in olio, doppietti alla fluorite, doppietti ED.

Tra questi, i rifrattori con tripletti spazati in olio sono a mio avviso da evitare per l'uso continuo sul sole, essendo incerto, ma tuttavia non escludibile un effetto di alterazione nello strato di olio tra le lenti per effetto della radiazione UV, e ciò a parte il costo molto elevato, dato che erano, e vengono in genere prodotti da marche prestigiose come Zeiss, Astrophysics, TEC, Takahashi.

Per i tripletti spazati in aria ed i doppietti alla fluorite il discorso più importante è il prezzo, dato che anche questi presentano costi di acquisto elevati.

In definitiva, a mio avviso la scelta di doppietti con lenti ED a bassa dispersione tipo FPL 53 si presenta la migliore e quella con più elevato rapporto qualità/prezzo.

I vincoli del Telescopio:

-Esso deve dare un'immagine solare di diametro possibilmente inferiore a quella della fenditura, come si vedrà in seguito, pari mediamente a circa 1/100 della lunghezza focale.

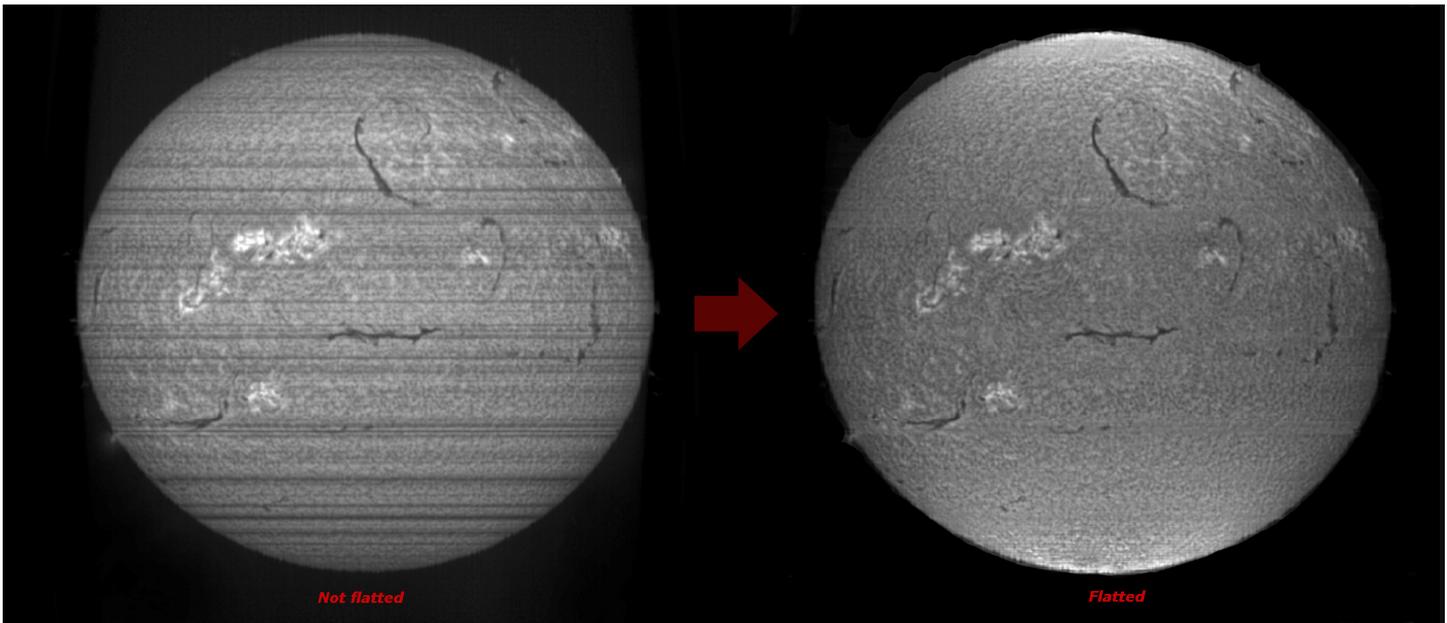
-Deve avere un potere risolutivo sufficiente a mostrare le piccole strutture solari in luce H α e Ca II K. Un potere risolutivo strumentale tra 1 e 2 arcsec è sufficiente, anche tenendo conto che esso è limitato dal seeing diurno che difficilmente permette di superare i 2 arcsec. Un buon diametro strumentale 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.

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

La fenditura

Potrebbe meravigliare il fatto che ho ritenuto di considerare a parte un componente come la fenditura che normalmente si ritiene far parte integrante dello spettroscopio. La risposta è semplice; tale componente che costituisce, nelle sue versioni riflettenti, a lamina multipla 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 si sa, 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 la fenditura 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 α raw ottenuta con uno dei miei SHG con una fenditura dai bordi molto chiusi, ma non lavorati a tolleranze ottiche ($1/4 \lambda$), e la stessa immagine dopo aver eseguito una flat sintetica.



Come si vede, le righe orizzontali (trasversalium) 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, coinvolgendo processi sofisticati e complessi, verrebbe a costare più dello stesso spettroscopio, quindi è giocoforza ricorrere a sistemi diversi che possono così sintetizzarsi:

1- Procedere all'acquisto di fenditure professionali di surplus su alcuni negozi online (prezzi oscillanti tra i 50 ed i 500 € a seconda del livello qualitativo).

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://www.bmisurplus.com/products/category/filters-iris-diaphragms-slits-apertures>

Nelle immagini che seguono una fenditura professionale regolabile con micrometro da me acquistata per 100 € dal predetto rivenditore: la fenditura è stata poi da me perfezionata smontando e rifinando i bordi della lame ed aggiungendo un supporto maschio da 31,8 mm. Il sistema meccanico micrometrico di chiusura agisce in modo uniforme, in modo da non spostare il parallelismo delle lame a chiusure molto strette.



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 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>



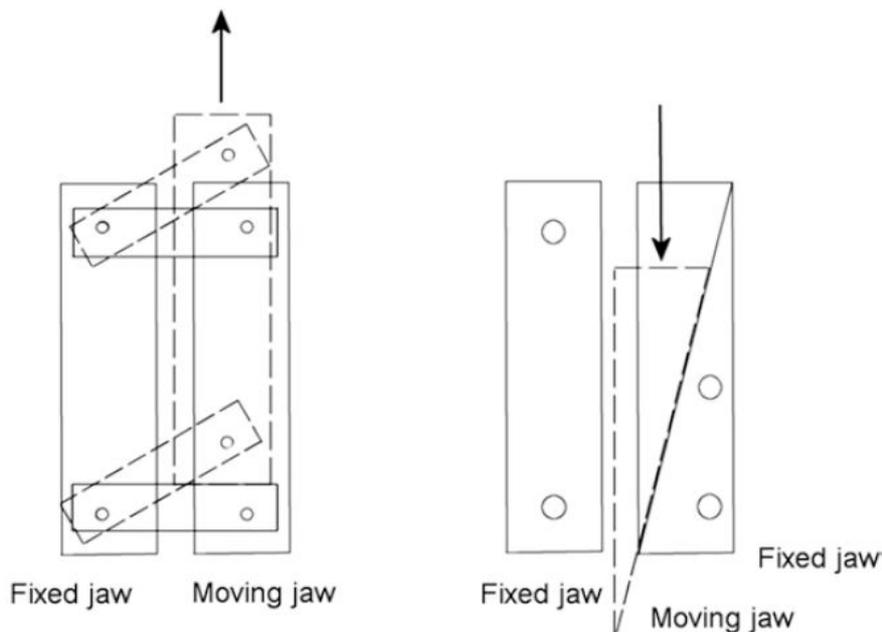
2-migliorare la qualità meccanica delle fenditure di surplus

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

- smonto le lamine in ottone dalla montatura;
- le esamino al microscopio a circa 500 x per osservare il livello di precisione (o imprecisione) delle stesse;
- 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 , molto più facilmente reperibile dell'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.

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

3- 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. Tuttavia, ove si voglia effettuare tale esperienza, uno dei progetti più semplici di chiusura delle lame è quello illustrato nell'immagine che segue.



Un'altra questione è se usare fenditure fisse o regolabili; 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 dianzi 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; 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 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 anche a chiusure molto strette: queste sono disponibili sino ad un minimo di 5 micron di apertura.

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. 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 solare 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 31.5' a gennaio e 32.5' a luglio. Il diametro del disco proiettato sulla fenditura sarà quindi pari a:

$$D = FL \times 0.00948 \text{ in gennaio}$$

$$D = FL \times 0.00917 \text{ in luglio}$$

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, un diametro ottimale per una fenditura da 10 mm di lunghezza. Per una focale di 500 mm sarebbe in media di 4.7 mm e basterebbe invece una lunghezza della fenditura di 5 mm.

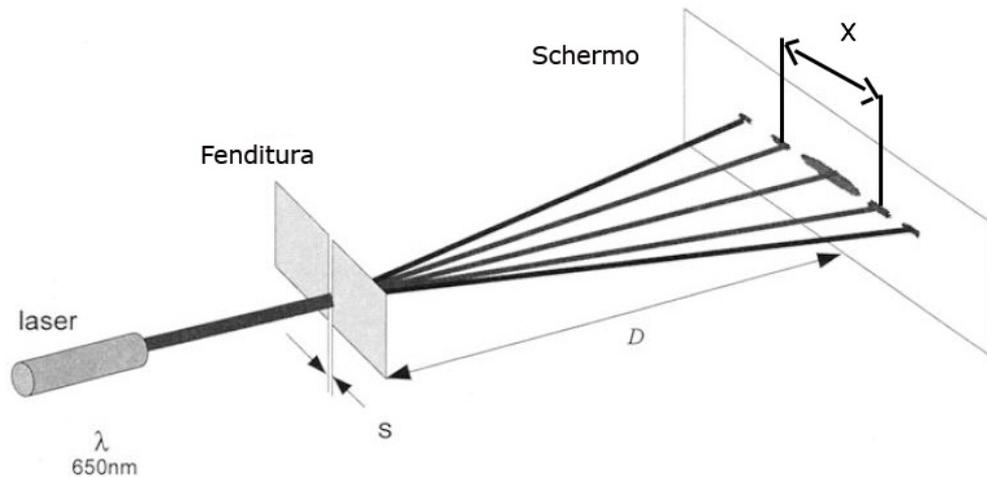
Quanto all'apertura della fenditura, sulla base di quanto detto in precedenza, una focale di 1000 mm fornirebbe una scala immagine di $(1920/9.325)$, 205 arcsec x mm, ovvero 0.2 arcsec x μm , il che vuol dire che un'apertura della fenditura di 10 micron fornirebbe una risoluzione spaziale di 2", sufficiente 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 412 arcsec/mm, 0.412 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 si accoppierebbe abbastanza bene con una camera con pixel ad 4.4- 4.65 μm come le DMK 41 e 51, ma anche con camere con la ZWO ASI 174. 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.

La misurazione dell'apertura della fenditura

Nelle fenditure commerciali 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 S in micron è:

$$S = \lambda \times 3 \times D / 10000 \times X$$

Dove:

- λ è la lunghezza d'onda del laser in \AA (6500 quelli rossi e 5320 quelli verdi);
- D è la distanza in mm dello schermo dalla fenditura
- X è la distanza in mm tra i centri delle due immagini di primo ordine della figura di diffrazione.

Es. con $D = 400\text{ mm}$; $\lambda = 6500$; $X = 40\text{ mm}$, si ha:

$$S = 6500 \times 3 \times 400 / 10000 \times 40 = 19.5\ \mu$$

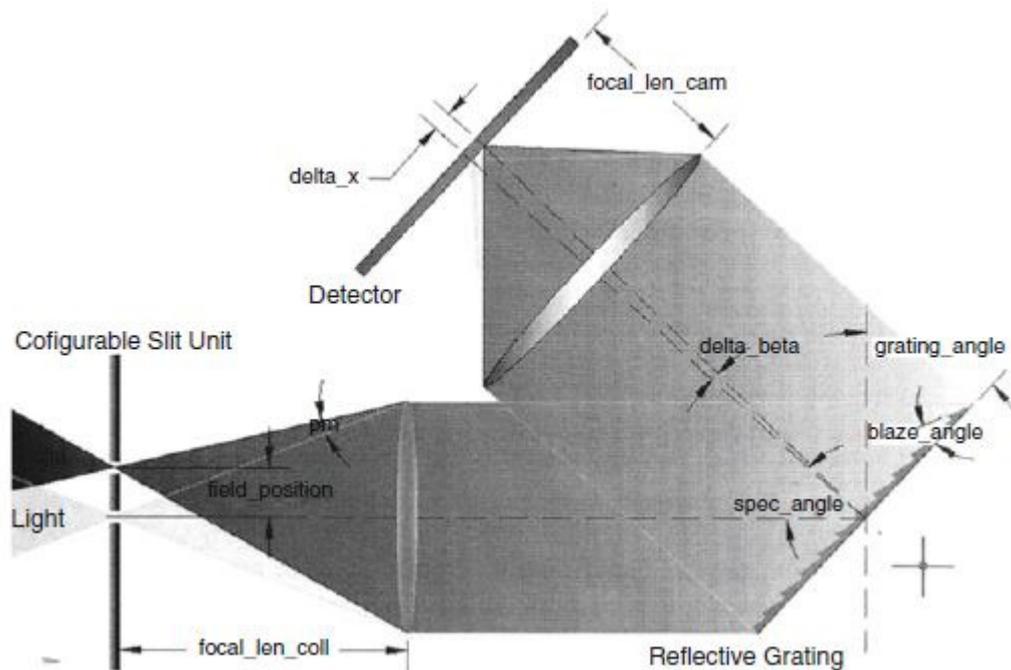
Configurazioni di spettroscopi per spettroeliografia

Richiamerò , qui di seguito, le principali configurazioni di spettroscopi per spettroeliografi più diffuse tra i costruttori.

1- Lo spettroscopio classico

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,

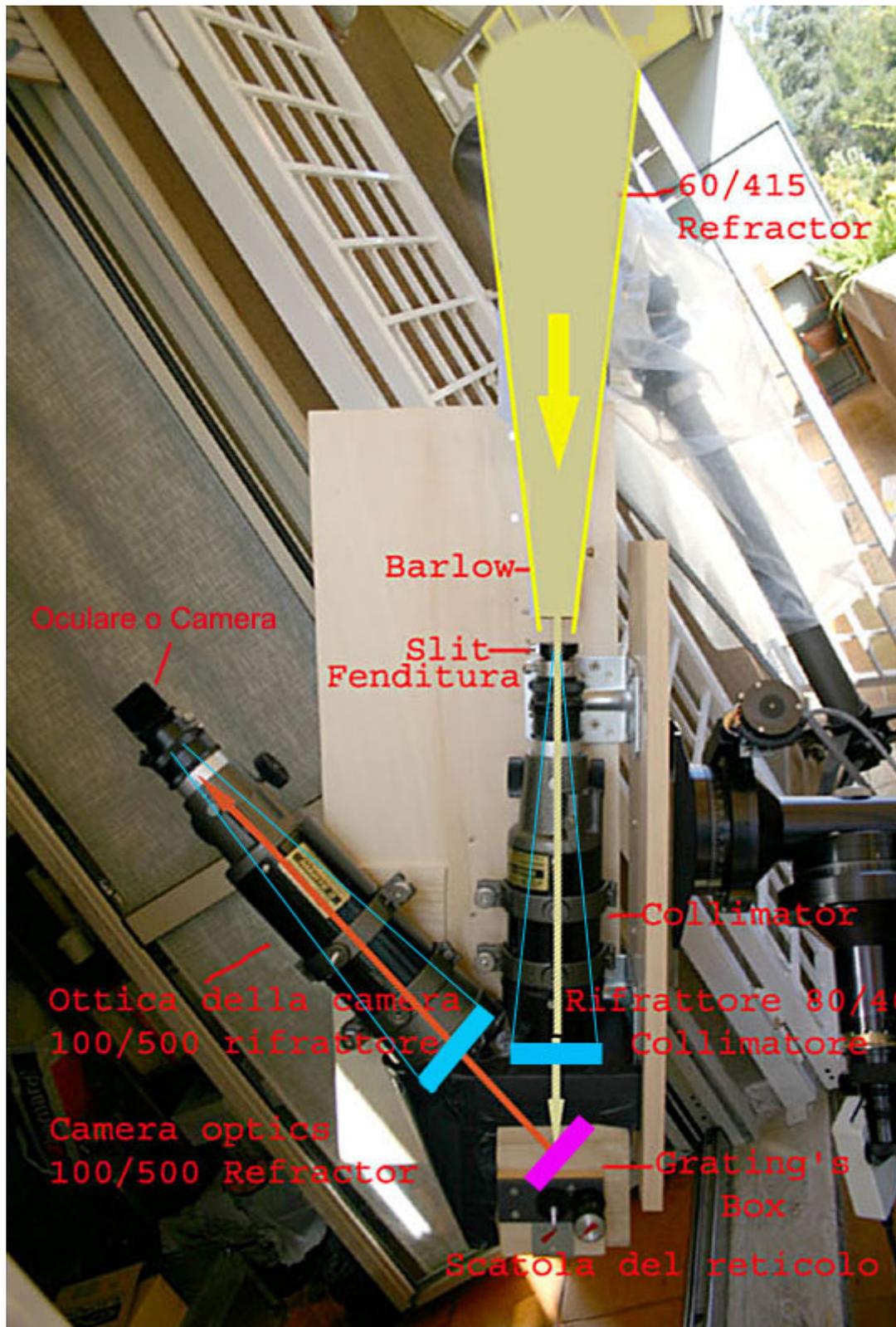
per ingrandirlo ed inviarlo alla camera di ripresa. Il rapporto focale del collimatore dovrebbe essere pari o molto simile a quello del telescopio che invia l'immagine solare sulla fenditura.



Un esempio di layout di un semplice spettroscopio classico a rifrazione (fonte "Spectroscopic Instrumentation" di Eversberg e Vollman).

Le configurazioni a specchio, per quanto usate in spettroeliografia, danno luogo, come vedremo, a strumenti pesanti ed ingombranti, nonché di difficile assemblaggio e manutenzione. Gli specchi, infatti, per lavorare al meglio richiedono celle collimabili ed un'attenta collimazione con gli altri componenti ottici, avendo, per contro, il pregio della totale acromaticità. Per quanto mi riguarda, ho sempre preferito l'uso di obiettivi a rifrazione per la grande facilità d'uso e la conseguente semplicità del progetto dello spettroeliografo.

La configurazione a specchio che più si avvicina a quella dello spettroscopio classico a rifrazione di cui alla figura che precede è la Ebert-Fastie, della quale parleremo tra poco.



Un esempio di spettroeliografo autocostruito dall'autore utilizzando rifrattori acromatici a corta focale ed uno spettroscopio in versione "classica".L'ingombro ed il peso eccessivo di questa soluzione mi indussero a trovarne altre meno impegnative.



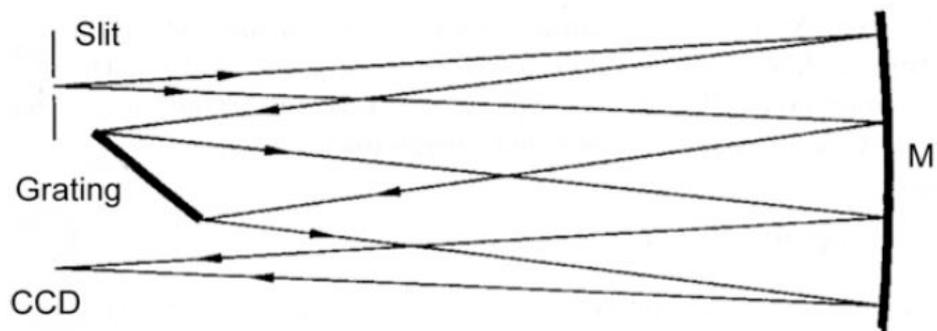
Nell'immagine soprastante uno spettroscopio in versione classica che compone il modello di spettroeliografo usato dal francese Daniel Deforneau, cui va ascritto il merito, insieme a Rondi, di aver introdotto il principio della spettroeliografia digitale all'inizio degli anni 2000, realizzando anche un apposito programma informatico per l'estrazione delle immagini solari dallo spettro.

La configurazione in discorso, che usa generalmente ottiche a rifrazione per ovvi problemi di costruzione meccanica ed ingombro, prevede che il diametro e la focale del collimatore siano adeguati alla focale del telescopio ed alle dimensioni del reticolo; quindi il collimatore dovrà:

- Avere all'incirca lo stesso rapporto F/D del telescopio (tale vincolo è meno cogente che negli spettroscopi stellari)
- Avere un diametro pari alla diagonale del reticolo stesso, per coprire col suo fascio ottico tutto il reticolo.

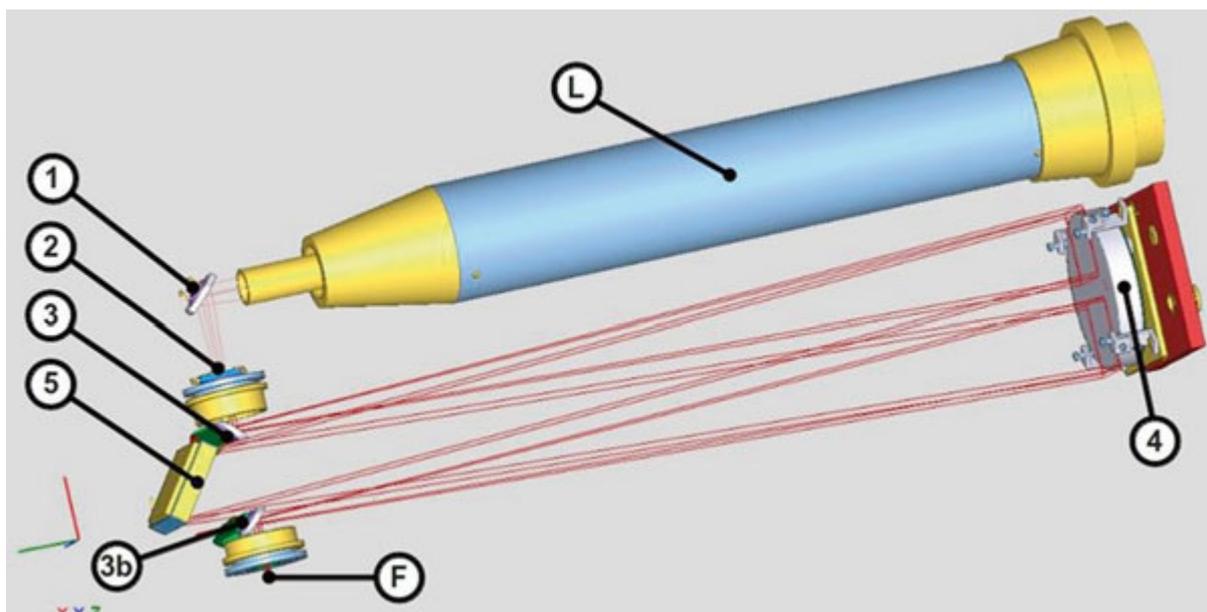
Facciamo un esempio: ammettiamo di voler usare un telescopio con F/D 8, ed un reticolo da 50 mm di lato: il rapporto F/D del collimatore sarà anche 8, mentre il suo diametro di $50 \times 1.4 = 70$ mm. Ci servirà quindi un'ottica acromatica da 70 mm F 8, focale 560 mm.

Configurazione Ebert-Fastie



Si tratta di una configurazione ottica abbastanza diffusa in spettroeliografia, come quella dianzi citata di F. Veio: uno specchio sferico di sufficienti dimensioni e focale elevata (ad alto rapporto F/D per controllare il coma) viene usato per intercettare il fascio ottico proveniente dalla fenditura, inviarlo al reticolo, e restituirlo poi diffratto alla camera; si tratta quindi di un sistema auto collimante. Sussiste un coma residuo e le righe spettrali si presentano curve (smile). Le dimensioni dello specchio devono essere all'incirca 3 volte quelle del reticolo (in diagonale) ed il rapporto F/D dello specchio deve essere almeno 2 volte più veloce di quello del telescopio: se quest'ultimo è, ad es., un $F10$, sarà necessario uno specchio a $F5$. Resta comunque utile, in caso di rapporti F/D inferiori ad 8, di valutare l'uso di specchi parabolici.

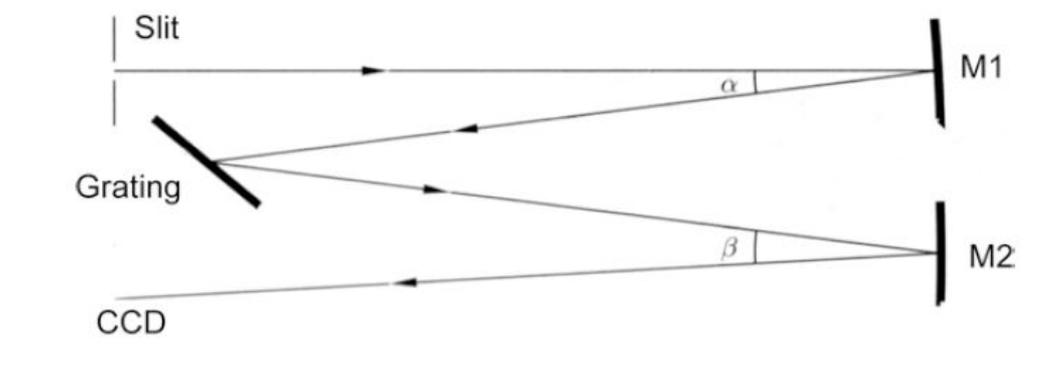
Tale configurazione è stata quella usata dal francese André Rondi nel suo spettroeliografo



L: rifrattore acro 120/1000; 1: specchio deviatore; 2: fenditura; 3-3B: specchi deviatori; 4: specchio parabolico da 155 mm e 954 mm di focale; 5: reticolo da 1800 l/mm. (Rondi)

Il progetto di Rondi, pur dimostrandosi eccellente sul piano pratico, è di notevole complessità ottico-meccanica, a mio avviso essenzialmente per i quattro specchi, il principale ed i tre deviatori che vanno tra loro collimati per garantire la buona qualità degli spettri e dell'immagine finale. Si tratta quindi di un progetto sofisticato, adatto a coloro che posseggono notevoli capacità e possibilità di intervento nel campo della meccanica di precisione.

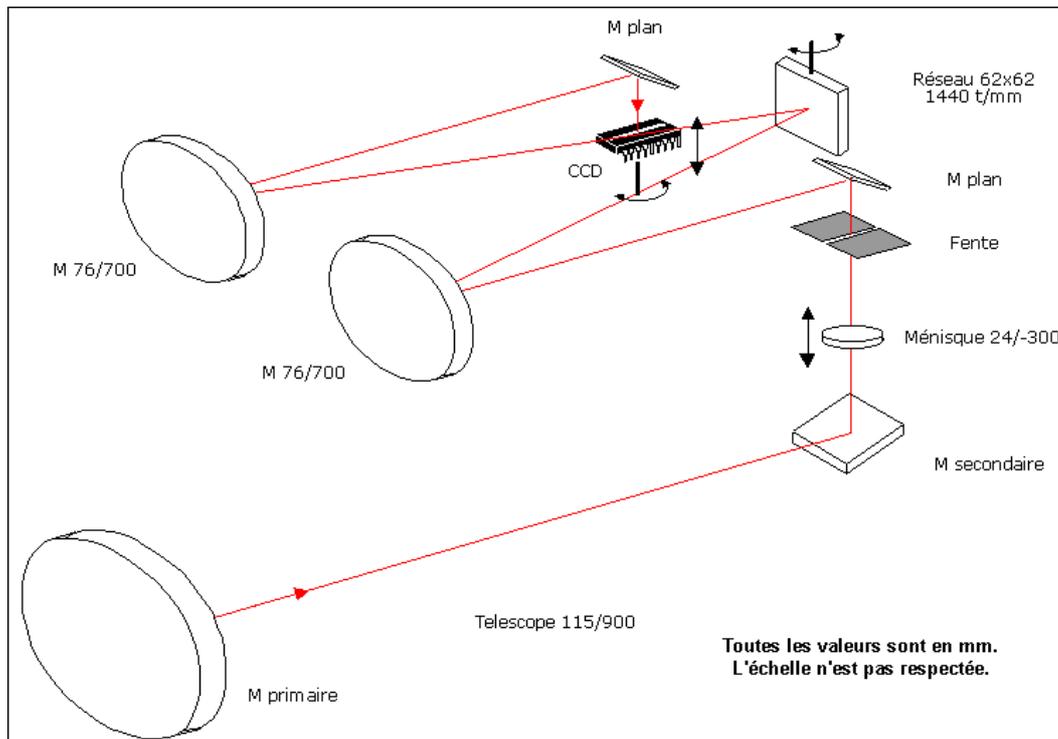
Configurazione Czerny-Turner



Questa è una configurazione ottica concettualmente simile alla precedente, dalla quale si discosta per l'uso di due specchi, uno come collimatore, ed uno come ottica di imaging, allo scopo di ridurre le aberrazioni come astigmatismo e coma. Lo specchio usato come collimatore (M1) deve rispondere ai seguenti requisiti:

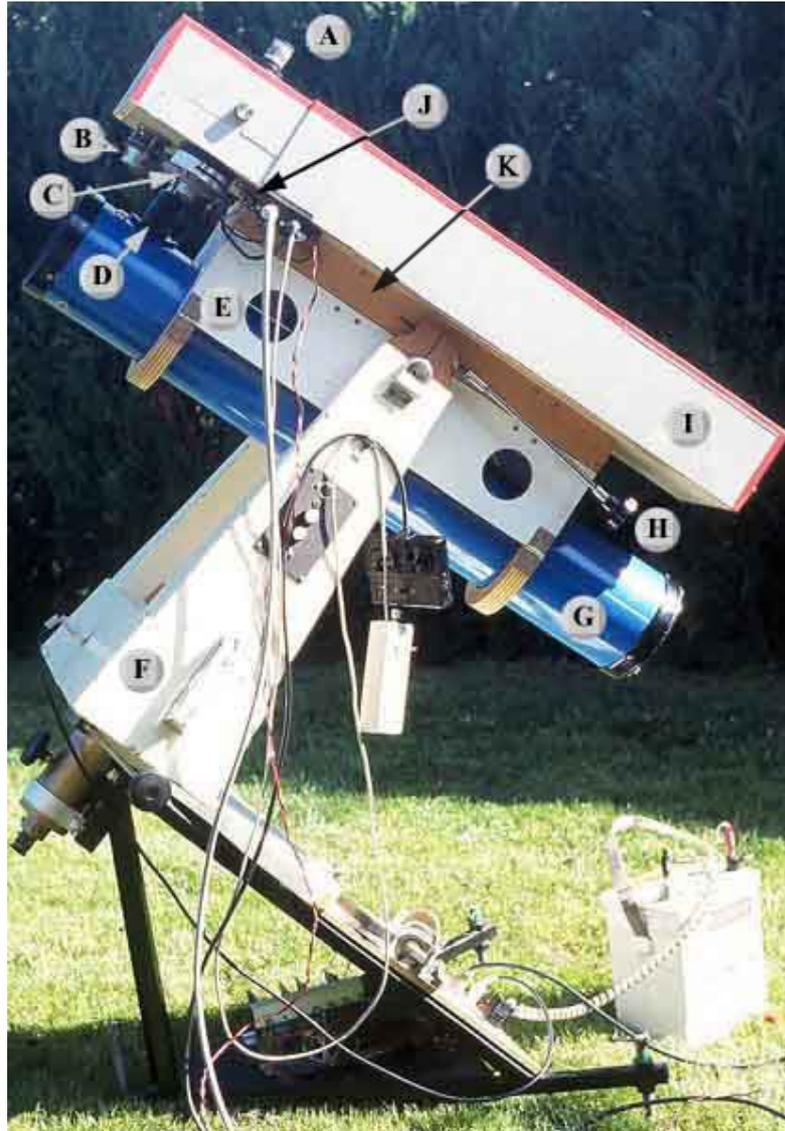
- Essere di dimensioni maggiori del reticolo e pari o maggiori dello specchio di Imaging M2
- Avere un rapporto F/D simile a quello del telescopio
- Lo specchio di imaging, per contro, deve avere un diametro tale da intercettare il fascio ottico diffratto del reticolo, e quindi uguale o superiore alla diagonale di questo.

A tale tipo di configurazione appartiene lo spettroscopio dello spettroeliografo realizzato dal noto costruttore francese Phil Rousselle, che ha tra l'altro utilizzato come telescopio un riflettore Newton commerciale 114/900: nell'immagine che segue il layout dello strumento.



Si tratta di uno strumento "tutto specchi" di una certa complessità costruttiva, che tuttavia ha fornito buoni risultati, anche se è stato successivamente sostituito da un sistema a lenti

Nella figura si osserva la complessità della struttura e la montatura a forcella auto costruita anch'essa dall'autore.

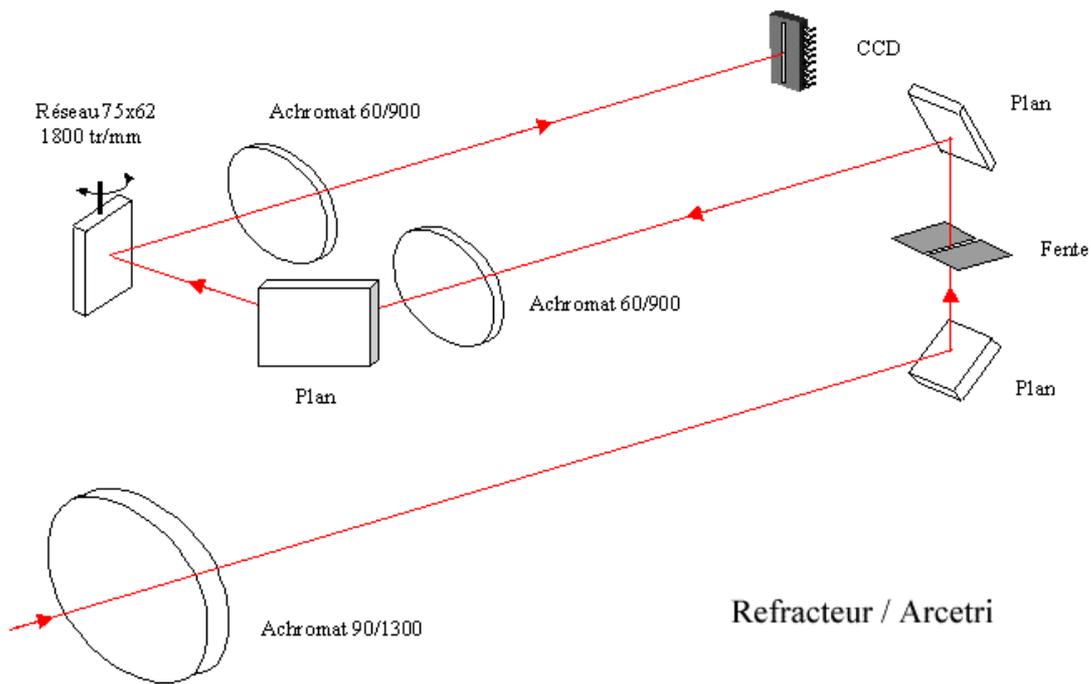


Configurazione "Arcetri"

Per certi versi concettualmente simile alla precedente è la configurazione "Arcetri", usata da Phil Roussele nella sua ultima realizzazione, la grande differenza è che stavolta si tratta di uno strumento di sole lenti.

Si tratta anche qui di una costruzione di una certa complessità ottico-meccanica, che ha richiesto all'autore notevoli sacrifici per la costruzione e messa a punto, sacrifici poi premiati dall'ottima qualità delle immagini ottenute.

Il layout dello strumento.



Nell'immagine seguente lo strumento come appare in condizioni operative sulla sua montatura a forcella, anch'essa auto costruita dall'autore.



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 configurazioni in precedenza illustrate, 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.

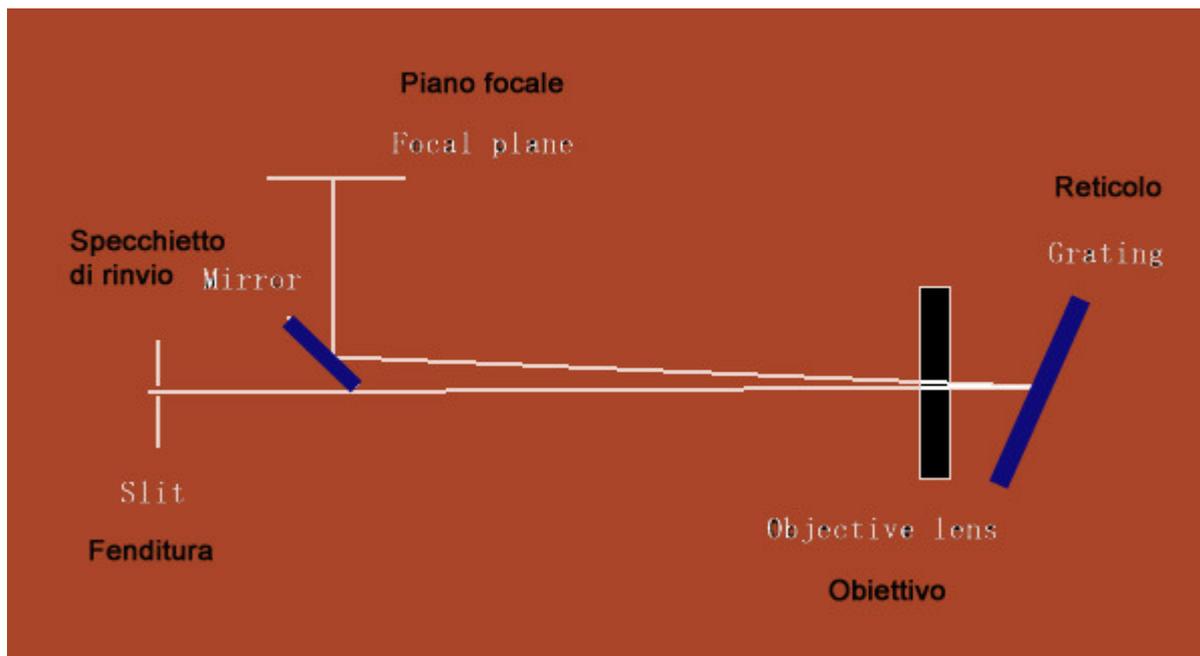
Nella convinzione, quindi che quello che non c'è non crea problemi, la mia configurazione ideale avrebbe dovuto avere il minimo possibile di componenti ottici: tale ultimo requisito è posseduto da una soltanto delle configurazioni spettroscopiche, quella Littrow.

Tale progetto fu ideato e sviluppato 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.

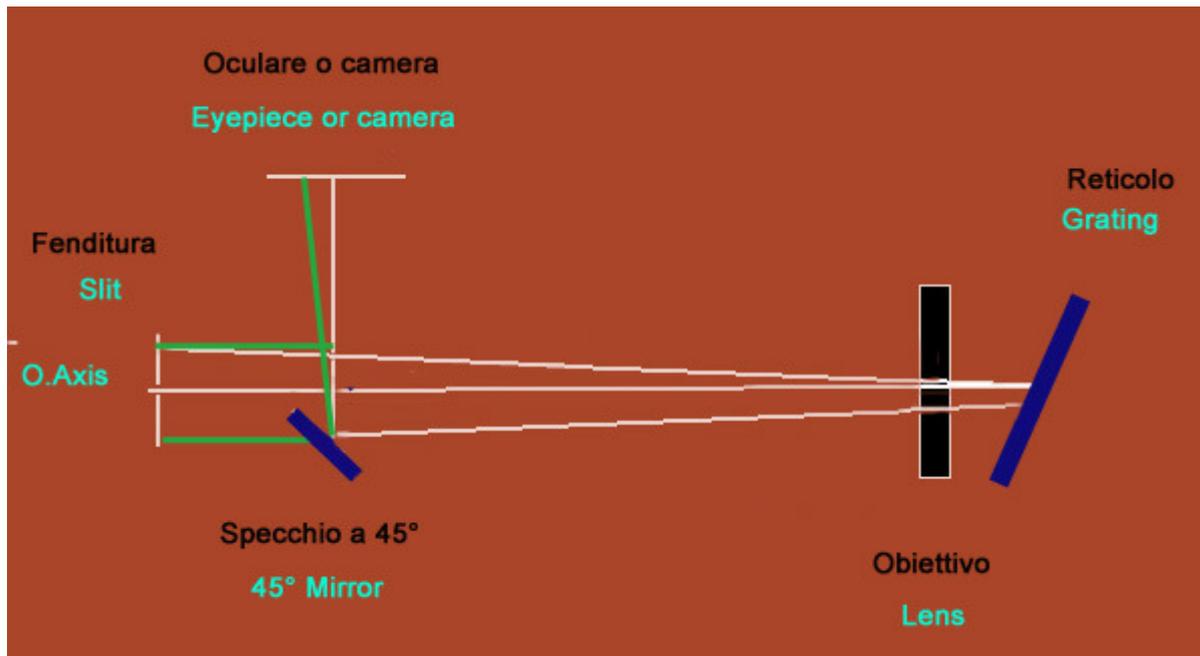
Tale configurazione, minimizzando la deviazione angolare, ha due enormi vantaggi:

- 1- Alta dispersione e risoluzione;
- 2- Estrema compattezza strumentale (compatibilmente con la focale usata).

Tra gli svantaggi, sussiste quello della luce diffusa derivante dalla doppia riflessione sulle superfici ottiche e da una leggera curvatura dello spettro (smile).



Layout Littrow "Classico" con obiettivo a lenti, con specchietto di rinvio a 45° in prossimità della camera



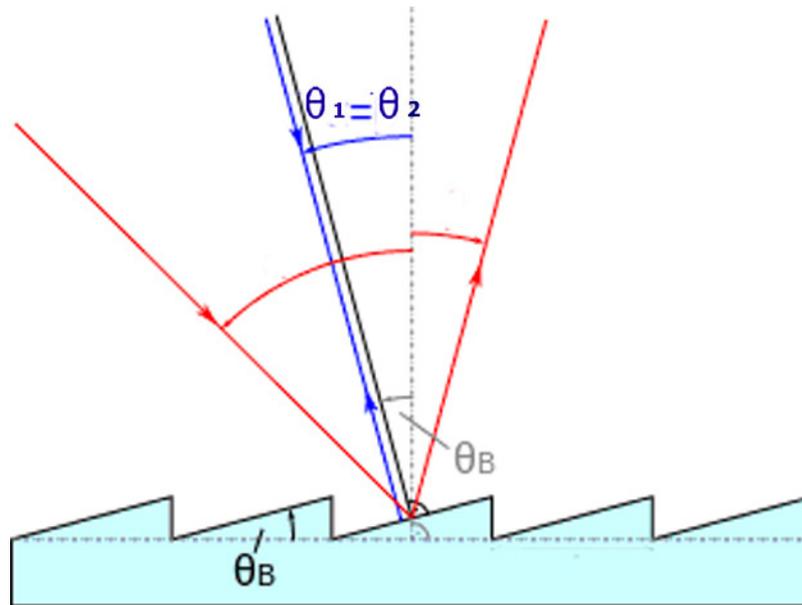
Layout della configurazione Littrow adottata con VHIRSS, con specchio di rinvio lontano dalla camera, alla base del box.

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, ipotizzando una configurazione Littrow, 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, nel 1° ordine:

$$\theta_b = \arcsin (1 \times 6000 \times 10^{-7} \times r / 2) = \arcsin [(5000 \times 1200) / (10000000 \times 2)] = \text{Arcsin } 0.3 = 17.5^\circ$$

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 \AA per gradi, definita dalla relazione:

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

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

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

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.

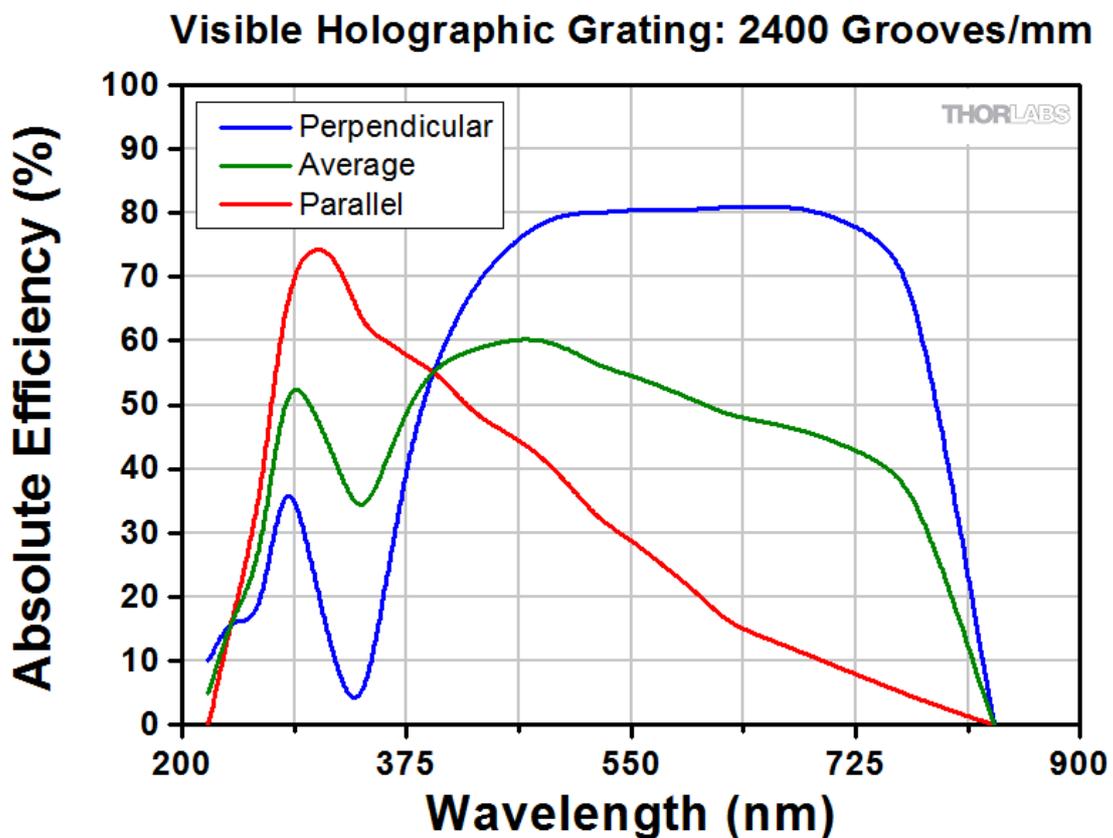
Il potere risolutivo spettrale dipende dai seguenti fattori:

- 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 queste)
- Le dimensioni della fenditura (aumenta col diminuire di queste)
- Le dimensioni dei pixel della camera (aumenta col loro diminuire).

Circa i primi due punti, occorrerà scegliere il reticolo a riflessione col massimo numero possibile di righe per mm, 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 a 1800 l/mm (il massimo possibile) dal costo di circa 175 nel formato 50X50 (Thorlabs); per essi si consiglia un angolo di blaze per 500 nm. I reticoli olografici non blazed da 50 x 50 mm di lato da 2400 l/mm in catalogo ai principali venditori ,Edmund

Optics e Thorlabs a prezzi abbastanza accessibili (ca 285-299 €). Esistono anche reticoli olografici blazed ma si fermano a 1200l/mm (Edmund).

Mentre i reticoli ruled blazed offrono un'efficienza molto elevata alla lunghezza d'onda di blaze soffrono spesso di problemi come immagini fantasma e luce diffusa, mentre i reticoli olografici non blazed non hanno tali inconvenienti. Nella figura un grafico dell'efficienza dei reticoli olografici da 2400 l/mm (fonte Thorlabs). C'è inoltre da dire che al numero di righe più elevato 1800/2400 i reticoli olografici hanno un'efficienza quasi pari a quella dei reticoli ruled.



Sarà poi necessario scegliere le dimensioni della fenditura, 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 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- 4,65 μm .

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

Diametro e focale dell'ottica dello spettroscopio

Nell'ipotesi di voler usare un telescopio a F 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 facilmente sul mercato dell'usato a prezzi intorno ai 300 €. 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 sul mercato dell'usato: 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 30 micron ed una camera con pixel da 4.65 μm (tipo Imaging Source DMK 41). 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 :

$$A = [\cos 0 / (2400 \times 10^{-7} \times 1)] \times \pi / 180 = (1 \times 100000 / 24) \times 3.14 / 180 =$$

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

2- La dispersione lineare:

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

$$DL = \cos \theta / (r \times m \times F_{\text{cam}}) \quad (5) ; \text{ dove } F_{\text{cam}} \text{ è la focale dell'ottica}$$

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 4.65:

$$DL = 0.0069 \times 4,65 = 0.032 \text{ \AA} / \text{pixel}$$

3 - Il potere risolutivo a 5000 e 6563 \AA

La relazione del potere risolutivo è:

$$R = \lambda / d\lambda = m \times n \quad (6)$$

Essendo:

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

dove dLf è l'ampiezza della fenditura proiettata sul piano del sensore

Per un apertura della fenditura da 30 micron

$$d \lambda = 0.030 \times 6.94 = 0.21$$

$$R = \lambda / 0.21 = 5000 / 0.21 = 23809$$

e, a 6563 \AA (riga H alpha):

$$R = 6563 / 0.21 = 31252$$

Per un apertura della fenditura da 15 micron

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

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

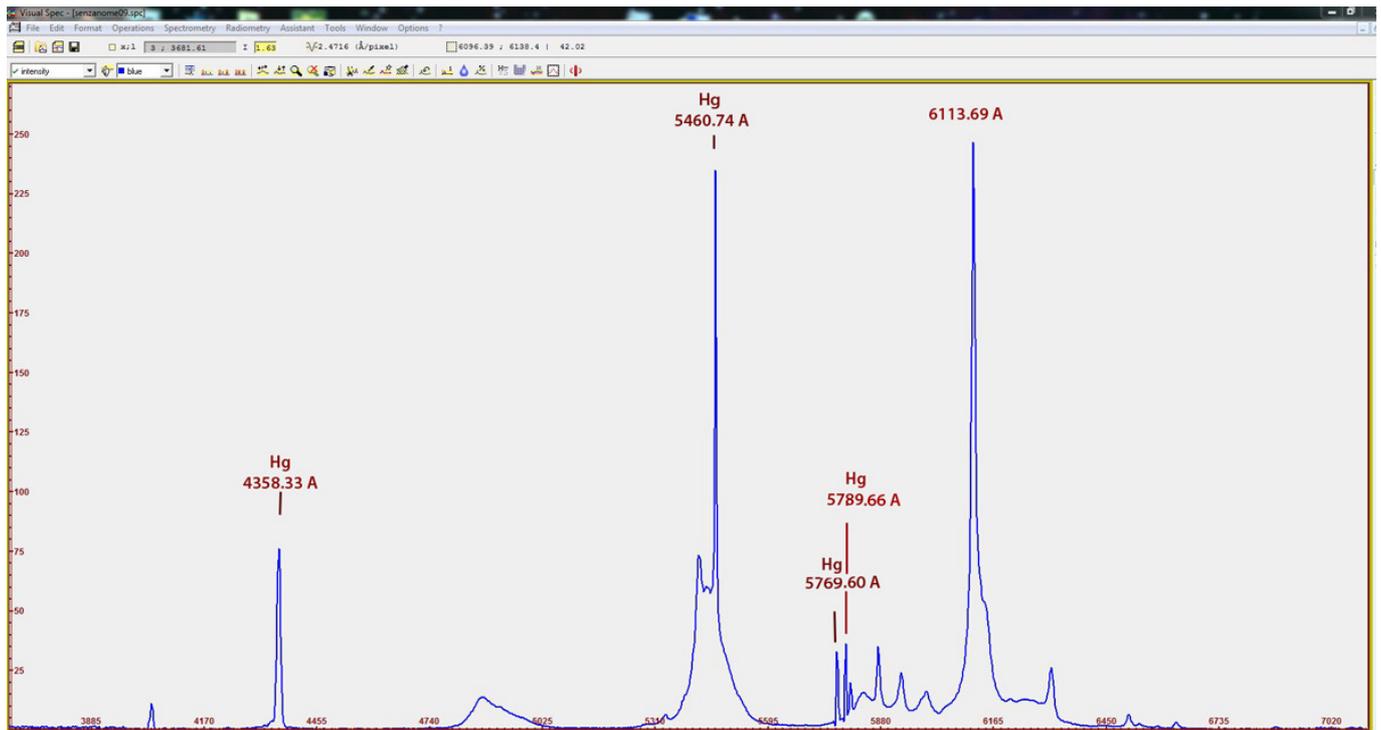
e, a 6563 \AA (riga H alpha):

$$R = 6563 / 0.10 = 65630$$

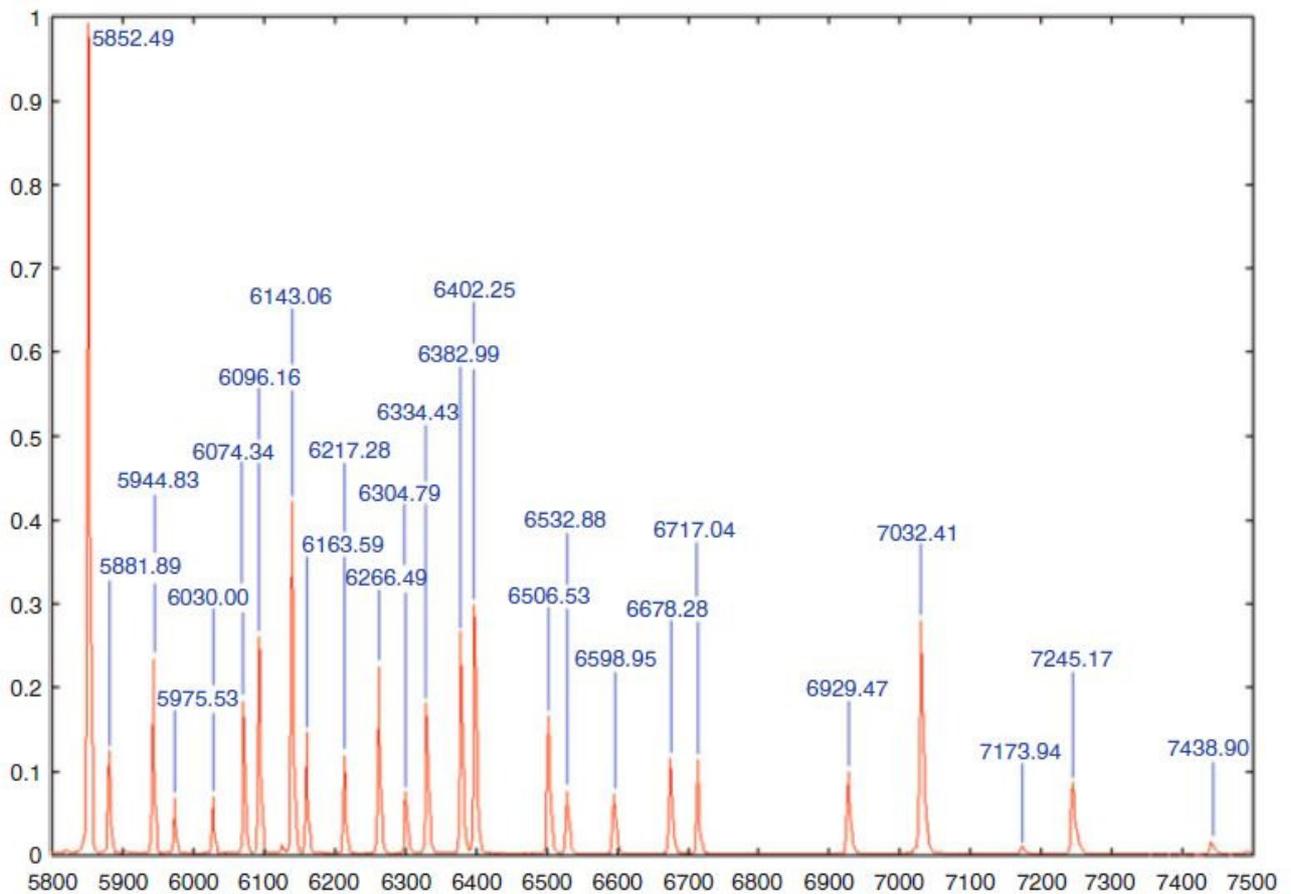
I valori teorici di dispersione lineare e risoluzione calcolati in precedenza si accordano in linea di massima con quelli da me ottenuti sul campo con gli spettroeliografi VHIRSS e Solarscan (aventi entrambi reticoli da 2400 l/mm). C'è da dire solo che i valori effettivi sul campo della dispersione lineare e della risoluzione sono lievemente migliori di quelli teorici, attestandosi mediamente sui 0.022 Å/pixel con pixel da 4.65 µm (valori da 0.019 a 0.025) e 35-43000 circa come risoluzione R. Una possibile spiegazione è data, per VHIRSS, dal dislocamento della fenditura chiusa a 30 micron rispetto all'asse ottico, mentre, per Solarscan può influire la chiusura della fenditura a valori minori (20-15 micron).

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. Se si vuole misurare il PR effettivo dello strumento, si può farlo indoor, puntandolo (con la fenditura chiusa alla posizione di lavoro) 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. Alcuni autori suggeriscono anche di farlo sul campo, affiancando all'immagine della riga solare in assorbimento quella delle righe di emissione di una lampada al neon o a basso consumo posta avanti all'apertura del telescopio durante la ripresa. Tale soluzione, mentre fornirebbe un dato più sicuro del potere risolutivo generico dello strumento all'atto della ripresa a mio avviso non fornirebbe dati altrettanto sicuri sulla risoluzione effettiva dell'immagine spettroeliografica, fornita dalle righe di assorbimento. Nulla toglie, tuttavia, che le risoluzioni possono essere misurate in entrambi i modi, cogliendone le eventuali differenze.

Qui di seguito lo spettro di una lampada a basso consumo ottenuto col mio spettroscopio stellare Spec 600 ed uno di una lampada al neon (fonte C.Buil).



. Lampada a basso consumo



Lampada al neon

Parametri del telescopio da usare per il Littrow

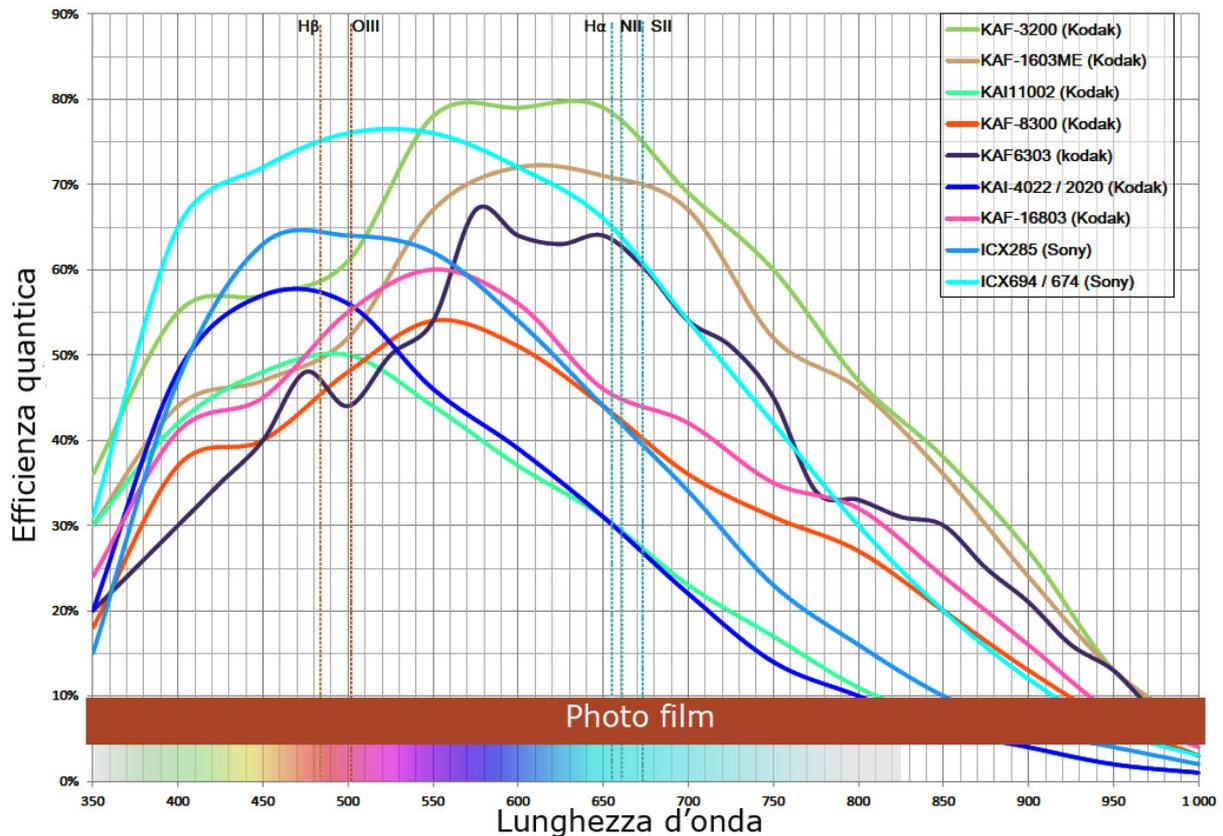
Ipotizziamo al riguardo di voler usare un telescopio a $f = 7.5-8$ che dia nel contempo un'immagine del disco solare sulla fenditura non superiore a 8 mm (meglio 7 mm), nel caso si vogliano usare fenditure a basso costo di SurplusShed opportunamente modificate come detto in precedenza. La focale dovrà 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 60 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, 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.

La camera CCD o CMOS

Il tipo di sensore

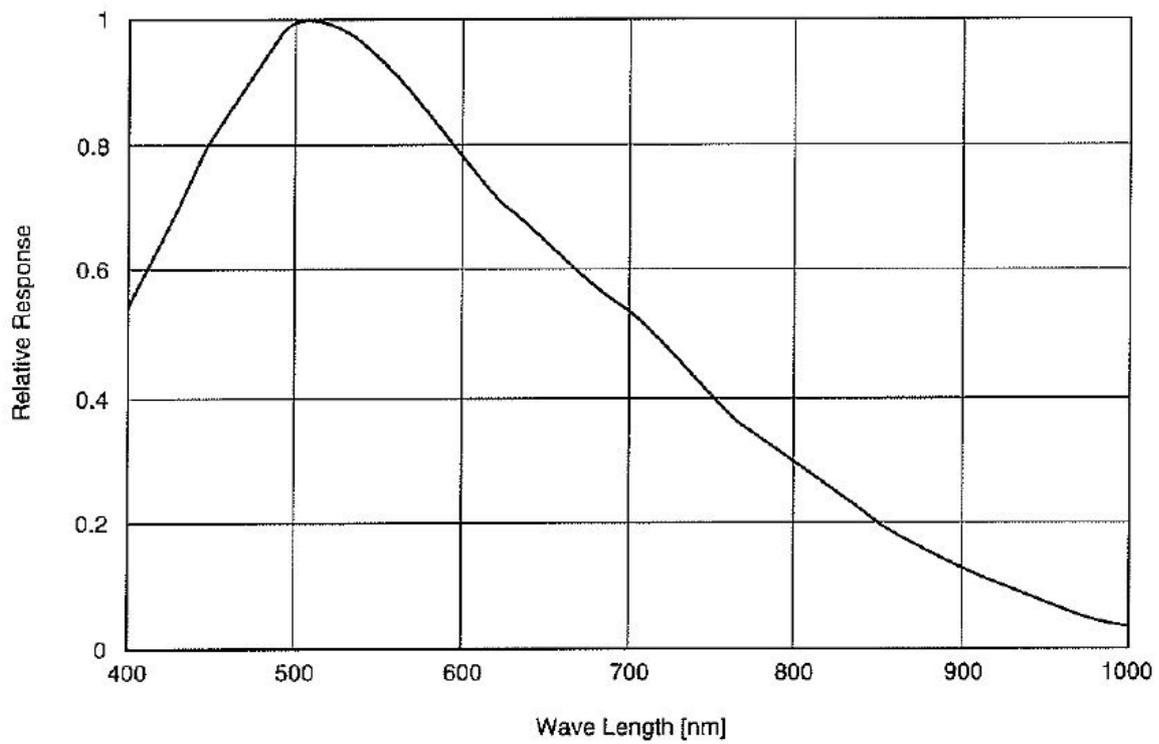
E' l'ultimo dei componenti per il nostro spettroeliografo digitale, ma forse il più importante. La chiave del successo della spettro eliografia digitale è stato proprio l'avvento e l'affermazione dei sensori CCD e CMOS, la cui efficienza quantica (E.Q.) ha superato enormemente quella delle vecchie lastre 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 riporta 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).

Nell'immagine sottostante è fatto il raffronto tra il range di E.Q. (risposta relativa) delle emulsioni fotografiche (4-10% circa) e quella dei moderni sensori CCD raffreddati per astronomia.

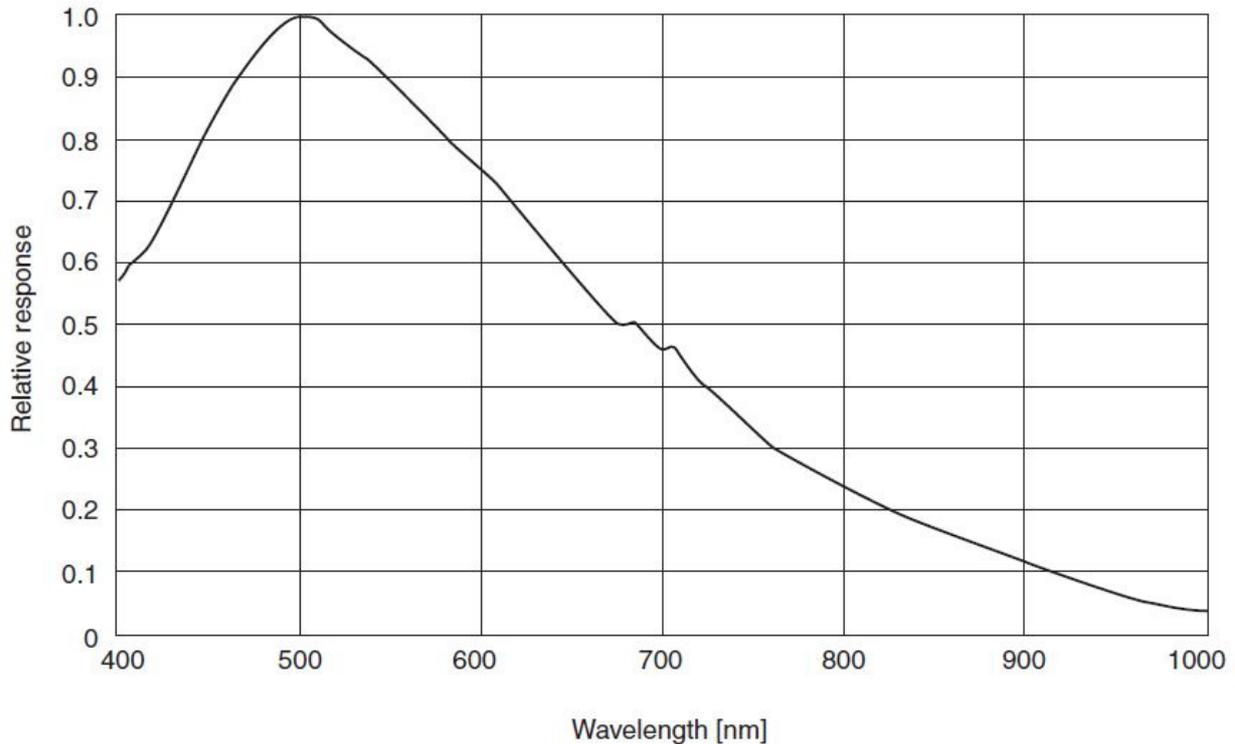


Qui tuttavia non si parla di camere CCD o CMOS che danno immagini singole, ma di videocamere, capaci quindi di registrare filmati, ovvero il filmato del passaggio del disco solare sulla fenditura, come vedremo. Queste vanno dalle semplici e poco costose webcam alle sofisticate e quindi costose camerine astronomiche come le Imaging Source DMK nelle varie versioni con sensore CCD (in particolare DMK 41 e 51) e le ZWO ASI con sensore CMOS (molto performante per i nostri scopi è la 174 mm).

Le due DMK, 41 e 51, hanno risposte quantiche relative molto simili, e la loro caratteristica è una elevata sensibilità nel vicino UV (ca il 50% a 3900 Å) il che le rende ideali nella spettroeliografia delle righe del Calcio ionizzato; la dinamica del sensore è a 8 bit, mentre quella della ZWO ASI 174 è a 12 bit.



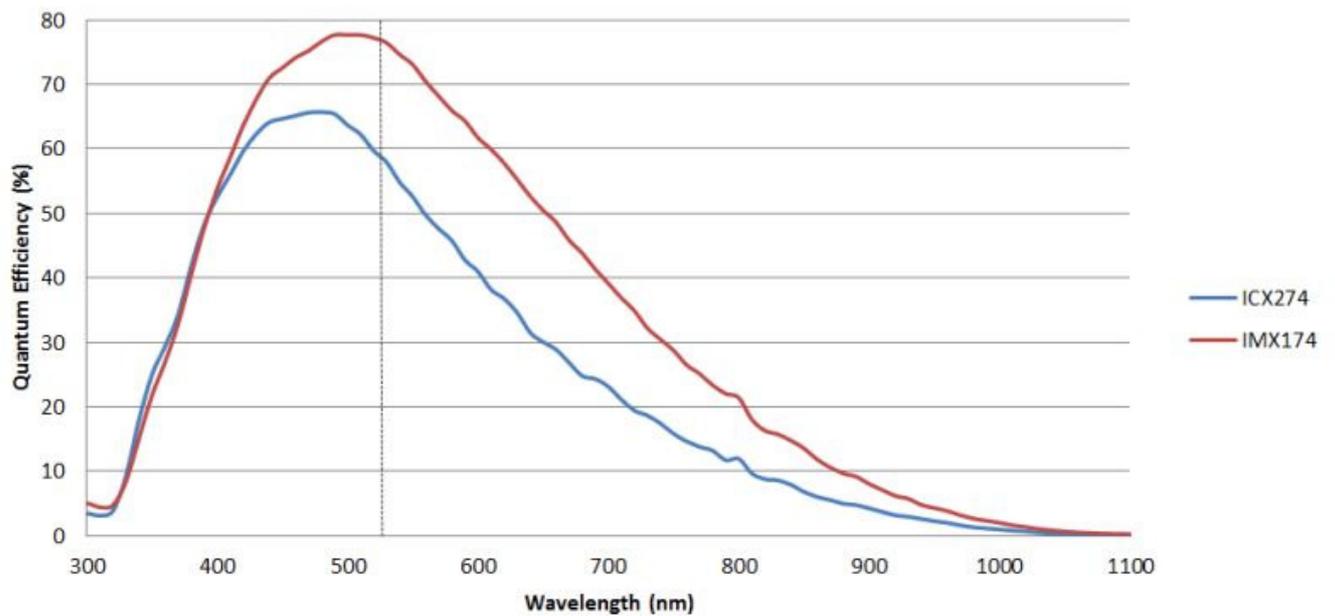
La risposta relativa del sensore CCD Sony ICX 205 AL della DMK 41 (fonte Sony)



La risposta relativa del sensore CCD Sony ICX 274 AL della DMK 51 (fonte Sony)

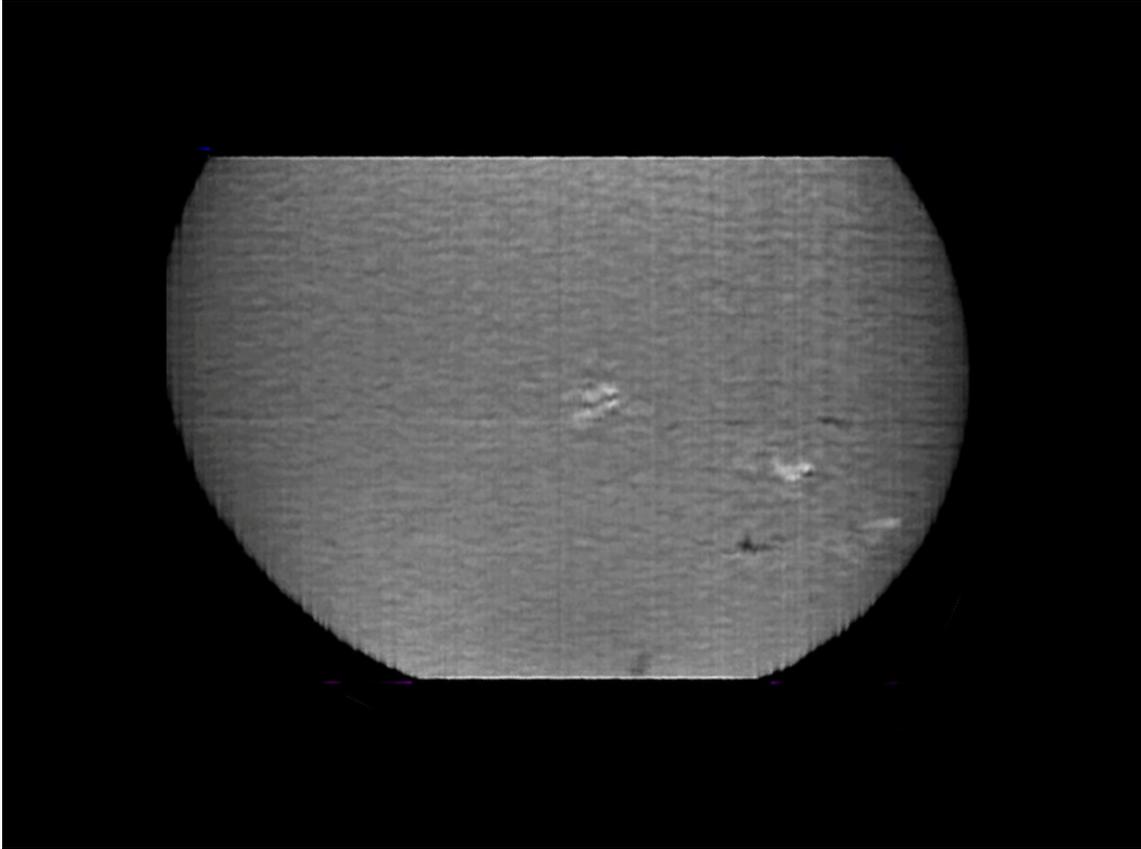
Come si vede l'EQ delle due camere soddisfa in pieno le esigenze della spettro eliografia digitale, essendo circa del 52-53% nella regione spettrale delle righe del Calcio e del 60% in quella della riga H α , con un picco ai 5000 Å, nella zona dell'Idrogeno Beta. Ovviamente la DMK 51 ha un sensore di dimensioni maggiore, che ci permette, a parità di altre condizioni, l'uso di un telescopio di focale maggiore rispetto alla DMK 41.

Un comportamento ancora più performante ha il sensore CMOS exmor IMX 174 LLJ della Sony (ZWO ASI 174), la cui EQ è nell'immagine che segue confrontata con quella dell'ICX 274 della DMK 51 (fonte FLIR -white paper series):



Le dimensioni del sensore

Le dimensioni fisiche del sensore hanno importanza in quanto saranno queste a determinare (ferma restando la 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 x 2.7 mm ed un telescopio di 500 mm 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 con una webcam Philips Toucam.



Se, invece useremo una DMK 51 con un sensore da 8.50 x 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 di imaging (o della camera). Nel caso invece di spettroscopi che usino entrambi gli elementi ottici, si potrà agire sulla focale di imaging per ridurre l'immagine del disco solare alle dimensioni del sensore della camera. Facciamo l'ipotesi di avere un telescopio di 500 mm che proietta un'immagine del sole di 4.7 mm, una webcam, uno spettroscopio classico con un collimatore da 200 mm di focale ed una lente di imaging anch'essa di 200 mm: immaginiamo ora di cambiare la focale della lente di imaging 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 $4.7 \times 0.5 = 2.35$ mm ed entrerà nel chip della webcam 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 μm (DMK 51).

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

Con pixel da 4.65 μm (DMK 41)

$$F = (0.00465 * 206265) / 2 = 480 \text{ mm}$$

Per pixel da 5.86 μm (ZWO ASI 174) sarebbe

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

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

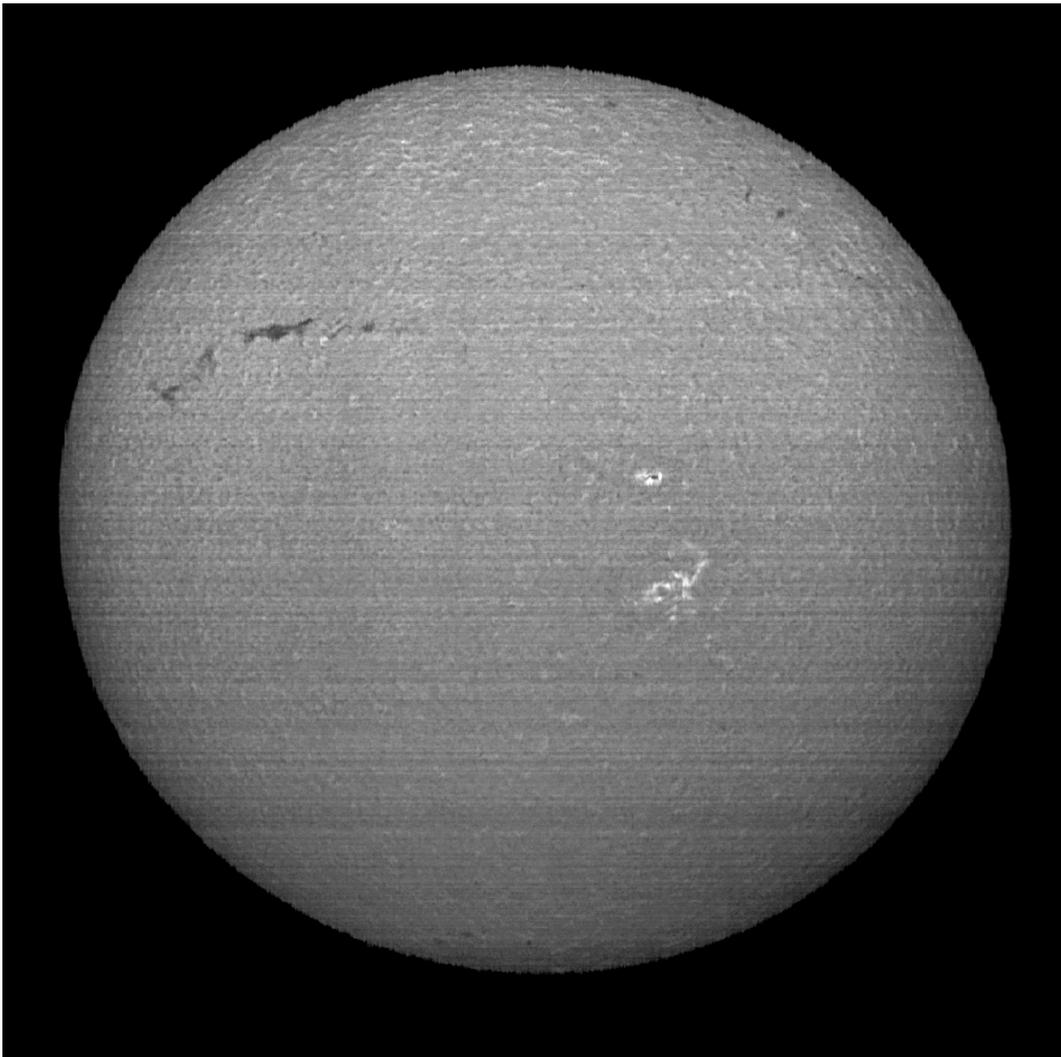
Il frame rate

Il frame rate è importante in quanto da esso dipende la risoluzione in pixel dell'immagine lungo l'asse x. Premetto che nelle mie scansioni solari lascio sempre che il disco solare scorra lungo la fenditura coi motori della montatura equatoriale spenti, e che quindi, la durata media del passaggio del sole sulla fenditura stessa sarebbe 1920 arcsec / 15 arcsec per sec = 128 sec. Naturalmente, per avere anche un contorno scuro del disco solare nell'immagine finale occorre

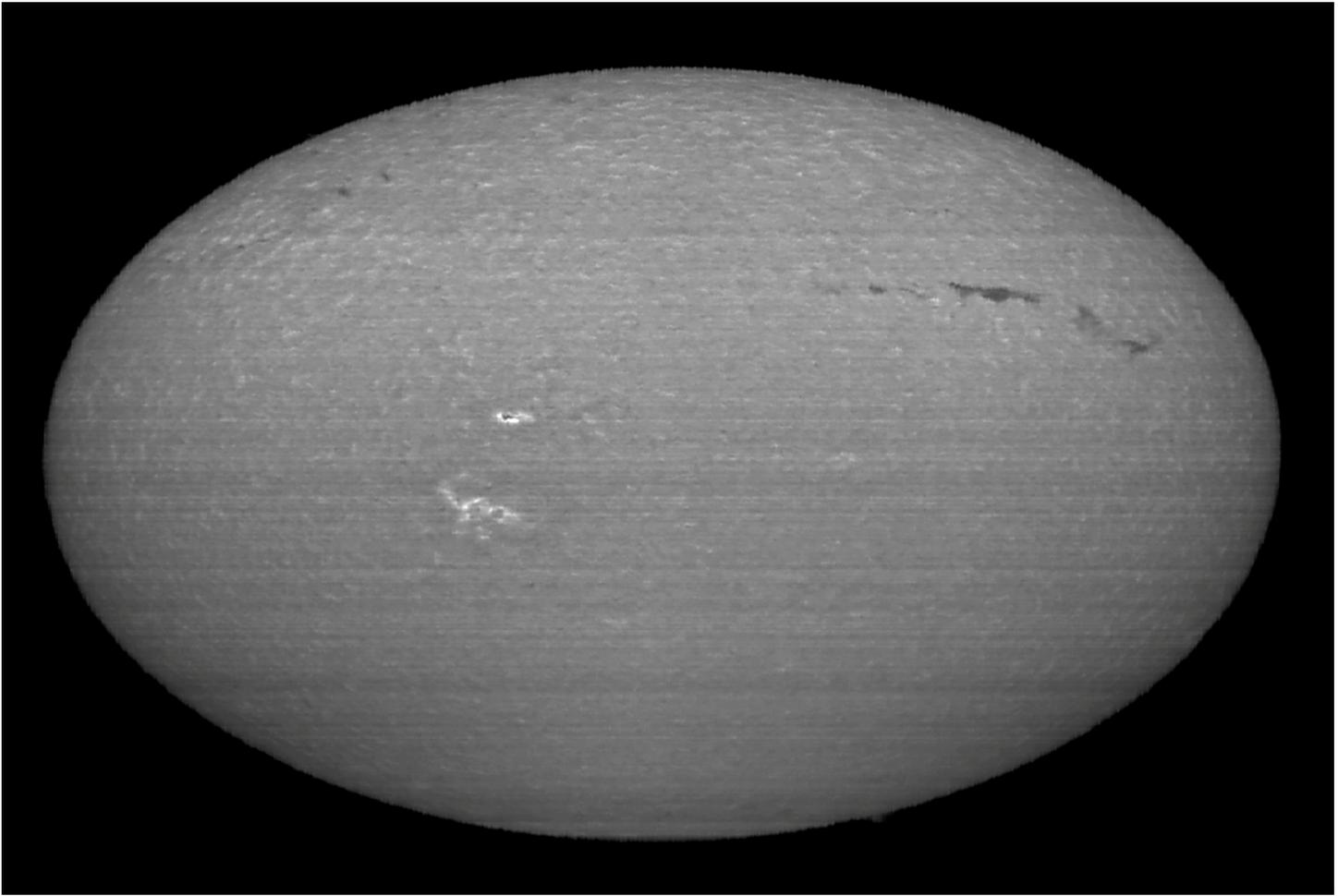
prolungare per qualche secondo in più la scansione, che così arriva a circa 150 - 160 sec , circa 2.5 minuti.

Con una DMK 51 (orientata col lato maggiore del chip lungo l'asse AR) ed un frame rate di 7.5 fps ottengo un'immagine solare che si estende lungo l'asse X per $128 \times 7.5 = 960$ pixel il solo disco e $160 \times 7.5 = 1200$ pixel l'immagine completa, bordi compresi. Lungo l'asse Y il formato è quello nativo della camera di 1200 pixel.

L'apparenza è all'incirca questa:



Con un frame rate di 12 fps otterrei 1536 pixel per il solo disco e 1920 pixel per l'immagine completa, con un aspetto simile al seguente:



Come si vede, il frame rate aumenta la risoluzione lungo l'asse X, ed occorre poi riscaldare l'immagine per farle ottenere l'aspetto normale. Dalle prove da me effettuate, tuttavia, la differenza in risoluzione ed incisione dei dettagli è molto meno importante di quanto si possa credere, probabilmente perché l'aumento del frame rate incide negativamente sulla qualità delle singole immagini.

In ogni caso la distorsione indotta tra asse X e Y potrà essere facilmente corretta in fase di postproduzione con qualsiasi programma di fotoritocco.

Il frame rate elevato con immagini a pieno formato potrebbe dare problemi di download su PC non molto performanti con le IS DMK, che hanno un USB 2.0. Tale problema può tuttavia essere facilmente controllato selezionando la riga spettrale d'interesse via software con un ROI (Region Of Interest). Per le ZWO ASI, che usano un bus 3.0, tale problema non sussiste su PC dell'ultima generazione.

Nota finale: la fenditura di uscita

Come si è visto, i progetti di spettroeliografi tradizionali presentano 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, arrivando ad alcuni spunti interessanti che si accordano abbastanza bene con l'esperienza pratica da me 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 facilità costruttiva.

- 2- 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.
- 3- La fenditura, per accogliere l'immagine solare del suddetto telescopio dovrebbe avere una lunghezza di almeno 6-7 mm, ed aperta a 10-15 μm
- 4- 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.
- 5- Il reticolo dovrebbe essere da 2400 l/mm e da 50 x 50 mm di lato.
- 6- La camera di ripresa dovrebbe avere un sensore di grandi dimensioni e pixel medio-piccoli tra i 4 e 5 μm .

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.

Ma esaminiamo ora più da vicino i 5 progetti di Littrow da me realizzati, simili nel layout, ma diversi nelle dimensioni e peso, e ciascuno con diverse funzioni specifiche e dei quali parlerò in dettaglio nelle pagine che seguono. 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 1,15 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'Halpa 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 ed alla centratura sulla riga. Ovviamente tali problemi non si verificano con Solarscan le cui procedure di messa a punto, 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.

1 *VHIRSS (Very High Resolution Solar Spectroscope)* : 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. Attualmente è dedicato alle riprese della zona spettrale H α -Na-H β ;

2 *POSS2 (POrtable Solar Spectroscope2)* : Littrow ora dedicato esclusivamente alle riprese nella banda del calcio ionizzato CaI K e H;

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 (High Resolution Solar Spectroscope2)* è ora da me utilizzato solo per sperimentazioni di vario genere, tra le quali alcune nel campo della meccanica quantistica.

5 *UPS (Ultra Portable Spectroheliograph)* date le sue ridottissime dimensioni e peso (una montatura Eq2 lo porta senza problemi) viene esclusivamente usato per dimostrazioni sul campo in occasione di eventi di vario genere come spettroscopio e spettroeliografo.

Spettroeliografi digitali auto costruiti in configurazione Littrow

Ma esaminiamo ora in dettaglio alcuni spettroelioscopi digitali autocostruiti da chi scrive: si tratta, come si è detto, di configurazioni autocollimanti o Littrow. Essi vengono continuamente aggiornati nelle ottiche e nei sistemi meccanici per mantenere le prestazioni a livelli elevati.

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.

Chi vuole provare le sue capacità è bene sappia che non contano solo la preparazione teorica e l'attitudine manuale, ma anche e principalmente una certa esperienza nella spettroscopia e le sue applicazioni pratiche. Ciò non toglie che anche un neofita di spettroscopia può cimentarsi nella costruzione di un simile strumento: semplicemente incontrerà più difficoltà ed impiegherà più tempo nello sviluppo del progetto e nella sua costruzione. 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. Vorrei iniziare dallo strumento che più mi ha dato e mi dà tuttora soddisfazioni: VHIRSS acronimo di Very High Resolution Solar Spectroscope. 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 $H\alpha$, $H\beta$, Na 1 e 2 ma ovviamente può essere utilizzato in qualsiasi lunghezza d'onda.

1- VHIRSS



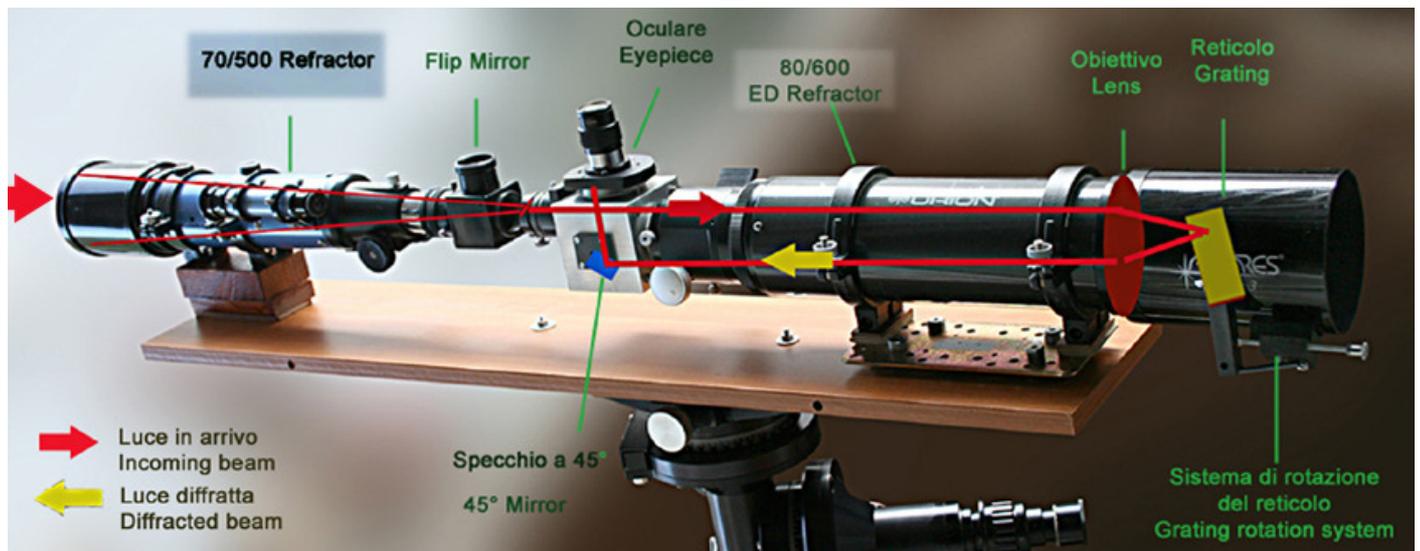
Foto in schema di VHIRSS

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 .

Gli elementi sono:

- La cassa contenente il reticolo ed il suo sistema di movimentazione, ricavati da un semplice paraluce di un rifrattore 102/500, già usato per un altro strumento (HIRSS2). 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 80 x 80 contenente lo specchio di rinvio quadrato di 20 mm e la fenditura regolabile.
- il tubo del rifrattore Skywatcher 70/500 usato per inviare l'immagine solare alla fenditura
- il piano di multistrato laminato 20 x 100 usato come supporto per gli anelli dei due rifrattori, in modo che il cono ottico del 70/500 fosse a registro con l'ingresso della fenditura, ed a fuoco sulla stessa.



Il progetto è stato portato avanti nel luglio 2009 e per i primi tentativi di spettroeliografia è stata usata una webcam Philips Toucam. Ora, a distanza di 9

anni, osservando le immagini ottenute, posso rendermi conto del divario enorme nell'output qualitativo dello strumento in tale periodo di tempo, grazie ai miglioramenti successivamente apportati.

Il primo elemento di criticità è stato il piano di multistrato laminato inizialmente utilizzato come base, che, per quanto in apparenza robusto, col decorso del tempo e dell'uso ha iniziato a deformarsi, rischiando di pregiudicare l'allineamento delle ottiche del telescopio e dello spettroscopio. Ho preferito allora ricorrere ad un quadratino di acciaio da 30 mm x 3 mm di spessore x 1 mt di lunghezza reperibile in qualsiasi buon negozio di ferramenta: Naturalmente un tale componente è molto più difficile da forare del legno, ma in compenso assicura una tenuta rocciosa, stabile e definitiva.

Il secondo è stato il telescopio che invia l'immagine sulla fenditura, inizialmente uno SW da 70 mm di diametro e 500 mm di focale, l'obiettivo era buono per il costo, ma non eccellente: mi sono quindi guardato in giro per vedere se potevo sostituirlo con qualcosa di meglio. Trovai, tra i miei innumerevoli ammennicoli ottici, un obiettivo da 60 mm e 500 di focale di probabile derivazione militare. Ad una prima occhiata sembrava molto buono, così lo testai paragonandolo non solo allo SW 70/500, ma anche a due 66/400 ED, e detto obiettivo surclassava tutti e tre quanto a definizione e contrasto, allora svitai dal tubo SW l'obiettivo originale e lo sostituii col mio nuovo acquisto (si fa per dire).

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 €. 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 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. Ovviamente il reticolo stesso va maneggiato con la massima attenzione, prendendolo dai lati dato che eventuali segni di dita o rigature sulla sua superficie sono permanenti e non eliminabili.

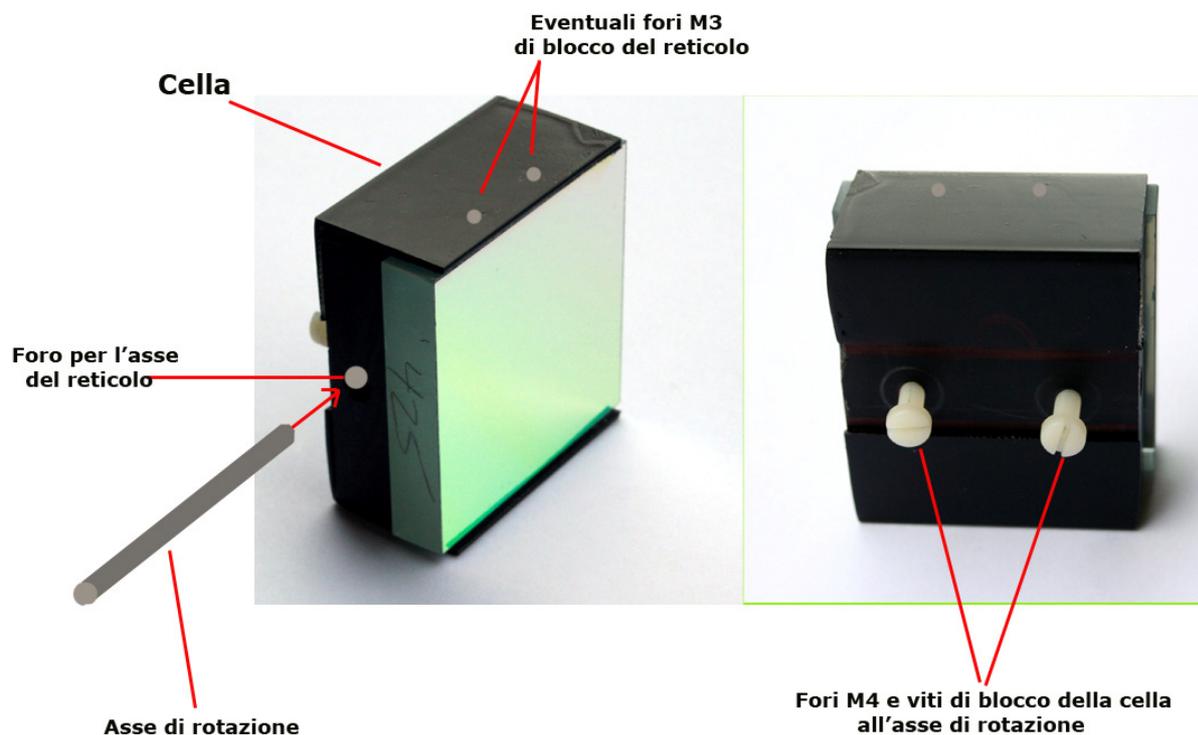
2-La cella del reticolo

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

Ho allora 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. Una volta pressato (dai lati) sul biadesivo, il reticolo non si muove più.

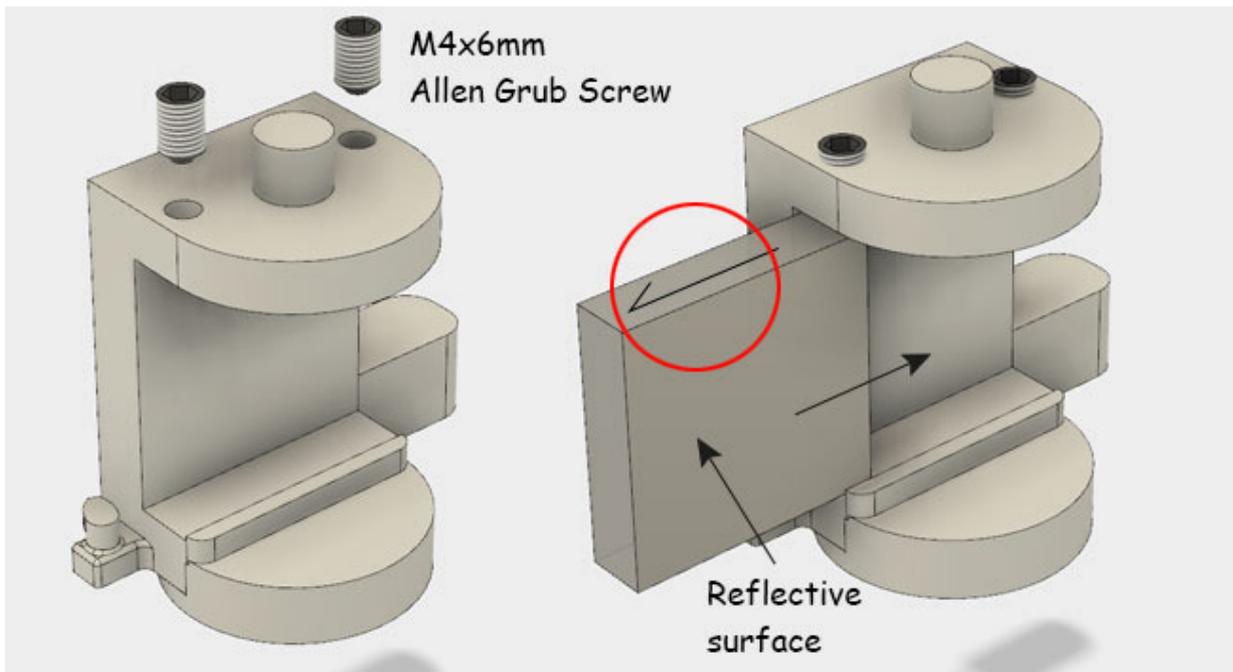
Si può, in linea di principio, bloccarlo ancora meglio, filettando M3 le due parti superiore ed inferiore della cella, in modo da accogliere delle brucoline: tale fissaggio deve essere tuttavia effettuato con la massima attenzione, dato che una pressione eccessiva potrebbe pregiudicare le prestazioni 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.



E' bene precisare che la cella col reticolo va orientata in modo che la freccia indicata sul lato del reticolo stesso punti verso l'ottica dello spettroscopio auto collimante per avere la massima efficienza.

L'asse di rotazione può essere scelto a piacere, comunque, dato il peso molto contenuto della cella e del reticolo, una barra filettata 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 alla minima distanza dall'ottica dello spettroscopio compatibile con la rotazione completa del reticolo stesso.

3-L'ottica di collimazione

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 spettroscopi- spettroeliografi Hires, Solarscan e POSS2.

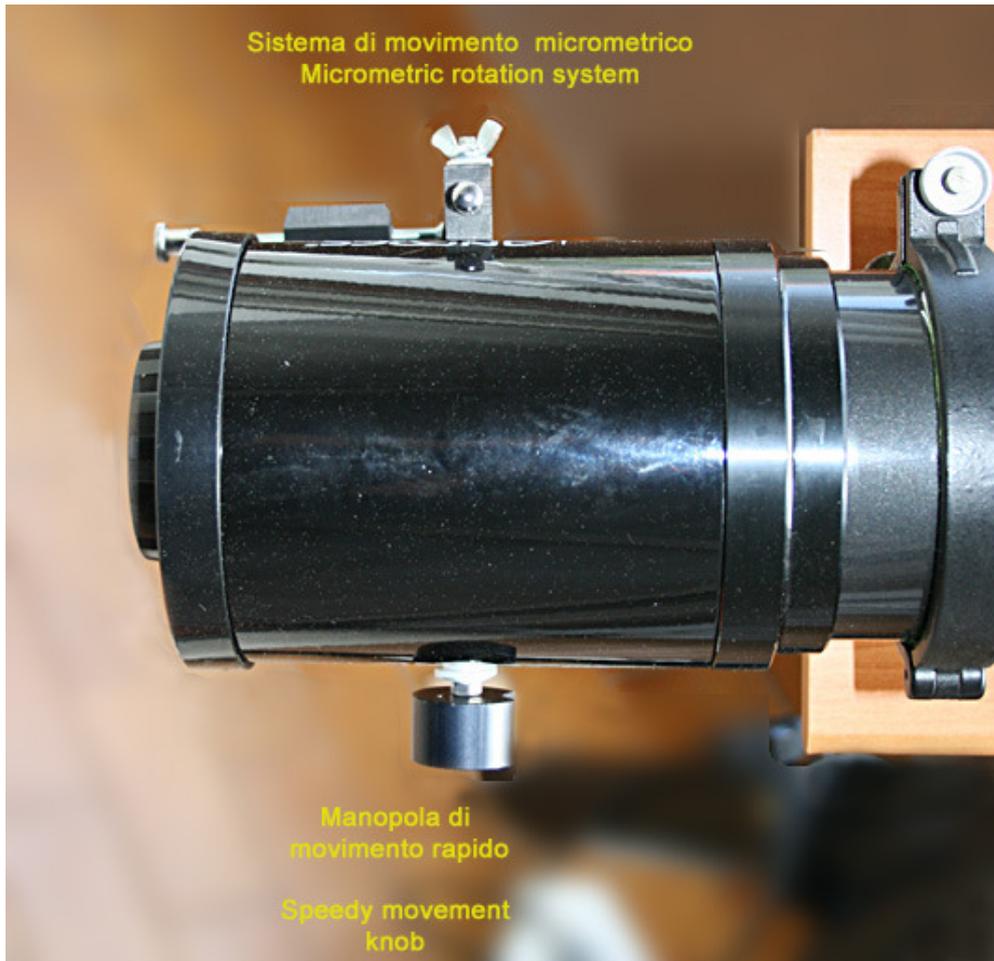
4- Il Box

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, meglio quindi se 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 del 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 disguidi. 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, come avviene in SolarScan.



Nell'immagine sopra il dettaglio dei due sistemi di regolazione del movimento della cella del reticolo, quello veloce e quello micrometrico.

Nella figura che segue si osserva il dettaglio del movimento micrometrico, estremamente semplice da realizzare con mezzi casalinghi. Il braccetto in PVC inserito nell'asse (ma può essere di qualsiasi materiale, meglio l'alluminio), una volta reso solidale all'asse stesso stringendo la vite di frizione, viene comandato da una vite con una molla di recupero del gioco.



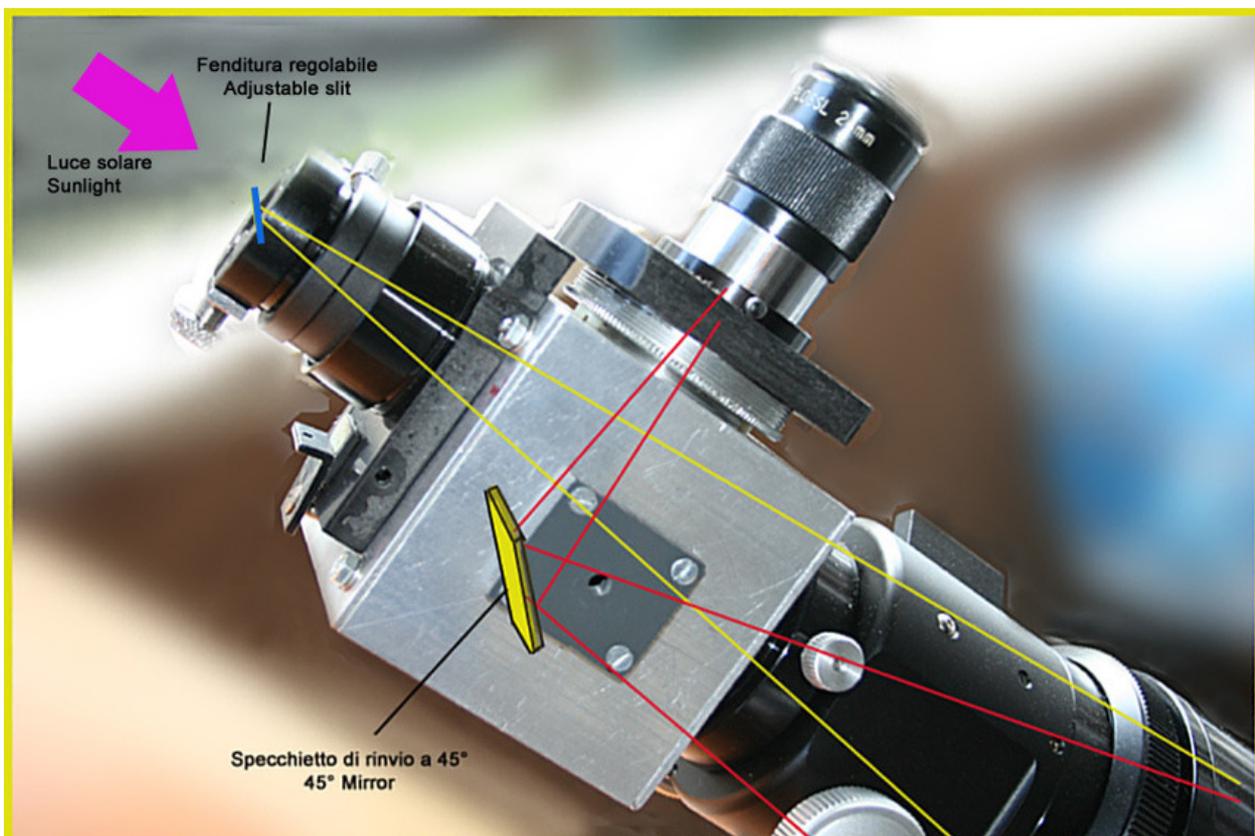
5- La scatola di rinvio

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. Ovviamente l'attacco al porta oculari dell'ottica dello spettroscopio deve essere quello del diametro interno di questo, da 50.8 mm, che viene comunque ristretto a 38 mm circa dall'adattatore maschio 42 x 0.75/ 50.8 mm. Come box ho usato un pezzo di quadratino di alluminio 80 x 80 x 3 mm di spessore chiuso ai lati con tappi di chiusura anch'essi di alluminio e bloccati con viti M3. Il box è stato poi forato su tre lati e filettato 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 tubo ottico dello spettroscopio in linea col primo.

Nella figura si osserva anche che il porta oculari della fenditura è posto fuori asse rispetto all'asse del tubo ottico, ma di questo parleremo dopo.

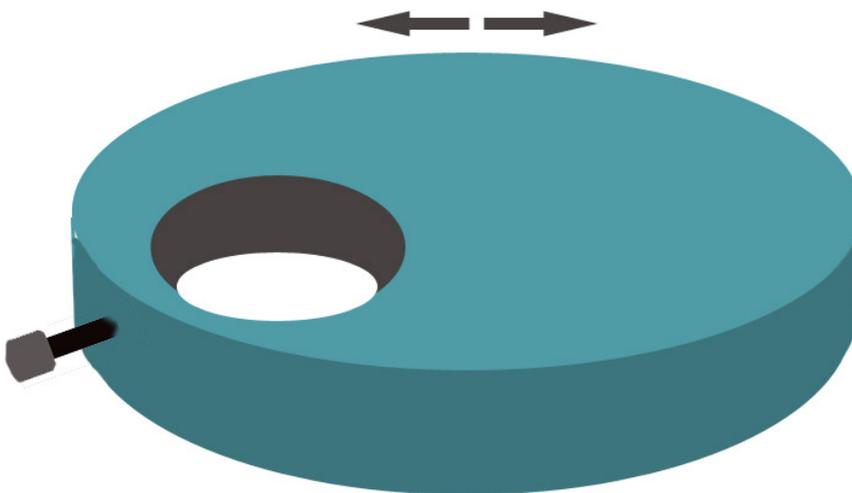
Lo specchietto di rinvio che reindirizza verso la camera il fascio luminoso di ritorno proveniente dal reticolo e dall'obiettivo (spettro) dovrebbe avere una misura pari al campo di piena luce dell'obiettivo (nel mio caso un 80/600) necessario per coprire al punto di fuoco il sensore della camera in diagonale, ad una distanza di circa 70 mm prima del fuoco stesso, ovvero a 580 mm. Tenuto conto che il più grande dei sensori citati misura 13 mm (Sony Exmor 174 della ZWO ASI), una dimensione dello specchietto di 15 x 20 mm sarebbe sufficiente. Occorre ovviamente, 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, ma il montaggio potrebbe essere più complicato. 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.



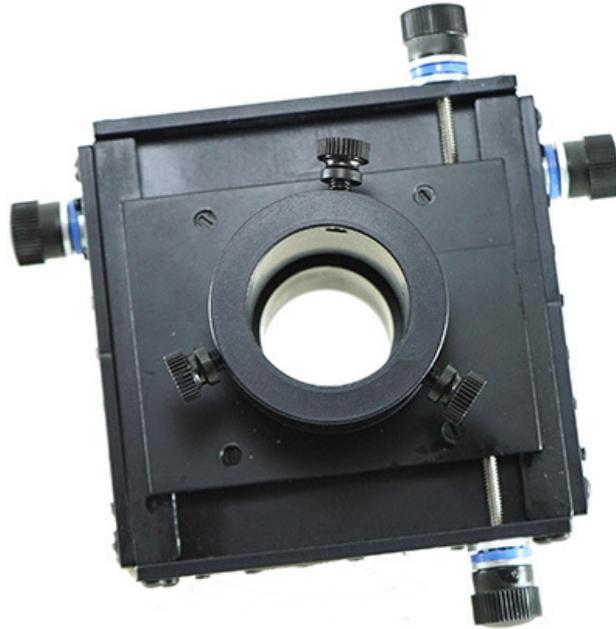
Una delle caratteristiche di VHIRSS rispetto agli altri spettroscopi Hires da me auto costruiti è il posizionamento della fenditura fuori asse ottico. Questa variazione fu dettata dall'intuizione che un angolo maggiore potesse consentire una dispersione lineare ed una risoluzione migliore. Ora, il dislocamento del centro della fenditura rispetto all'asse ottico è stato di 7 mm circa, pari ad 1 grado sul piano del reticolo: se nella formula della dispersione lineare (5) a pag 99 , si sostituisce tale angolo a quello $= 0$ della configurazione Littrow con reticoli olografici non blazed si ottiene con la fenditura chiusa a 30 micron, una dispersione di 3.75 \AA/mm , pari per una camera con pixel da $4.65 \text{ }\mu\text{m}$, a 0.017 \AA/pixel ed una risoluzione R di 59660 nell'H alpha. Tali valori sono vicini a quelli della dispersione da me ottenuta sul campo con VHIRSS e la DMK 41 nella zona H alpha (0.019 \AA/pixel) ed $R= 43700$ e molto superiori a quelli teorici calcolati per detta apertura della fenditura a pag 99 (DL 0.032 \AA/pixel e $R= 31252$) . Sembrerebbe quindi confermato che tale dislocamento possa apportare un miglioramento nella dispersione lineare e nella risoluzione.

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 prevedibile, si sposta lungo il proprio asse al variare della lunghezza d'onda. Un'alternativa a detto sistema potrebbe essere quello di fare una cella del reticolo regolabile con 3 viti a 120° e quindi lievemente decentrabile, 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.



Schema del portaoculari rotante fuori asse di VHIRSS

Un accessorio commerciale utile ad ottenere lo stesso effetto è l'X-Y finder , che tuttavia ha il difetto di costare circa 175 €, mentre il dispositivo che precede, se fatto in pvc nero da un tornitore, dovrebbe costare intorno ai 20-30 € circa.



X-Y finder (fonte Tecnosky)

E' bene precisare che , nel caso non si opti per la soluzione della fenditura fuori asse, il box con la fenditura ed il porta oculari 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.

Di guide fuori asse per tale uso ne ho posseduto ed usate parecchie, ma la migliore di tutte per l'uso di cui si parla è stata quella dell'immagine che segue, commercializzata dalla ditta Tecnosky a 199 €,e da me fortunatamente acquistata d'occasione a 80 €.Tale OAG, oltre ad essere assolutamente robusta, 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 oculari della messa a fuoco dell'ottica dello spettroscopio (nel mio caso dell'Orion 80 ED).

Naturalmente può in linea di principio essere usata qualsiasi guida fuori asse, purchè abbia, come si è visto, un prisma di dimensioni adeguate al fascio ottico che va ad intercettare.

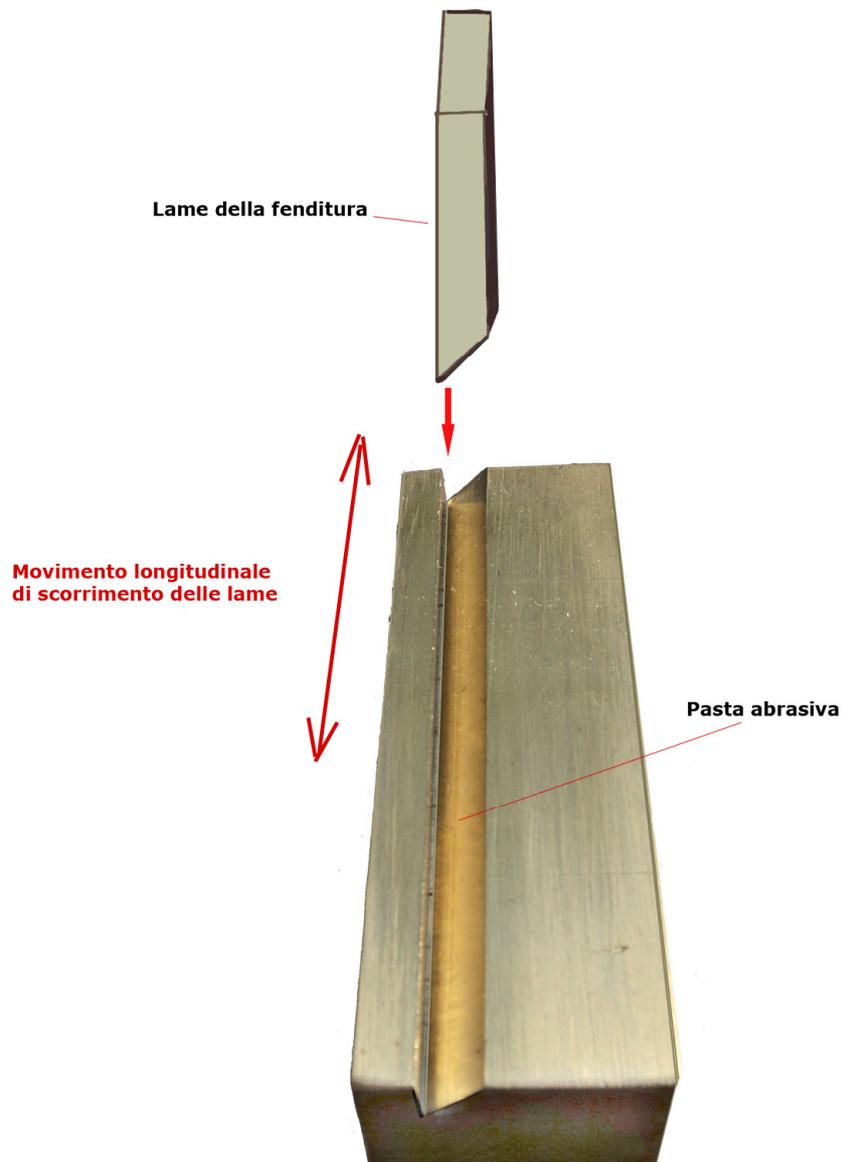


6-La fenditura

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 è anche quello più problematico, come si è visto, dal punto di vista della lavorazione delle lame e della meccanica generale. Abbiamo anche visto come una fenditura degna di tale nome può costare cifre notevoli e non risultare poi adeguata alle esigenze di uno strumento delicato come uno spettroeliografo. Molti consigliano la lavorazione delle lame in proprio, ma questo non è affatto facile senza possedere o poter usare una officina meccanica con frese e macchine di smeriglio.

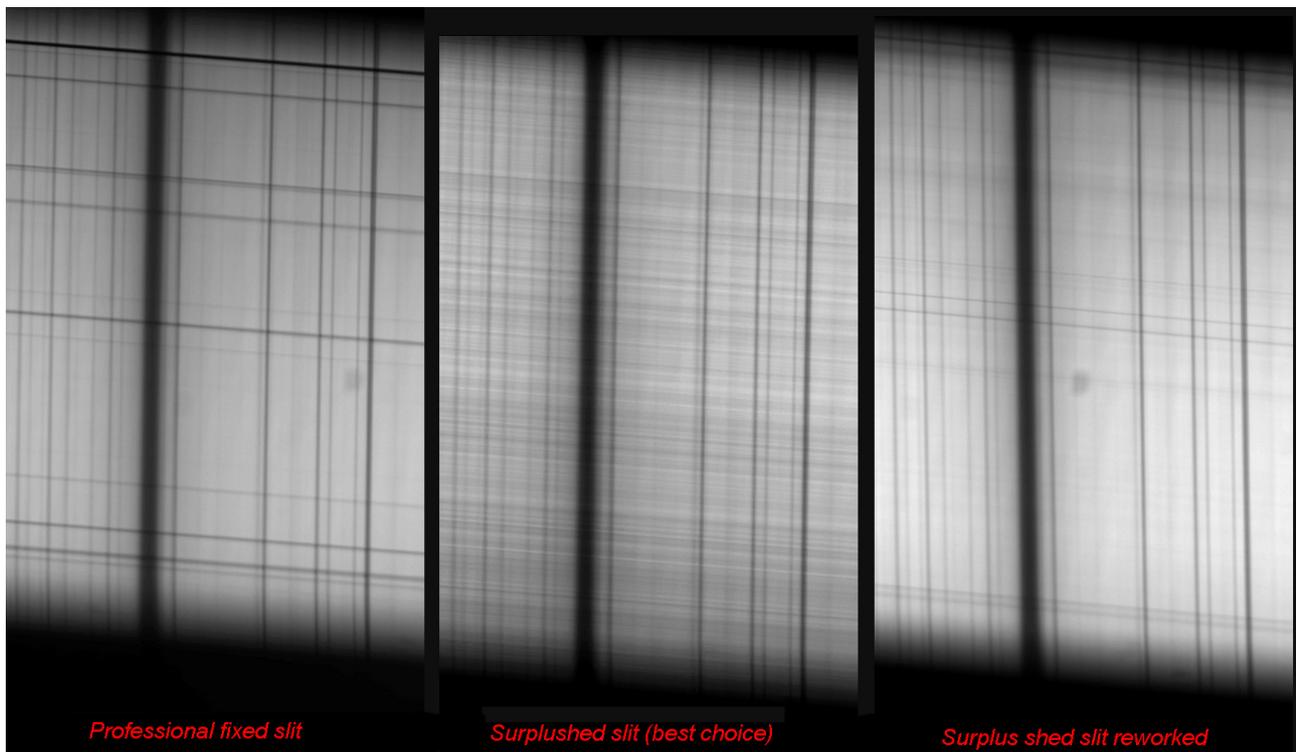
Per VHIRSS io ho adottato una soluzione ibrida, ovvero quella di acquistare una fenditura commerciale a basso costo e di migliorare la rifinitura delle lame in proprio.

La fenditura è quella di produzione Indiana e commercializzata da Surplushed <https://www.surplushed.com/pages/item/m1570D.html> di cui si è parlato in precedenza. 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, 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 SShed (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.



7- 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) con un collimatore laser inserito, ove possibile, nel paraluce del telescopio con un apposito adattatore (è facile farselo fare 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).

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.

VHIRSS è attualmente operativo per la ripresa di spettroeliogrammi in luce Idrogeno Alfa a 6562.8 \AA , a tal fine è stato dotato in uscita di un filtro H α da 10 nm che seleziona la lunghezza d'onda in ingresso e contiene la luce diffusa, aumentando il contrasto.

Un po' di conti

Al termine di questa discussione sui dettagli costruttivi di strumenti come VHIRSS, qualcuno potrebbe osservare "si, 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 VHIRSS è costato circa 600 €, ma acquistando in pratica solo reticolo (nuovo) ed il rifrattore Orion (usato) ed avvalendomi di componenti già in mio possesso, e non tutti hanno 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).....	300
- Barra di acciaio da 1 mt 30x30 o simile (nuova).....	10
- Minuteria metallica e piccoli accessori.....	40
Totale.....	950 €

2- Acquisto del 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).....	300
- Barra di acciaio da 1 mt 30x30 o simile (nuova).....	10
- Minuteria metallica e piccoli accessori.....	40
Totale.....	1450 €

Ciò nell'ipotesi che si vogliono usare ottiche ED (che comunque consiglio); nel caso di acquisto di ottiche acromatiche commerciali 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).

2-POSS2

POSS2 (PORTable Solar Spectroscope 2) costituisce in pratica un clone di VHIRSS, in quanto costruito con gli stessi identici criteri, anche se come telescopio è stata usata prima un'ottica SW da 80 mm di D e 400 mm di focale (f5) e poi una Celestron da 70 mm f 400 (f 5.7), entrambe acro: per bypassare i problemi derivanti dallo spettro secondario per le riprese nel vicino UV (CaII K e H) alle quali il tele è dedicato, prima del fuoco è stato inserito un filtro a banda stretta (ca 50 nm) centrato su 400 nm.

L'ottica dello spettroscopio è uno Skywatcher 80 ED, in pratica uguale all'Orion 80 ED di VHIRSS.

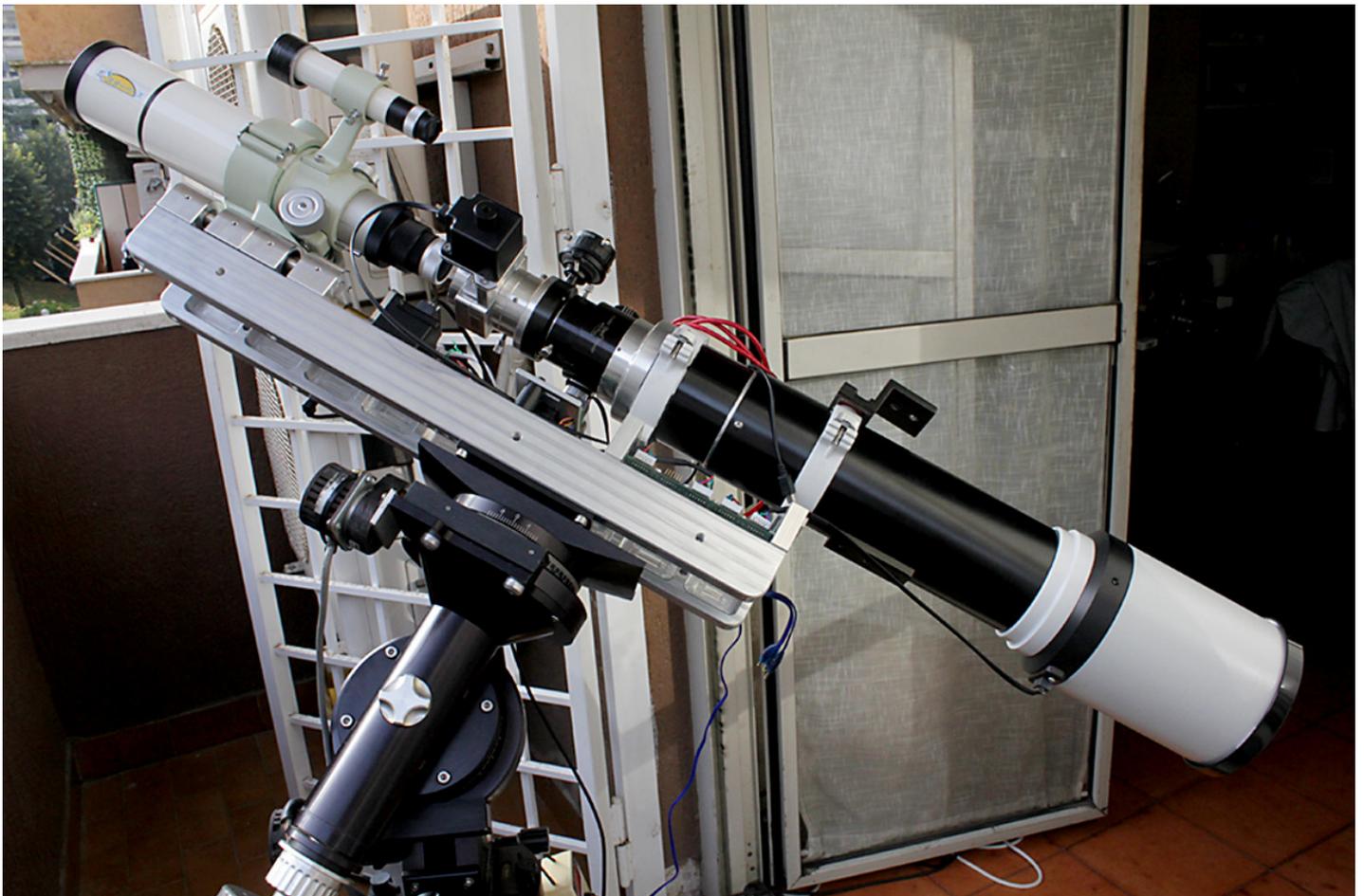
Lo strumento è attualmente dedicato alle sole riprese CCD in luce Calcio ionizzato K e H per le quali è stato ottimizzato ed in tale ambito riesce a far ottenere immagini di tutto rispetto, simili a quelle degli osservatori professionali.



Il layout di POSS2

3- Solarscan

Il progetto Solarscan, che ha potuto realizzarsi grazie alla competenza, all'impegno ed alla capacità innovativa della Avalon Instruments, costituisce la logica evoluzione di VHIRSS, nell'idea di uno spettroeliografo controllabile da remoto con un software apposito in tutte le sue funzioni, dalla messa a fuoco del telescopio e dello spettroscopio all'apertura della fenditura, alla movimentazione del reticolo con motori ad altissima risoluzione di step. Uno strumento di tali caratteristiche aveva bisogno di componenti di qualità, e quindi scelsi un piccolo, ma efficientissimo Takahashi FS 60 C che col suo rapporto F/D di 5.9 più si avvicinava a quello di f 7.5 del solito SW 80 ED, presente anche in questo strumento come ottica dello spettroscopio; il reticolo è sempre un Edmund da 2400l/mm. Naturalmente tale strumento, costruito con criteri e tolleranze professionali, forniva e fornisce prestazioni di tutto rilievo, al punto che in seguito decisi di dedicarlo ad un'attività più impegnativa, come quella della misura dei campi magnetici delle macchie solari per effetto Zeeman.



Solarscan sulla mia Losmandy G11



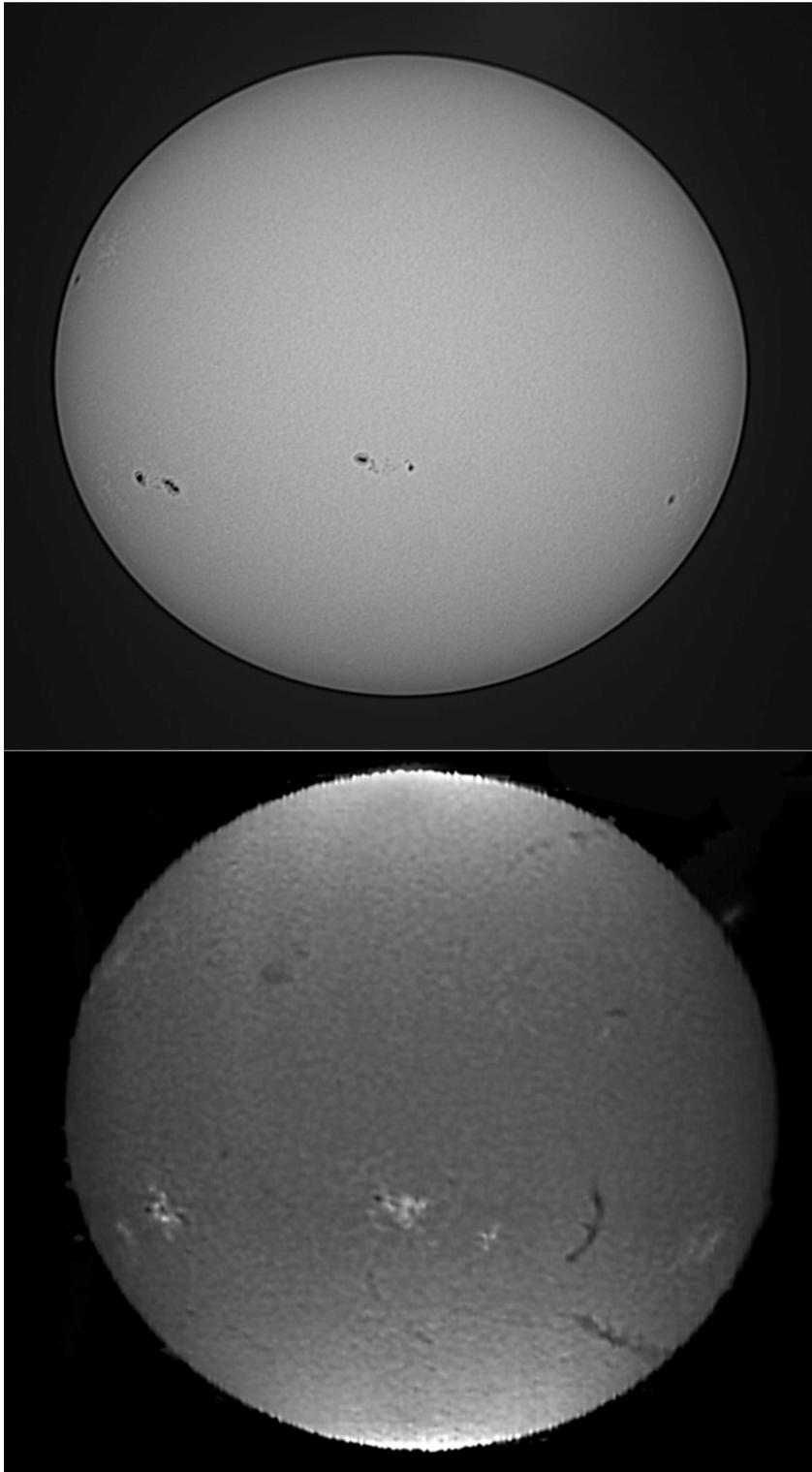
Solarscan su una Avalon M1

Il peso, cresciuto a 15 Kg su 110 mm di lunghezza per effetto della meccanica sofisticata e robusta , imponeva l'uso di montature di un certo livello e capacità di carico come Losmandy G11 ed Avalon M1.

HIRSS2

Nato come spettroeliografo classico, HIRSS (Hi Res Solar Spectroscope 2) fu poi trasformato in auto collimante Littrow con solito schema già collaudato. L'unica variazione rispetto agli altri fu la realizzazione in economia, con due ottiche acro Antares (un 80/400 per il telescopio ed un 100/500 per lo spettroscopio) acquistate entrambe d'occasione a 150 € complessivi, ma di buona qualità ottica, ed un reticolo Thorlabs da 1800l/mm del costo di 170 €. In definitiva lo strumento mi era costato, tutto compreso, circa 400 €. Nell'immagine sottostante HIRSS2 in versione strumento solare a luce bianca /spettroeliografo, grazie ad un flip mirror ed un filtro Astrosolar. Col filtro inserito ed il flip mirror abbassato, si riprendeva in luce bianca, mentre togliendo il filtro e sollevando il flip mirror si effettuava una ripresa spettroeliografica nella riga d'interesse. La qualità delle immagini spettroeliografiche non è delle migliori e non certo a livello degli altri strumenti, ma tuttavia accettabili. Esso viene ora da me usato esclusivamente per effettuare delle prove e per alcuni interessanti esperimenti. Per inciso, nell'ultimo periodo il rifrattore acro 80/400 è stato sostituito con un buon 60/415 vintage di minor peso e dimensioni e prestazioni tutto sommato simili.



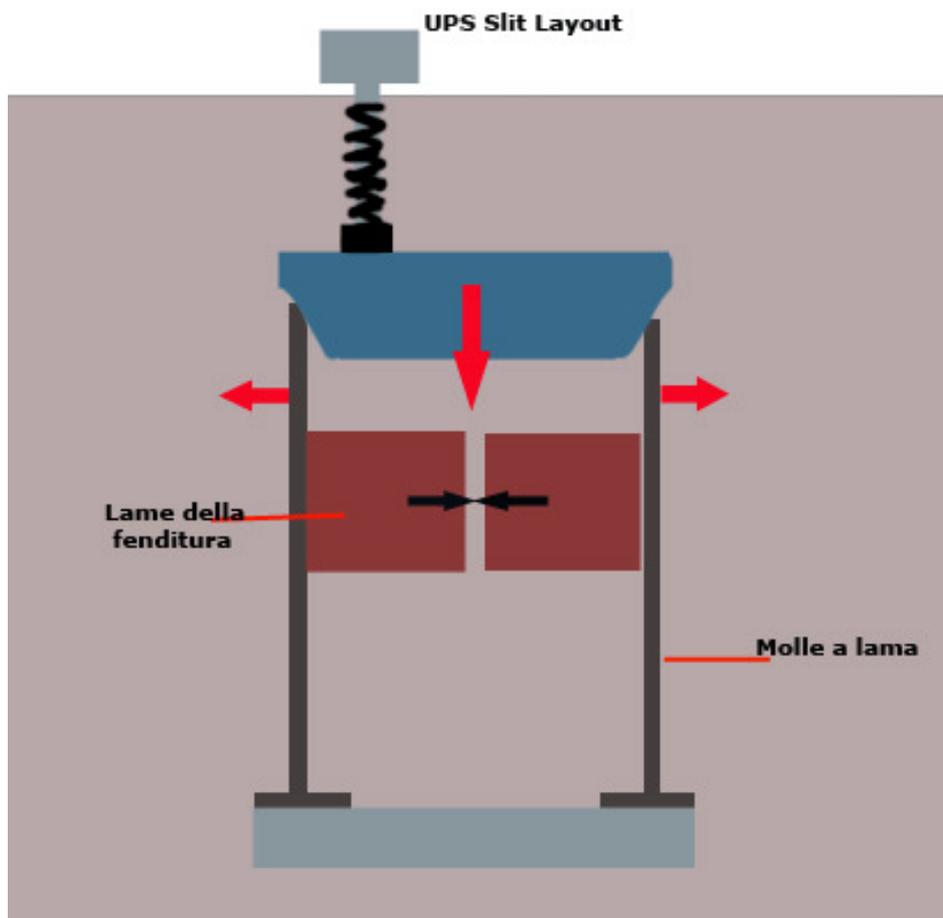


Le riprese contemporanee il WL e Halpha di HIRSS2

UPS

UPS (**U**ltra **P**ortable **S**pectroeliograph) è il più piccolo e più maneggevole degli spettroeliografi da me auto costruiti, ed è quello che normalmente uso quando effettuo delle dimostrazioni pubbliche in occasione di eventi astronomici.

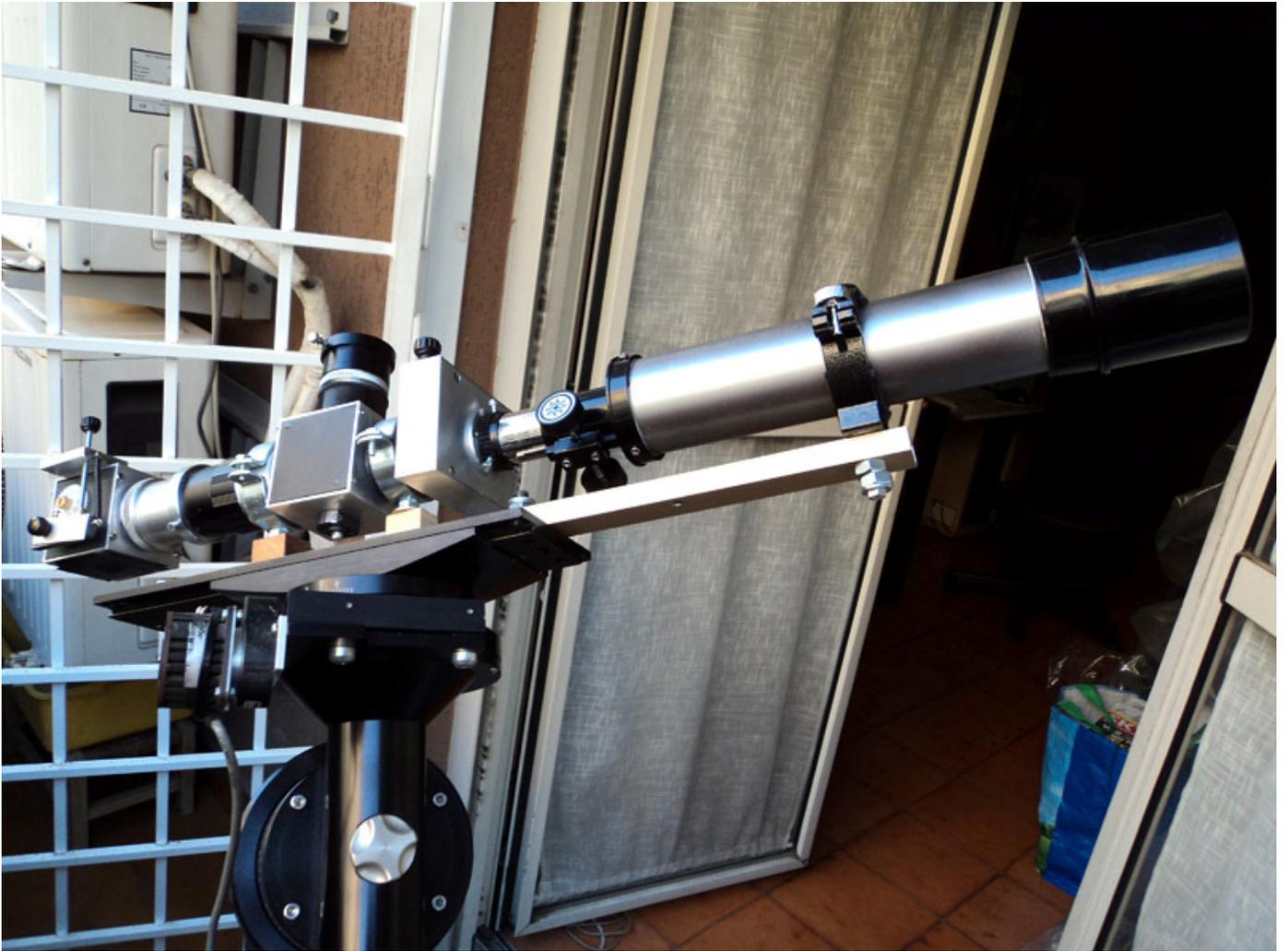
Le sue ridotte dimensioni non hanno tuttavia influito sulle prestazioni, che sono di tutto rispetto nonostante utilizzi un reticolo di 25 mm e di sole 1200 l/mm. L'ottica dello spettroscopio, di 36 mm e 300 di focale, è di derivazione surplus militare ed assolutamente eccellente, mentre l'ottica del telescopio è costituita da un altrettanto eccellente rifrattore acro vintage Stein Optics da 60 mm e 420 mm di focale. La soluzione particolare di questo strumento è dato tuttavia dalle fenditura, unica nel suo genere, ottenuta dall'utilizzo di componenti di una fenditura professionale, adattati all'uso astronomico. La sua caratteristica, difficile da trovarsi a prezzi umani, è quella della chiusura contemporanea delle lame al centro, ottenuta con un sofisticato sistema di molle a lama, come si osserva nella figura. Un sistema del genere è assente su tutte le fenditure amatoriali e su buona parte di quelle professionali ed assicura una perfetta chiusura ed apertura delle lame.



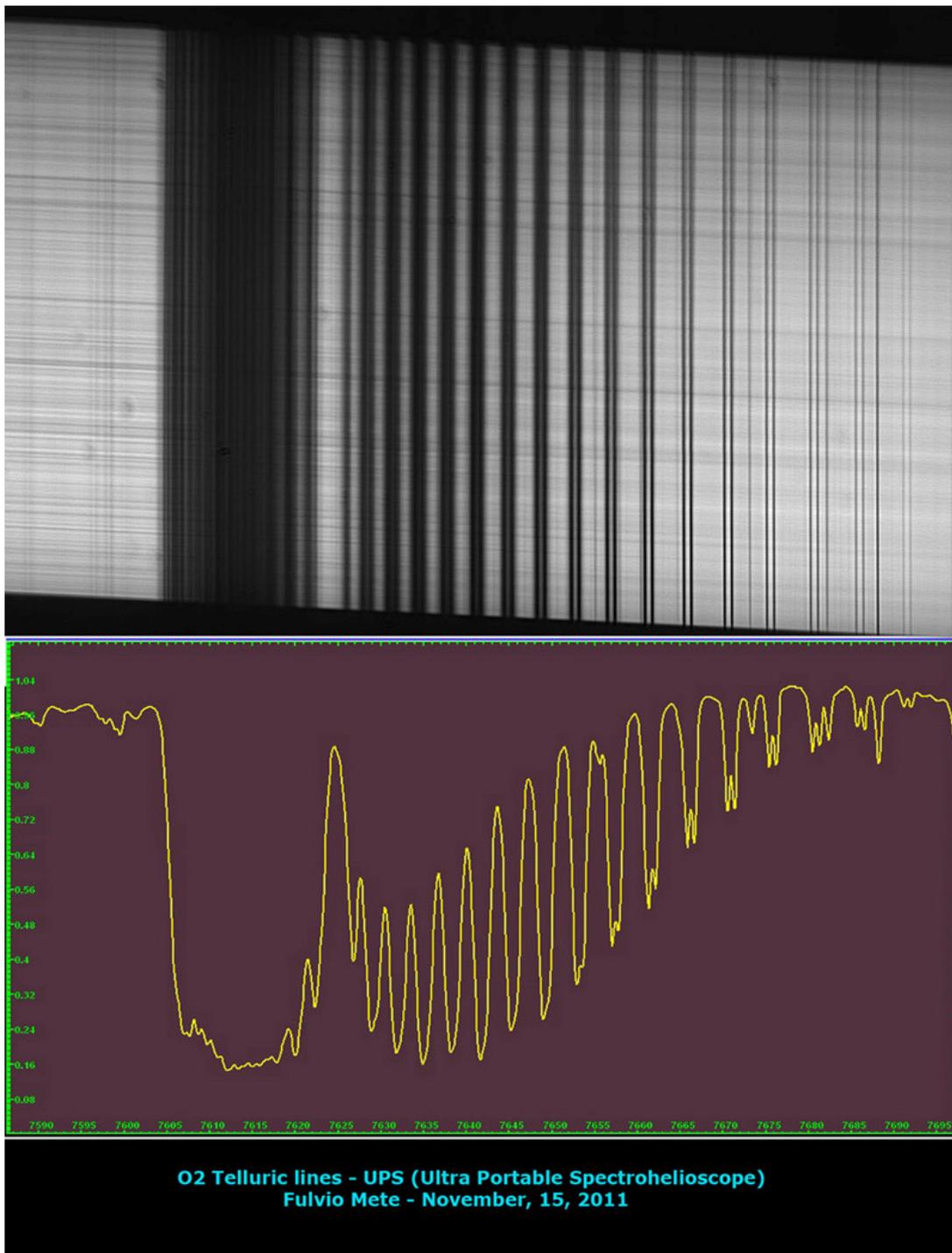


UPS layout

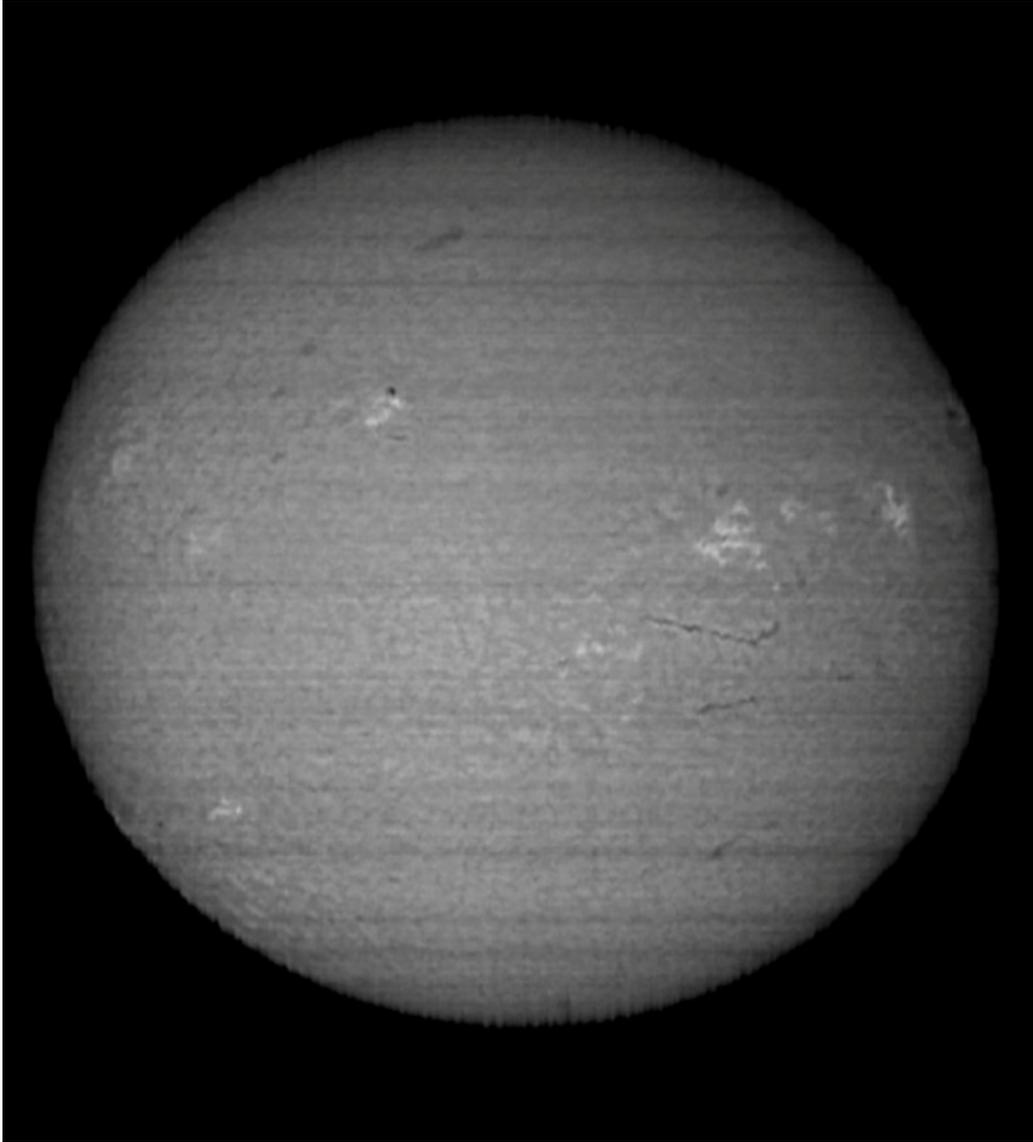
Si tratta di uno strumentino di soli 70 cm di lunghezza per 3.5 kg di peso, capace tuttavia di prestazioni di tutto rispetto. Si osserva, al centro, il box con la fenditura cui si è accennato.



UPS sulla Losmandy G11 nel mio terrazzino.



La buona risoluzione fornita dallo strumento sulle righe telluriche dell'O₂ appartenenti all'atmosfera terrestre.



Un'immagine spettroeliografica in luce H alpha di UPS

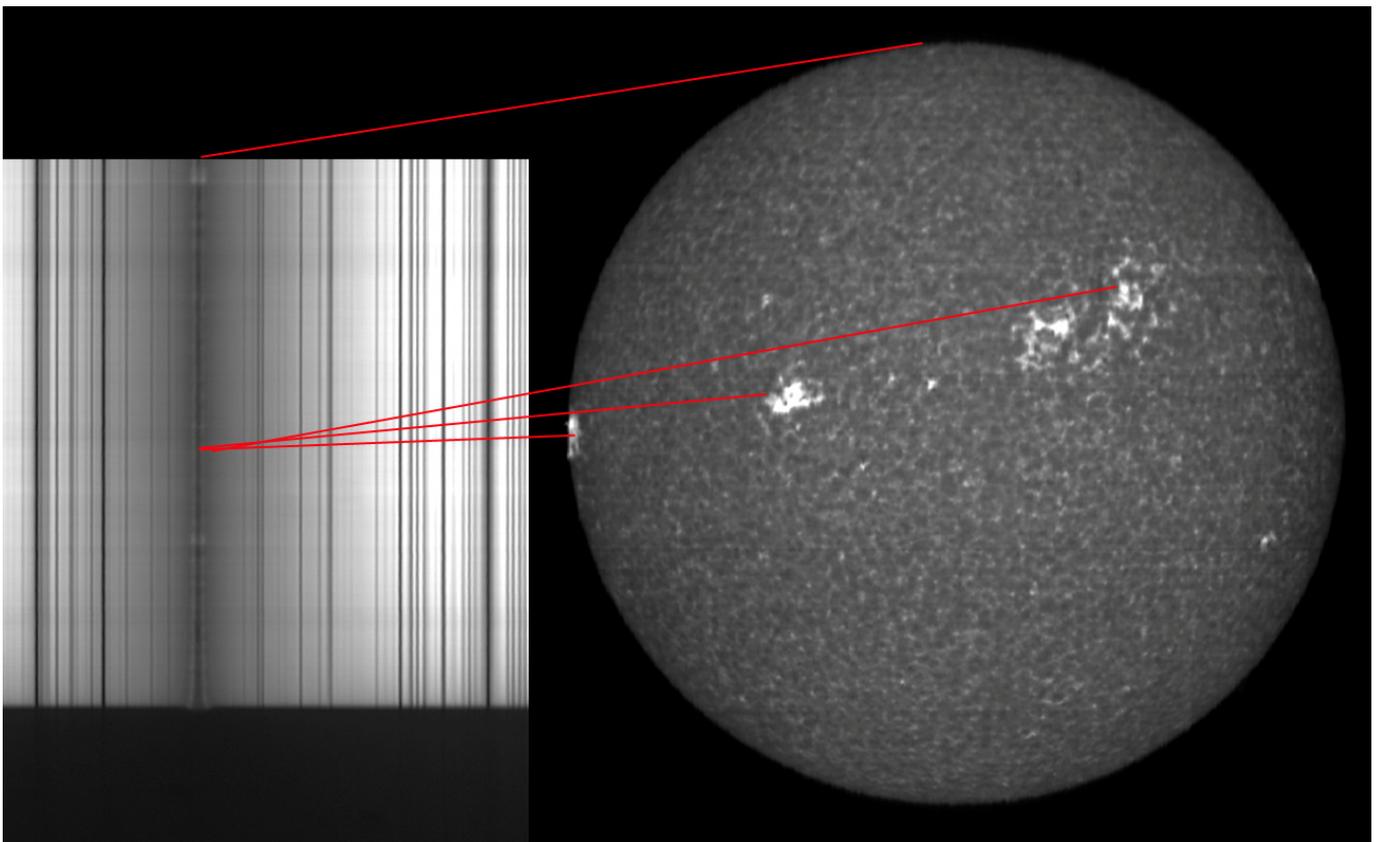
Sintesi delle operazioni da effettuare in spettroelioscopia digitale

1- Foceggiatura

La foceggiatura di uno SHG (Spectro Helio Graph) in configurazione Littrow può all'inizio non sembrare una cosa banale, ma una volta fatta pratica diventa un'operazione di routine. Essa si effettua a gradi, foceggiando entrambi gli strumenti, telescopio ed ottica dello spettroscopio, sino ad ottenere un punto di fuoco ottimale.

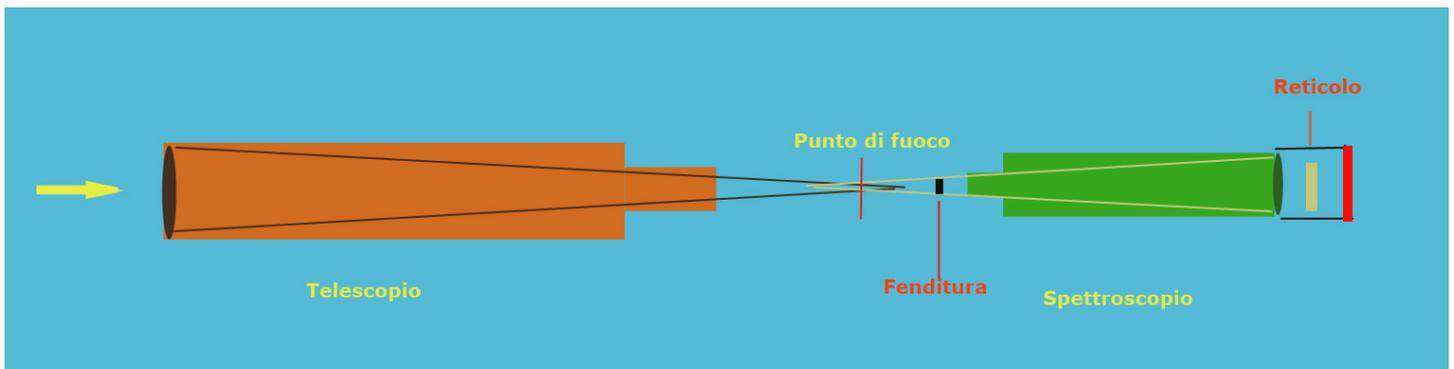
Ma vediamo in dettaglio:

Occorre innanzitutto, per capire meglio, chiarire un punto fondamentale: in che modo l'immagine dello spettro si traduce in quella del disco solare dopo le operazioni di sintetizzazione via software. In pratica, il bordo superiore ed inferiore dello spettro corrispondono ai bordi del disco solare dell'immagine finale, mentre i particolari cromosferici osservati dentro le righe costituiscono i particolari (facole, filamenti, etc) osservabili nel disco solare dell'immagine, come visualizzato nell'immagine che segue.



La prima operazione di foceggiatura, una volta centrata la riga di interesse ed aperta la fenditura alla posizione di lavoro, sarà quindi quella di mettere a fuoco il telescopio sulla fenditura stessa visualmente utilizzando un oculare, sino ad avere un'immagine spettrale incisa. Poi, una volta inserita la camera nel porta oculari, si agirà sul sistema di foceggiatura del telescopio sino ad avere sul monitor un'immagine del bordo dello spettro netto, simile a quello della figura; probabilmente le righe non risulteranno a fuoco, occorrerà allora operare sul foceggiatore dello spettroscopio (nel caso del Littrow sul fok del rifrattore ED) sino a rendere incise le righe e, ancor di più, i particolari cromosferici all'interno delle righe; nel caso dopo tale operazione il bordo dello spettro fosse ritornato lievemente fuori fuoco, occorrerà effettuare un ultimo ritocco sul telescopio, sino a che lo spettro appaia come nella figura, con incisi sia i bordi che i particolari all'interno delle righe.

Tutto ciò si spiega col fatto che nel punto ottimale di fuoco i fuochi del telescopio e dello spettroscopio si intersecano. In parole povere, mentre il fuoco (all'infinito) del telescopio è posto sulla fenditura, quello dello spettroscopio (originariamente anch'esso sulla fenditura) viene portato alcuni cm più indietro per "pescare" il fuoco del telescopio e focheggiare tutto il sistema. Per fare un esempio, in POSS2 il punto di fuoco del sistema è posto a 37 cm dall'obiettivo del telescopio 70/400 ed a 56 cm dall'obiettivo del rifrattore SW 80/600.

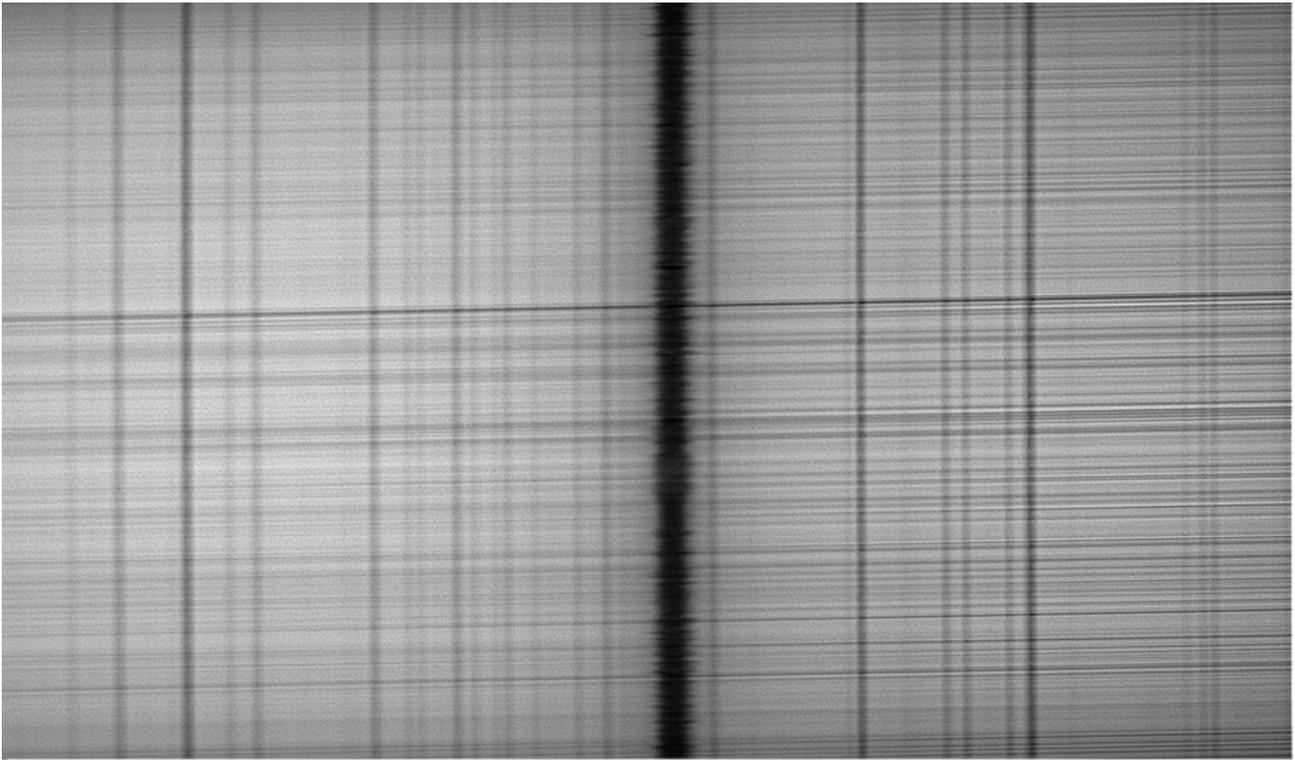


Un disguido molto comune, e capitato parecchie volte a chi scrive, è di dimenticarsi di chiudere la fenditura ai canonici 15-30 μm : in tal caso le righe dello spettro risulteranno comunque fuori fuoco, per quanto si agisca sul focheggiatore ed occorrerà chiudere la fenditura per vederle incise.

L'immagine della riga sullo schermo del PC dovrà essere inoltre il meno scura possibile, ed il contorno sovraesposto, come nell'immagine della riga Ha che segue. I frastagliamenti orizzontali della riga sono in realtà le colonne di plasma in moto ascendente e discendente nell'atmosfera solare (supergranulazione).

Nel caso dell'H alpha si dovrà osservare quanto segue:

Ad un primo settaggio dei parametri della camera la riga dovrà apparire scura, con delle striature orizzontali, come si è detto. In una fase successiva, prima della ripresa, la riga dovrà essere sovraesposta sino ad osservare i particolari cromosferici dentro la riga stessa sui quali andrà effettuata la focheggiatura finale.



2- L'acquisizione del filmato

Passo ora alle operazioni necessarie per una buona acquisizione di un'immagine solare con uno spettroelioscopio digitale del tipo di quelli illustrati in precedenza, nel presupposto che sia collocato su di una montatura equatoriale motorizzata.

L'ora ed il periodo dell'anno

Innanzitutto, è appena il caso di dirlo, ha importanza la scelta delle ore in cui gli effetti negativi del seeing, che si ripercuotono sulle immagini, sono meno avvertiti. Le ore mattutine, se non vi sono esigenze di monitoraggio di un dato fenomeno in altre ore, sono a mio avviso preferibili.

Ha ovviamente grande importanza la stagione e l'altezza del sole sull'orizzonte; i migliori risultati si hanno, sulla base della mia esperienza, in tarda primavera ed all'inizio dell'autunno.

La localizzazione

La localizzazione dello strumento è anch'essa importante: per chi può sceglierla, molto meglio un giardino od un prato erboso di un balcone od un terrazzino, per evitare fenomeni di masse d'aria calda ascendenti.

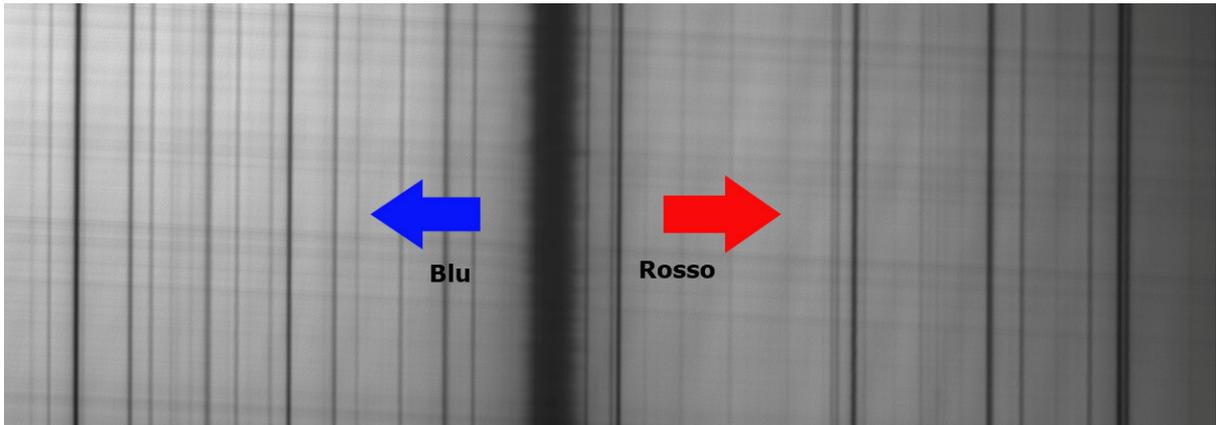
L'acquisizione

Si punta il Sole in modo che il disco proiettato dall'ottica del telescopio appaia sulla fenditura, si inserisce la camera nel porta oculari col lato lungo del sensore parallelo all'asse AR, si individua la riga di interesse orientata lungo l'asse Y, (lungo il lato corto dello schermo) e si eseguono le operazioni di messa a fuoco dianzi indicate. A questo punto occorre controllare l'aspetto dello spettro che appare sul monitor facendo attenzione ai punti seguenti:

a) Orientamento dello spettro

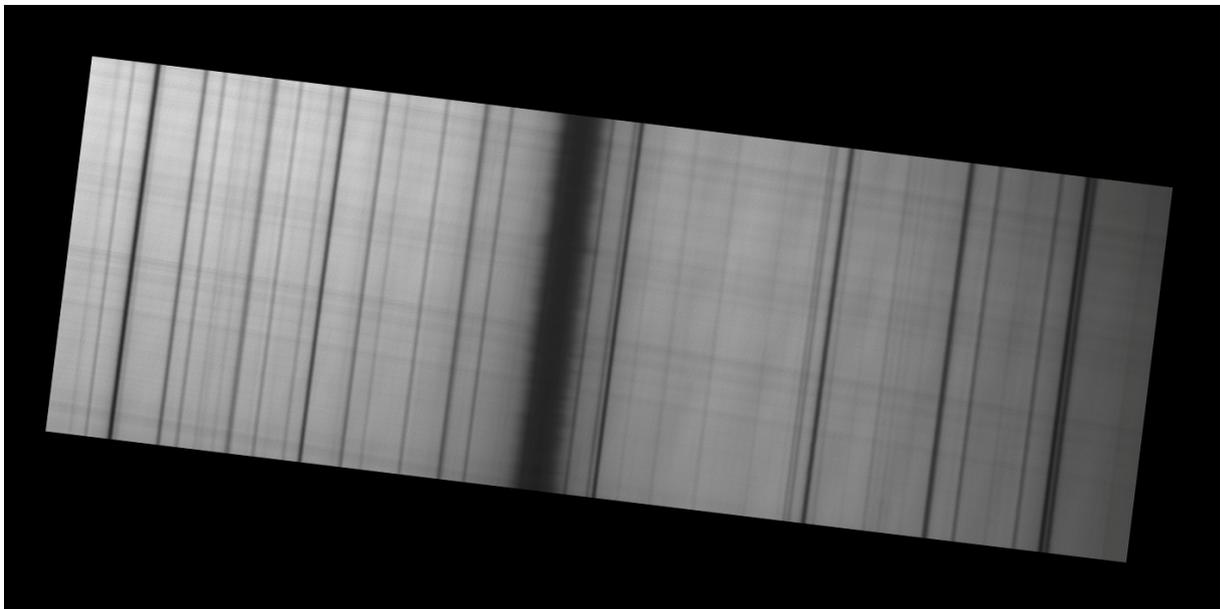
Occorre anche tenere a mente che il posizionamento della camera corrisponda ad uno spettro correttamente orientato, ovvero col blu a sinistra ed il rosso a destra dell'immagine sul monitor, come nella figura che segue. Per controllare l'orientamento sono utili i cataloghi on line, tra i quali, oltre a quello di Moore, è molto utile il seguente:

http://bass2000.obspm.fr/solar_spect.php



b) Il "Tilt" dello spettro

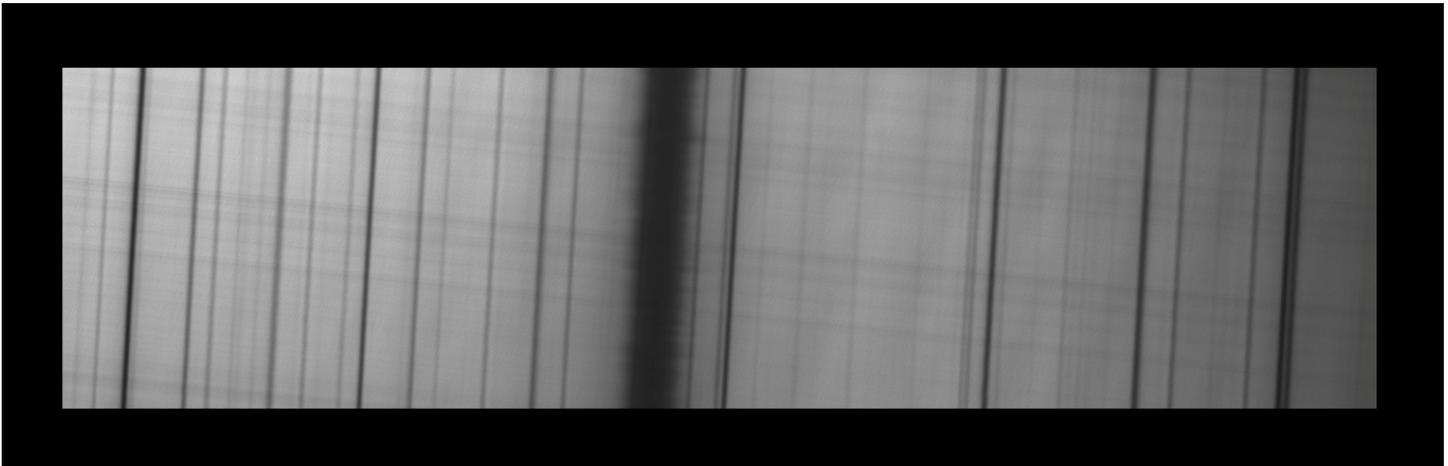
Può capitare che la camera non sia correttamente orientata rispetto allo spettro e che questo non appaia dritto sul monitor come nella figura; niente paura, basta ruotare lievemente la camera verso sinistra o destra per raddrizzarlo.



Spettro "tiltato"

c) Lo "Slant"

Se dopo aver effettuato l'operazione di correzione del tilt lo spettro appare come nell'immagine che segue, con le righe lievemente inclinate rispetto all'asse verticale dello spettro stesso, allora si tratta di "slant", e la correzione va effettuata cercando di rendere il piano della fenditura esattamente parallelo all'asse di rotazione del reticolo, ruotando lievemente la fenditura stessa sul proprio asse. In ogni caso alcuni programmi informatici, come IRIS, BASS e Vspec permettono via software la correzione dello slant.

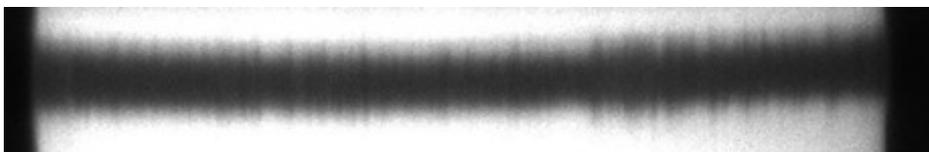


d) Lo "Smile"

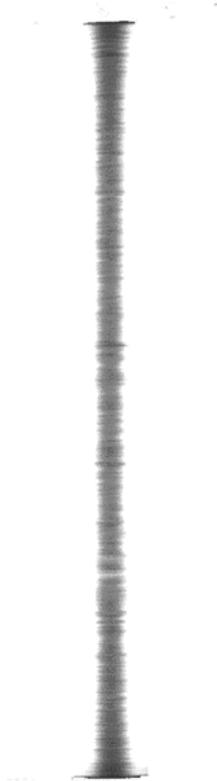
Lo smile consiste nella curvatura delle righe dello spettro, specie quando si usano fenditure di una certa lunghezza. Nei Littrow da me usati tale fenomeno non è quasi mai apparso; tuttavia esso è correggibile via software con alcuni programmi come Spectral Line Merge.

e) L'orientamento della riga

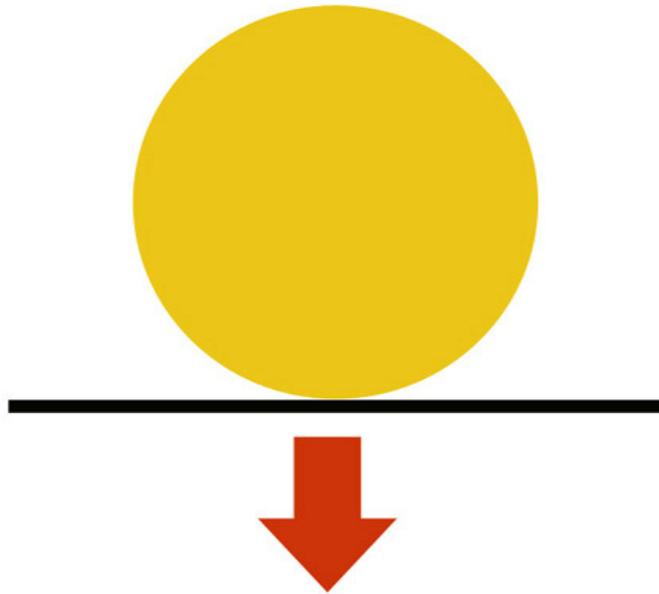
Alcuni amatori pongono la camera in modo che la riga dello spettro sia orientata lungo l'asse X anziché quello Y come nelle immagini precedenti, per guadagnare in risoluzione. Personalmente trovo questa soluzione non comoda e, da prove fatte, ritengo che non comporti guadagni apprezzabili nell'immagine finale: in ogni caso la scelta compete alle abitudini dell'astrofilo.



Immediatamente prima dell'acquisizione lo spettro della riga (nell'esempio sempre l'Halpa) dopo aver selezionato il ROI, apparirà all'incirca così:

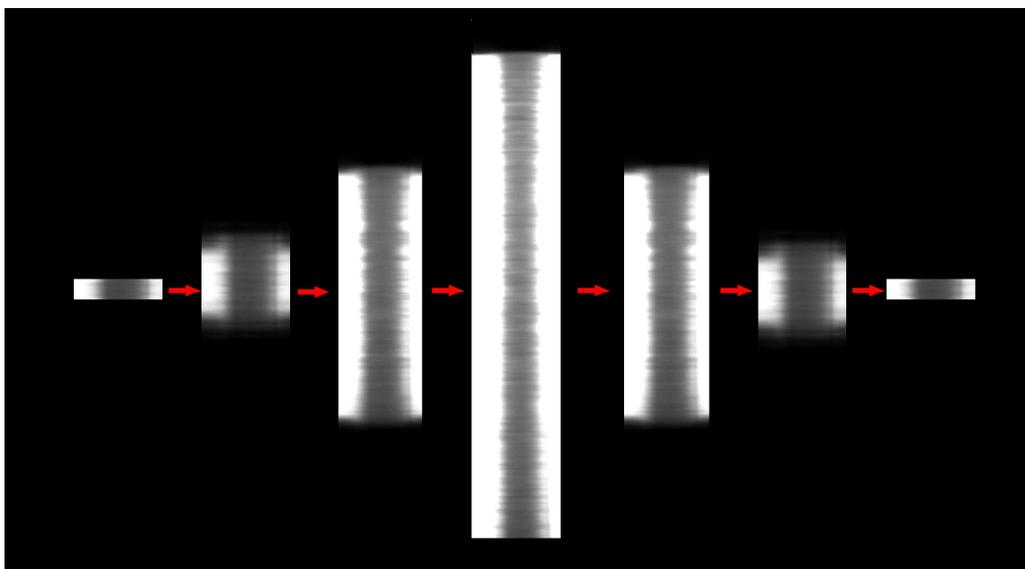


Dopo aver eventualmente corretto le anomalie dello spettro ,e, ovviamente, come detto prima foccheggiato sui particolari cromosferici della riga sovraesposta , selezionata col ROI come nell'immagine che precede, usando i moti veloci della montatura ed azionando il pulsante W (Ovest) della pulsantiera della montatura (nel caso del controller FS2 è così ma dovrebbe esserlo anche nelle altre montature), si porta il disco solare tangente al bordo superiore della fenditura :l'immagine dello spettro rimpicciolirà e scomparirà dallo schermo del PC. Si lancia allora l'acquisizione di un filmato AVI (altri formati non sono in genere supportati e vanno quindi convertiti).Come Codec si può usare il Y800 od altro , secondo il software della camera, ma in ogni caso si consiglia di effettuare una selezione ROI (Region Of Interest) intorno alla riga, che diminuisce notevolmente il peso dei frames da scaricare; il frame rate dipenderà dalla camera e dalla potenza del PC : io uso normalmente con la DMK 41 un frame rate di 7.5 o 15 e con la DMK 51 un FR di 7.5 o 12 fps, con buoni risultati.Contemporaneamente al lancio del filmato si ferma il moto orario della montatura equatoriale, lasciando scorrere il disco solare sulla fenditura, da est verso ovest.



Man mano che ciò avviene, si osserverà lo spettro che si ingrandisce, raggiunge la dimensione massima, poi si rimpicciolisce sino a diventare una riga sottile scomparendo dallo schermo. A quel punto, dopo altri 3-4 sec si potrà fermare il video ed eventualmente riaccendere la montatura, premendo il tasto W del comando della montatura per riportare lo spettro al centro della fenditura e nuovamente visibile sullo schermo del PC.

Nell'immagine che segue un esempio di come appare la riga selezionata (nell'esempio l' H alpha) man mano che procede la scansione. All'inizio ed al termine di questa lo schermo è buio, rifinando i contorni di quella che sarà poi l'immagine finale del disco solare.



Una scansione dura mediamente 120 sec (più alcuni secondi aggiuntivi per i bordi del disco), e le dimensioni dell'immagine dipenderanno, come si è detto, dal frame rate usato.

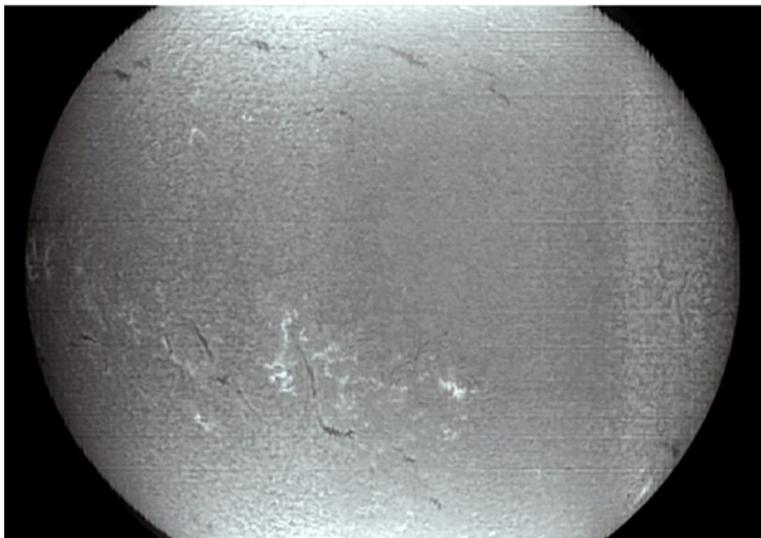
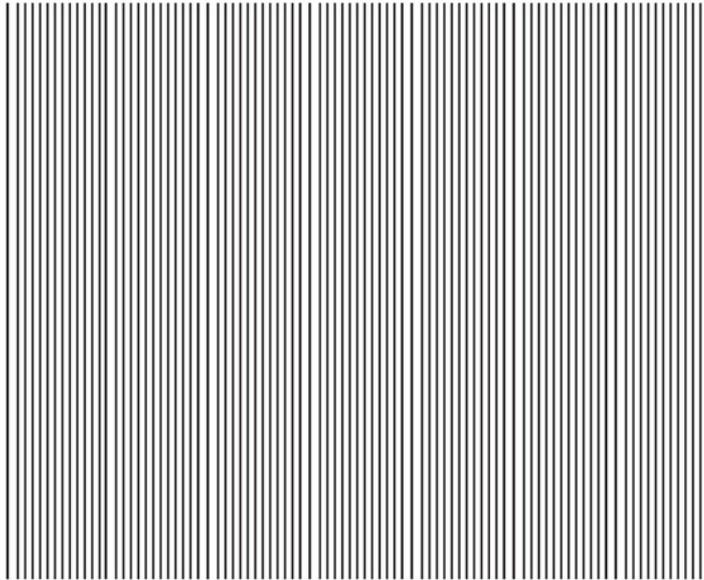
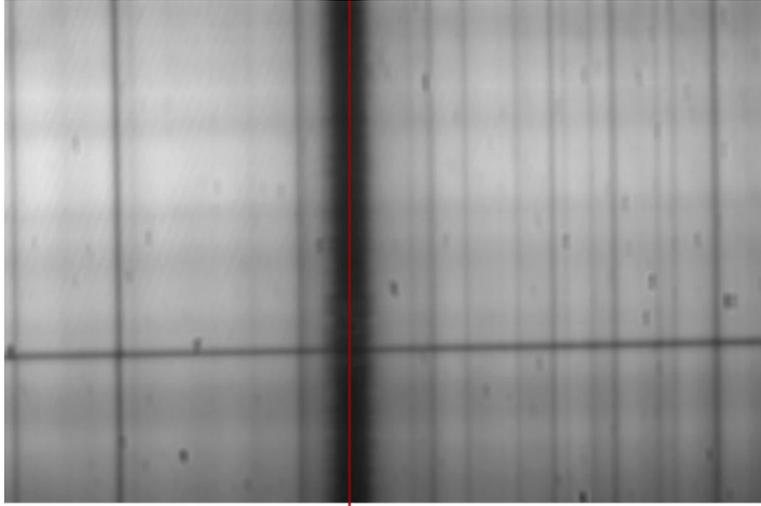
La digitalizzazione e la costruzione delle immagini partendo dallo spettro

Prima di parlare del software, un breve accenno alle modalità di esecuzione dell'algoritmo che presiede alla costruzione dell'immagine finale, e che sostituisce fenditura d'uscita e sintetizzatori degli spettroeliografi tradizionali.

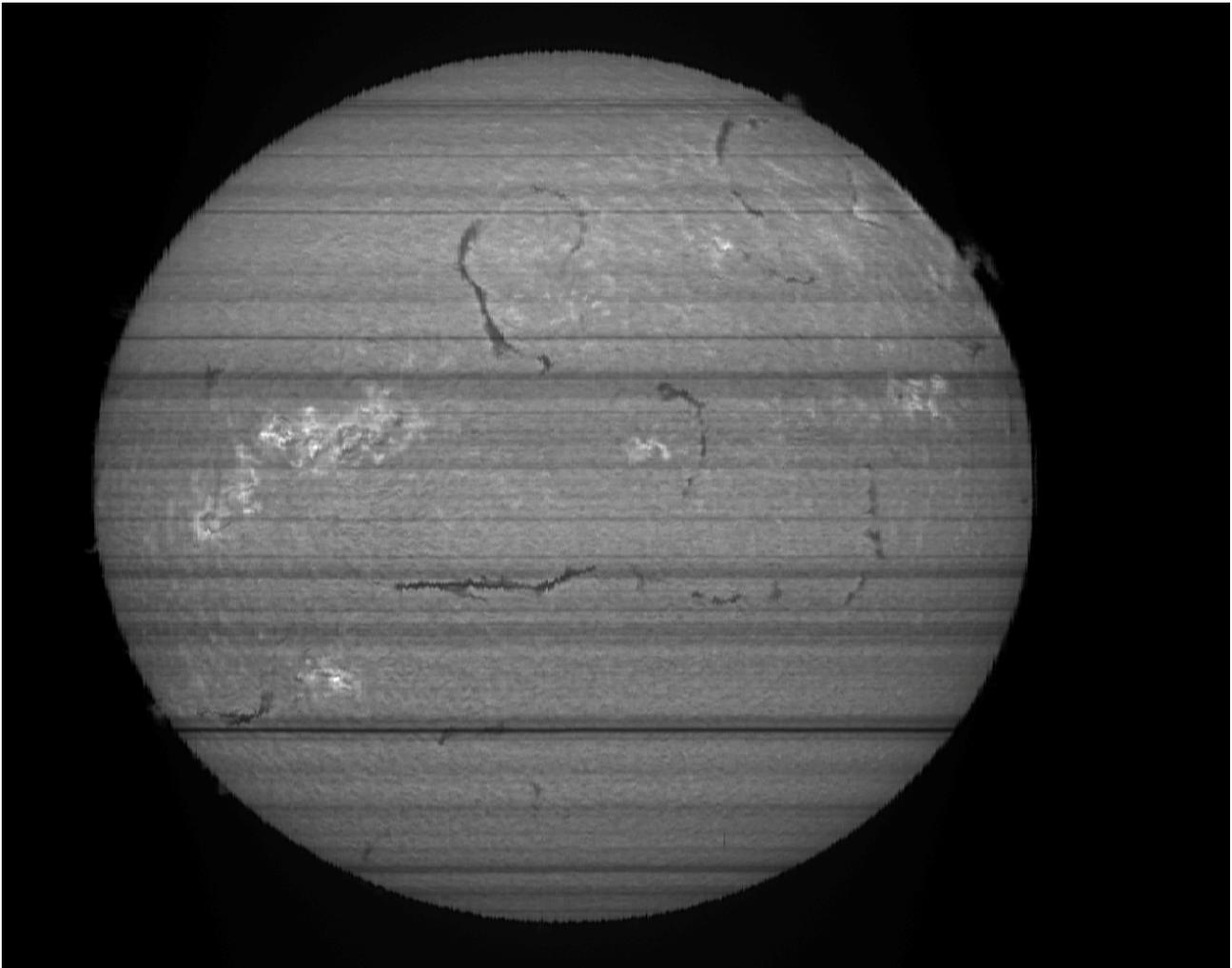
In pratica, tutti i diversi software non fanno altro che, una volta scelta la colonna di un pixel corrispondente ad un punto dello spettro del video (in genere il centro o i bordi di una riga d'interesse), affiancare a detta colonna tutte le altre, dello stesso pixel, dei frames che compongono il filmato. 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.

La procedura permette quindi la emulazione totale di uno spettroeliografo di tipo convenzionale, consentendo di associare a ciascun pixel dell'immagine dello spettro lungo l'asse X e quindi ad una data lunghezza d'onda di dimensioni molto piccole (con VHIRSS ed una camera DMK con pixel da 4.65 micron, è pari a circa 0,029 Å nel violetto e 0.019 nel rosso profondo) la corrispondente immagine solare. Mentre il formato dell'asse Y dell'immagine è quello nativo della camera usata, quello lungo l'asse X è dato dalla velocità di acquisizione scelta in rapporto alla durata della scansione: se, ad es, il formato immagine nativo è 960 x 1280 pixel, le immagini che si otterranno avranno una risoluzione di 960 X (To x Fps) dove To è il tempo di durata in secondi della scansione del disco solare e Fps è il numero dei frames per secondo di acquisizione. Ammettendo quindi che To = 160 sec e Fps = 7,5, il formato immagine dell'asse X sarà 160 X 7,5 = 1200. Avremo quindi, nell'esempio fatto, delle immagini solari 960 X 1200 pixel. Quest'ultima considerazione ci porta a riflettere sull'importanza della videocamera usata, il campo da essa coperto, la sua risoluzione ed il suo frame rate.

Nella figura che segue la visualizzazione del processo, dal video all'immagine finale.



L'immagine finale dà conto, oltre che della qualità delle ottiche, della qualità di lavorazione e della chiusura della fenditura, che, come si è detto, influenza in modo decisivo la risoluzione dello spettro e quindi la qualità dell'immagine solare stessa. Se si chiude al minimo possibile la fenditura si ottengono immagini molto incise e particolari minuti, ma appaiono anche righe trasversali di notevole entità (trasversalium) difficili da eliminare via software. L'immagine Ha che segue è la più evidente dimostrazione di tale situazione. Si tratta quindi di chiudere la fenditura al minimo compatibile con la qualità dello spettro, ovvero con la minimizzazione delle righe orizzontali dovute alle imperfezioni della fenditura ed alla diffrazione. E' una soluzione di compromesso, che tuttavia è indispensabile con fenditure commerciali a basso costo. Una soluzione più sofisticata, ma di non difficile realizzazione è quella di modificare le predette fenditure lavorandone le lame come si è detto in precedenza .



Il software

E' facile comprendere come il software di gestione dei video assuma un'importanza cruciale in tale categoria di spettroeliografi, in quanto atto a fornire l'immagine finale del disco solare nella riga d'interesse, secondo le modalità descritte in precedenza.

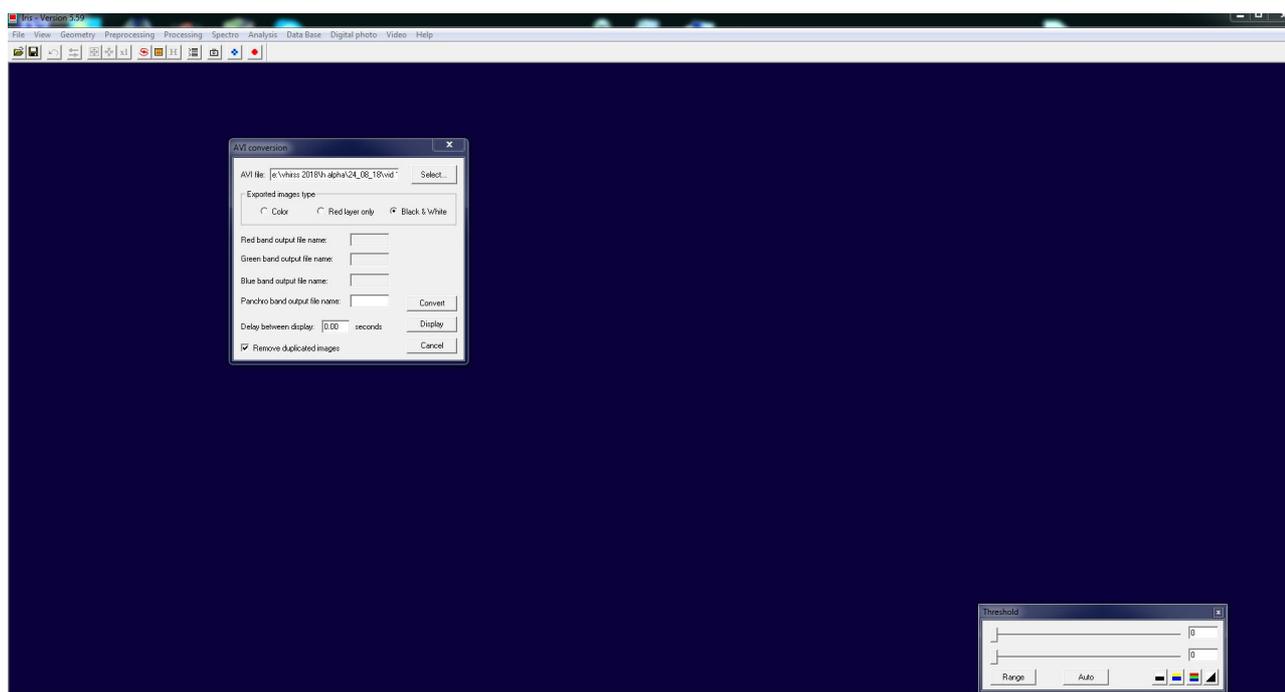
1 - SpecHelio Bas

L'astrofilo francese Daniel Deforneau fu il primo ad avere l'idea di introdurre, con uno spettroeliografo basato su uno spettroscopio tradizionale, la spettro eliografia amatoriale digitale. La sua abilità si estese anche all'aspetto informatico, con la creazione di un programma ad hoc in Visual Basic per la conversione di una serie di files BMP in un'immagine di mosaico finale. Occorre tuttavia convertire i files video AVI in files BMP, ma esistono alcuni programmi free che lo fanno, come IRIS e Virtual Dub. Personalmente non ho mai provato tale programma, ma viene comunque consigliato di leggere le istruzioni ed il tutorial prima dell'installazione.

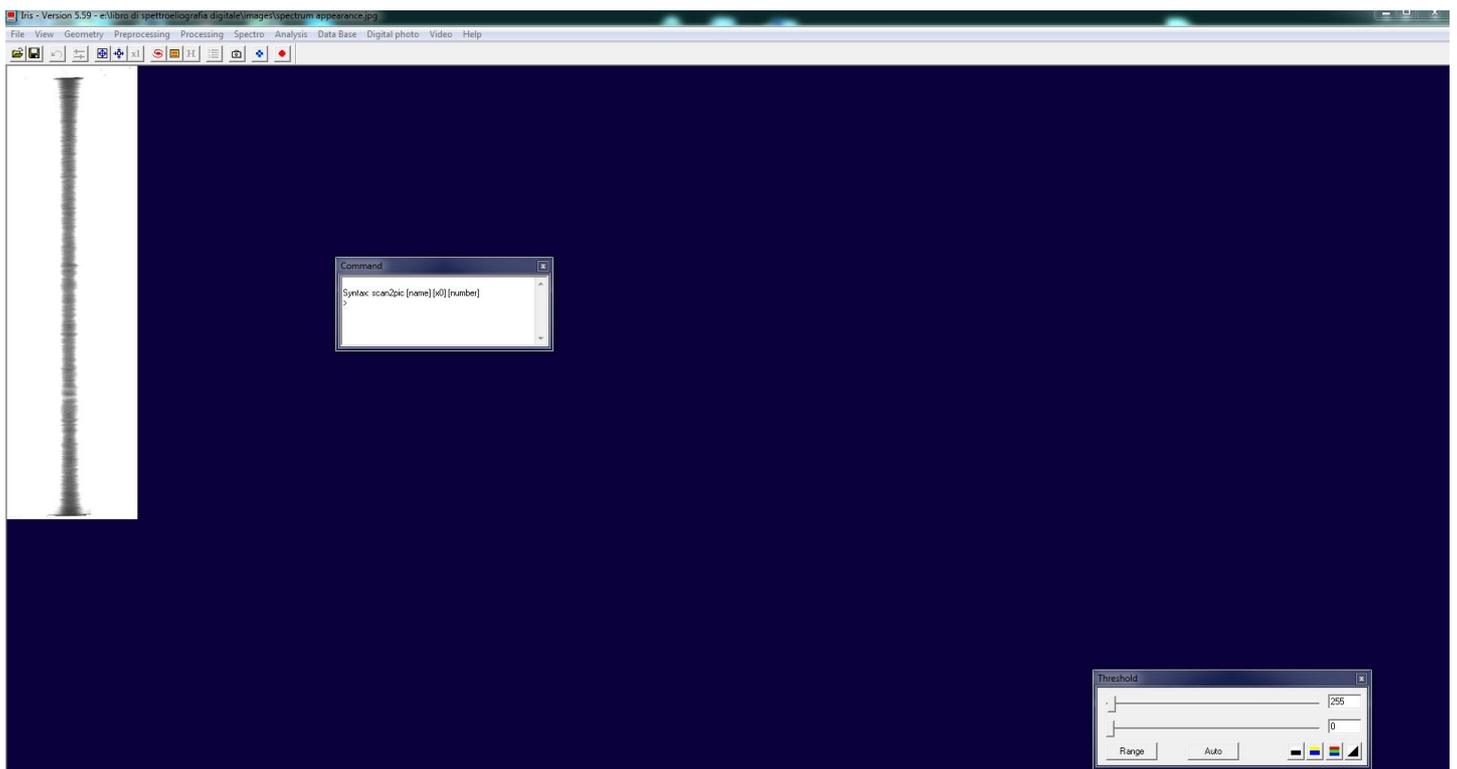
<http://astrosurf.com/cieldelabrie/sphelio/program/>

2 - IRIS

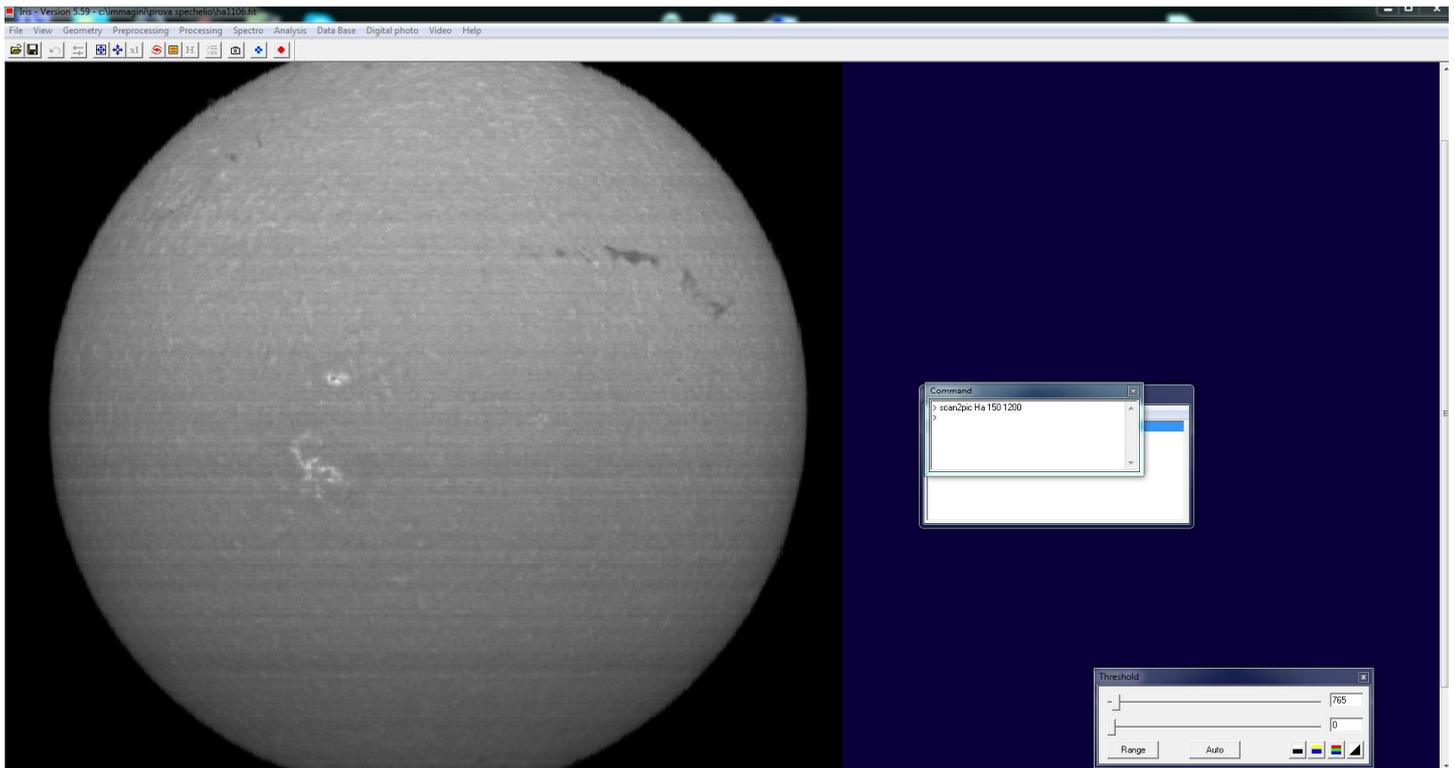
Il famoso ed utilizzatissimo programma di C.Buil permette, con alcune routines ed un comando specifico, la conversione dei files AVI in fits monocromatici. Detta conversione è opportuno venga fatta in una cartella ad hoc del disco C (es. C/SpecHelio) selezionandola come working directory e spostando in essa il file AVI.



I files Fits ottenuti dalla conversione corrispondono in genere al numero di frames generati dal video, salvo alcuni persi: ammettendo che questi siano 1200, se ne seleziona e carica nel programma uno centrale, si esamina, e si sceglie una colonna corrispondente ad un pixel del punto della riga d'interesse (generalmente quello centrale). Si lancia quindi il comando da tastiera "scan2pic" e si effettua la somma dei pixel per tutti i frames ottenendo l'immagine finale.



Il comando da tastiera reca la seguente sintassi: "scan2pic [name] [x0] [number]" dove [name] è il nome di file, [x0] è il pixel corrispondente alla colonna scelta, e [number] è il numero totale delle immagini effettivamente convertite in Fits da IRIS, che appare in una piccola finestra. Quindi, ammettendo di aver ottenuto dalla conversione del file AVI (BW) 1200 Fits nell'apposita cartella, e di averli nominati "Ha", se ne carica uno centrale, come nella figura soprastante (ad es. il 650, che mostrerà tutta la riga), si effettuano eventuali operazioni di rotazione e eventualmente di slant e smile, si sceglie il pixel X corrispondente alla colonna del centro riga (od eventualmente altro); immaginiamo sia il 150 (indicato nella finestra in basso a destra del programma) e si lancia allora il comando : "scan2pic Ha 150 1200". Il programma effettuerà la messa a registro di tutte le colonne del pixel 150 per i 1200 Fits, ottenendo il mosaico dell'immagine finale corrispondente al pixel selezionato.



Tale comando non sembra gradire i nomi lunghi dei files, ed è quindi consigliabile usare una working directory breve (es. C/SpecHelio)
 La routine funziona molto bene, ed i soli punti negativi sono, a mio avviso, il numero di files generati e salvati che occupa parecchio spazio su disco, ed il fatto che si può agire solo su un singolo pixel, sottocampionando l'immagine finale.

3 - Spectral Line Merge

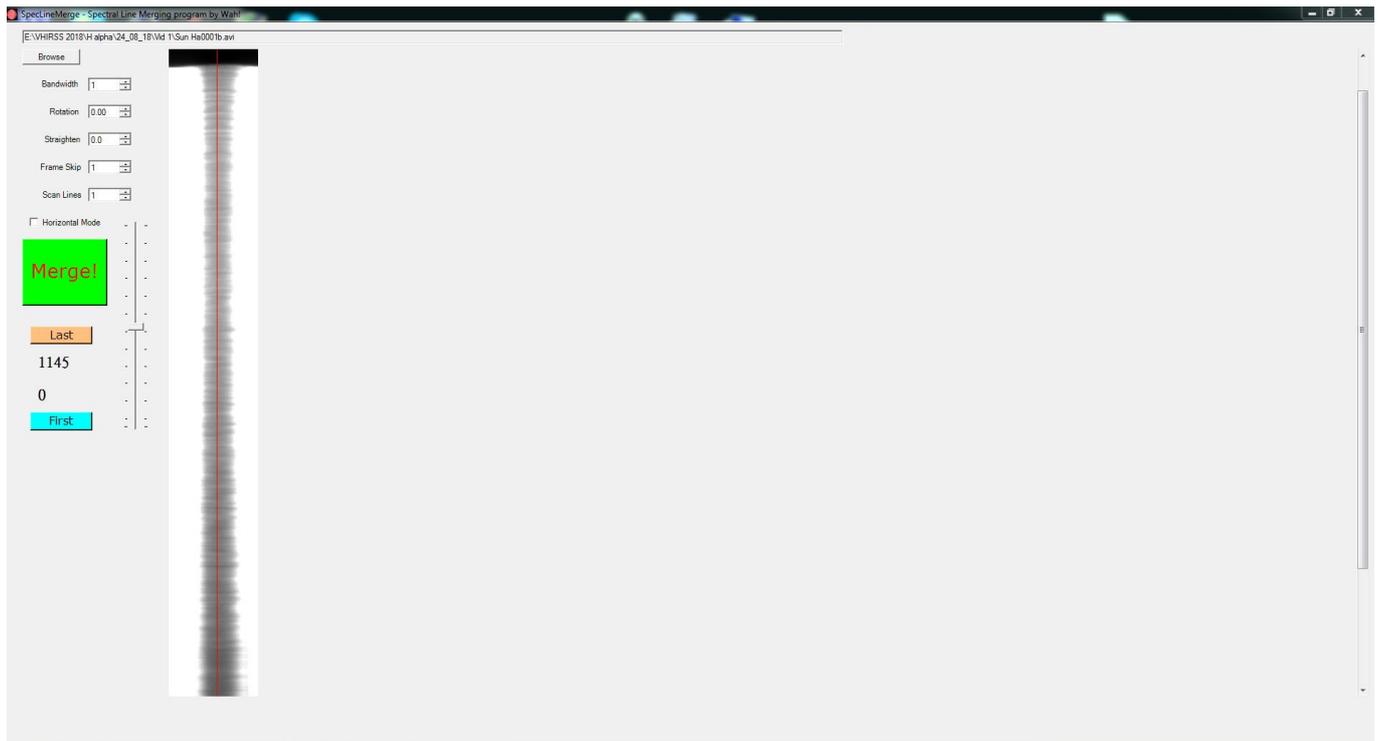
L'astrofilo cinese Wah-Heung Yuen ha realizzato un programma specifico per spettroeliografia digitale, con molte interessanti caratteristiche, nonostante la sua interfaccia estremamente semplice e "user friendly".

<http://www.hkastroforum.net/viewtopic.php?t=29425>

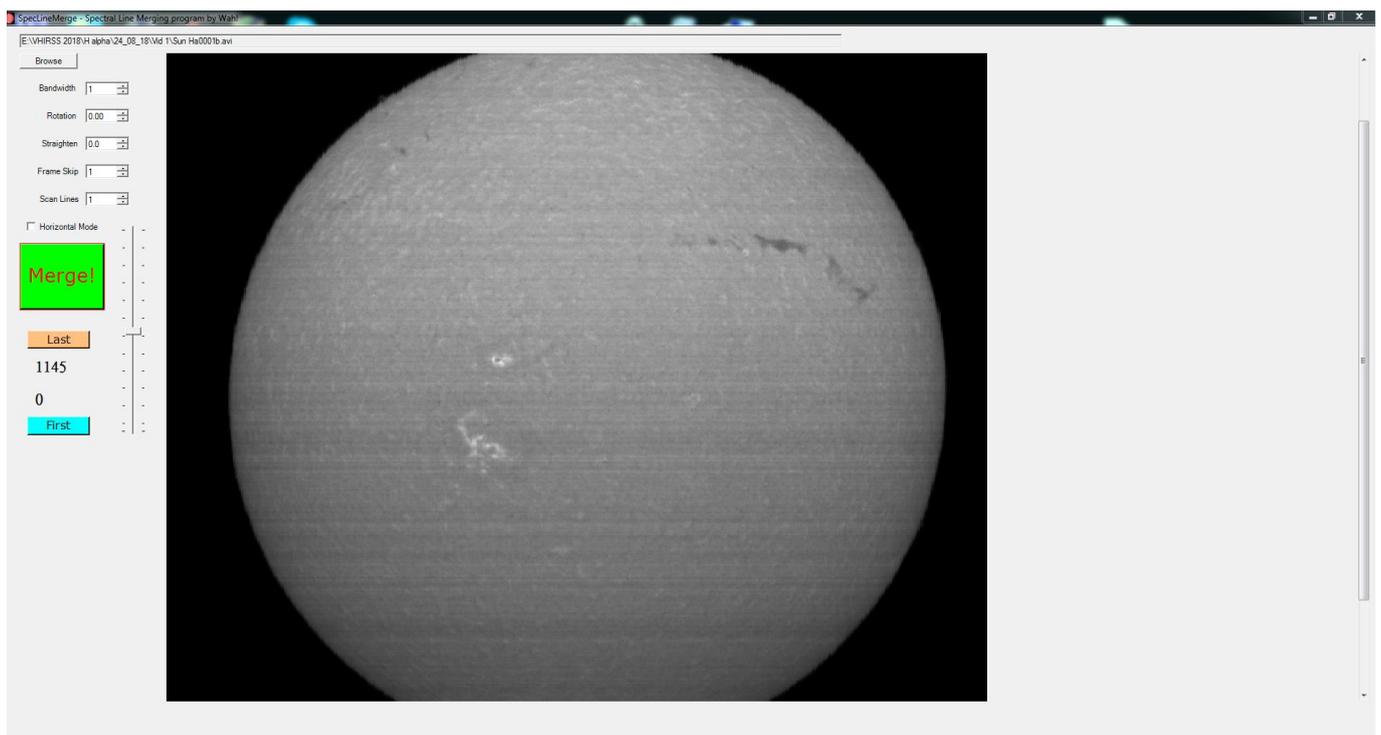
L'ultima versione scaricabile dal forum Solarchat:

<https://solarchatforum.com/viewtopic.php?f=7&t=21608>

Il programma richiede tuttavia un pretrattamento dei files AVI (cropping) con il noto programma freeware Virtual Dub. In pratica occorre caricare il file su VD operando un crop lungo l'asse X ed Y (Video>filters>add>null trasform>cropping) quindi salvarlo per operare la sua trasformazione in immagine con Spectral line merge.



La schermata di Spectral Line Merge: posizionando la riga rossa sul pixel della riga desiderato, il programma produrrà l'immagine finale sulla colonna corrispondente a tale pixel (figura seguente). Tuttavia, a differenza di IRIS, il software può selezionare una banda più larga di 1 singolo pixel, ovvero effettuare la conversione di svariati pixel contigui a quello scelto ottenendo una serie di immagini con benefici sul campionamento finale. Il programma inoltre permette la rotazione della riga e l'eventuale correzione per smile (curvatura).



Spectral Line Merge è quindi un programma semplice e completo, con un'interfaccia utente ridotta ed amichevole. È attualmente il mio programma preferito per la produzione delle immagini spettroeliografiche: l'unico inconveniente, se tale si può chiamare, è la procedura a mio avviso un po' troppo laboriosa per la flat di eliminazione del trasversalium che l'autore descrive nel suo tutorial.

4 - BASS Project

BASS project è un noto e completo programma sviluppato da John Paraskeva (UK) per la spettroscopia amatoriale che possiede anche delle routines apposite, alla cui estensione ho peraltro collaborato, per l'estrazione ed il trattamento delle immagini spettroeliografiche. Il programma è attualmente alla sua versione 1.9.8 beta. Per il download andare a:

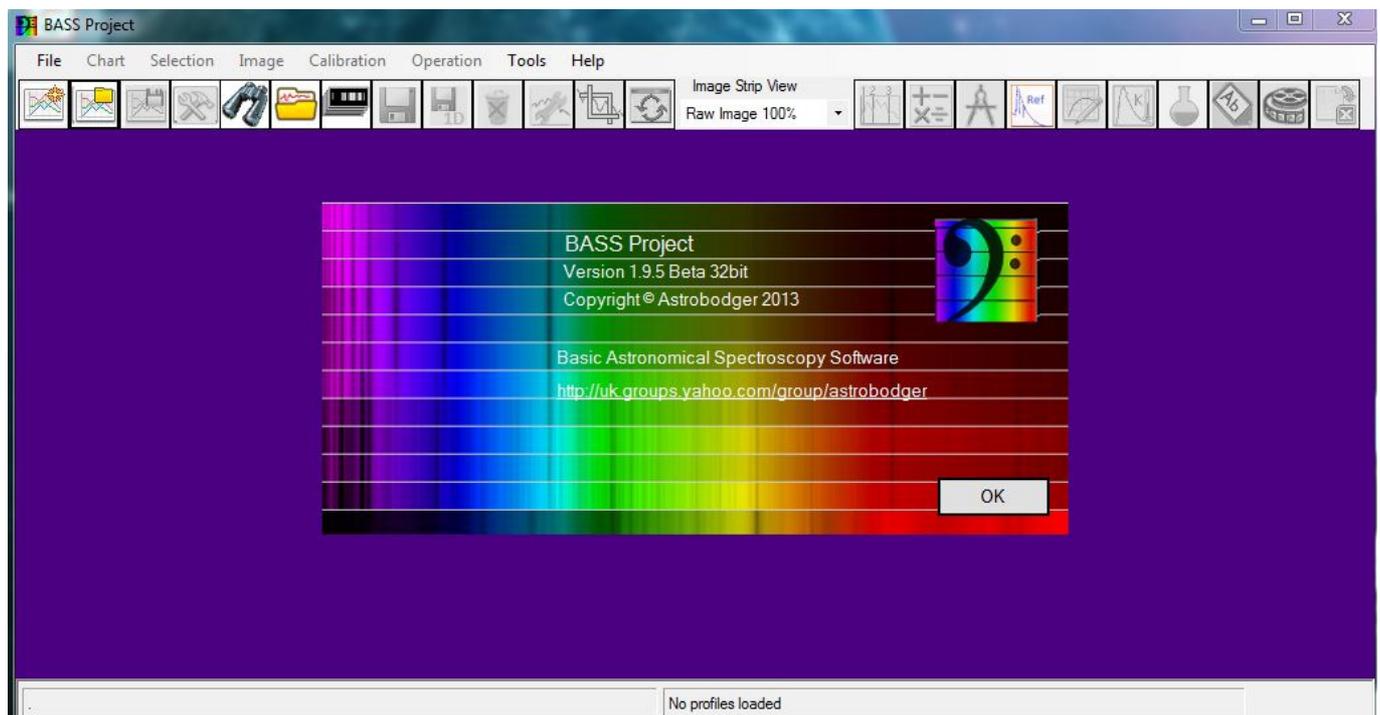
<https://www.dropbox.com/s/utayfo60g9kqgjf/BASSProject198b7.exe?dl=0>

(32 bit)

<https://www.dropbox.com/s/ntbd7uavfdejiy8/BASSProject198b7-64.exe?dl=0>

(64 bit)- Per info:

<https://uk.groups.yahoo.com/neo/groups/astrobodger/info>

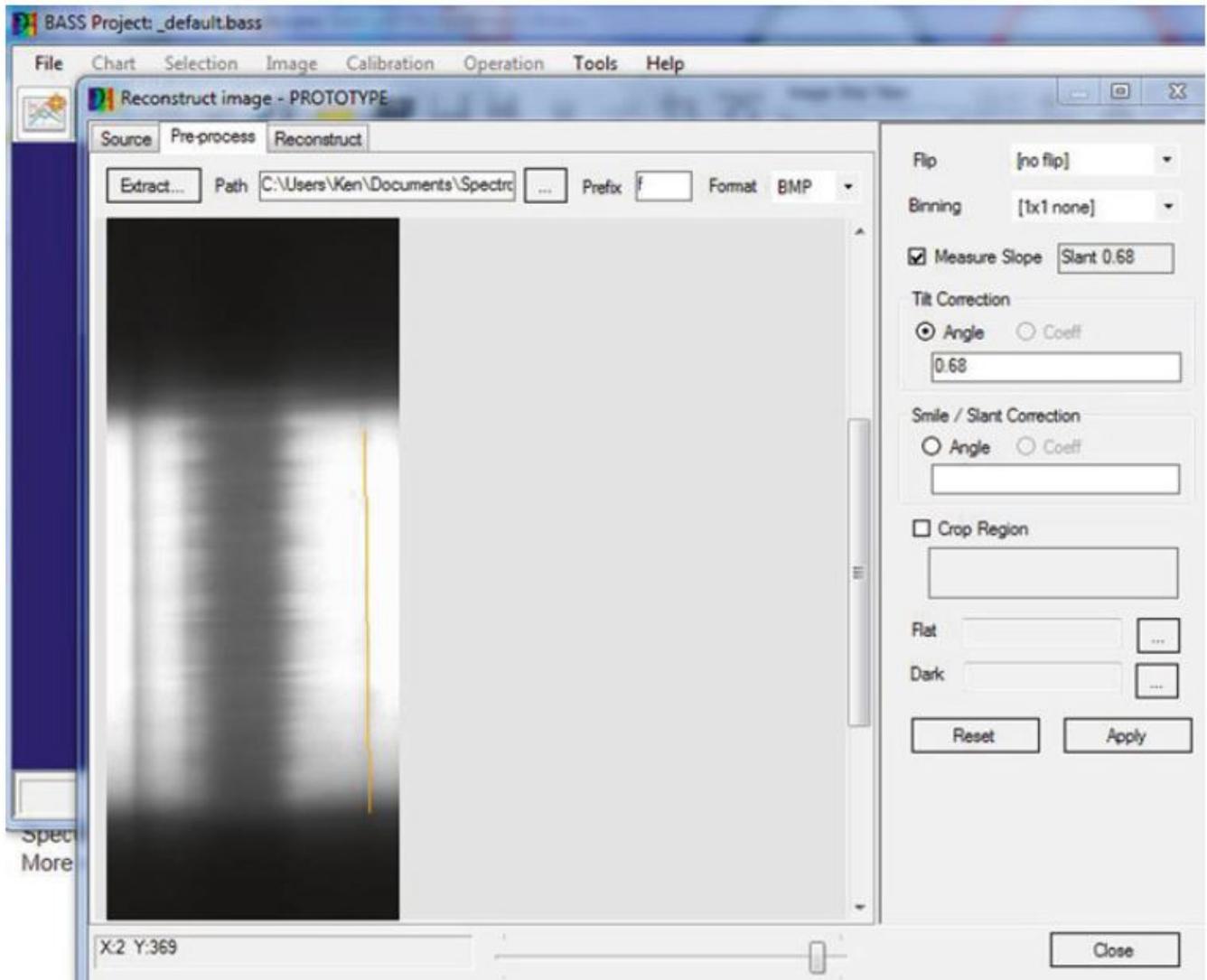


La procedura da seguire è la seguente:

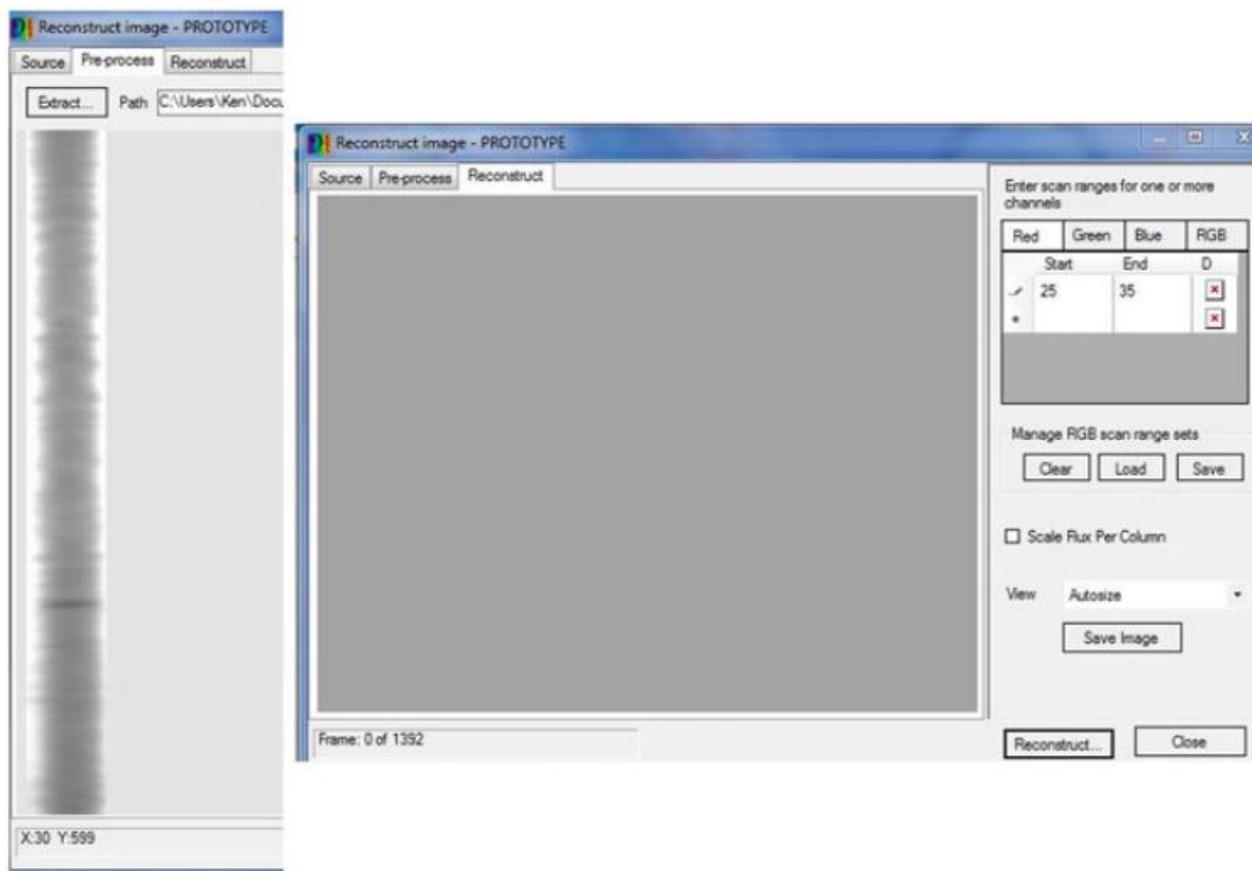
Nel menù TOOLS aprire la routine "Reconstruct" ed importare il file AVI da elaborare.

Usando lo slider, caricare un frame nella quale sia ben visibile la riga in assorbimento dai interesse, ed usare ancora lo slider per andare su un frame che riporti visibile il trasversalium per correggere il tilt, ed un'altra riga vicino a

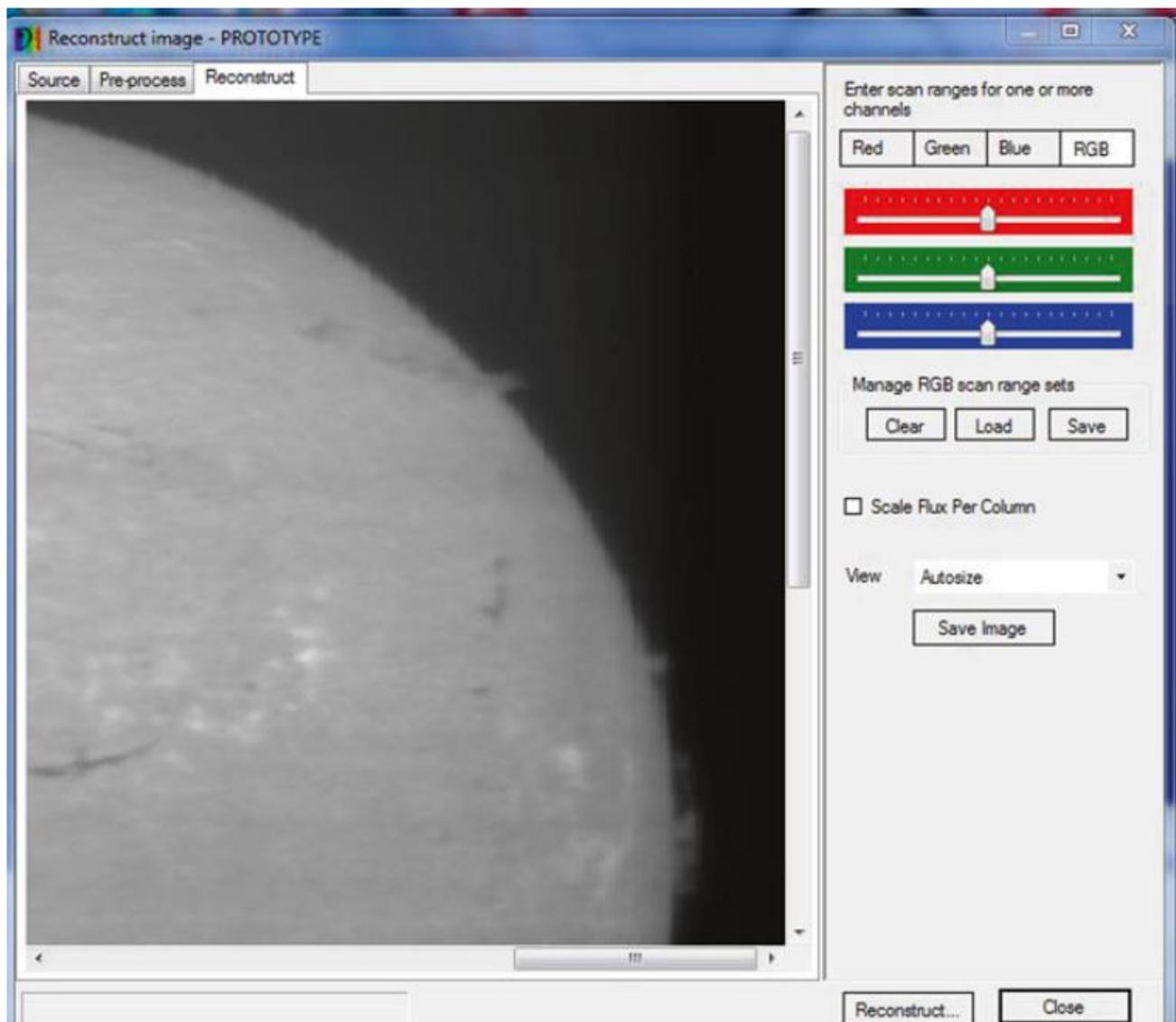
quella d'interesse per correggere eventualmente lo slant, se presente, quindi premere il bottone "Apply".Immediatamente dopo andare su "Extract" ed estrarre i frames del video nella directory selezionata.In tale punto BASS si comporta come IRIS ed estrae tutti i frames del video. Porre il cursore al centro della riga di interesse e prendere nota del valore X del pixel centrale (ad es. 30).



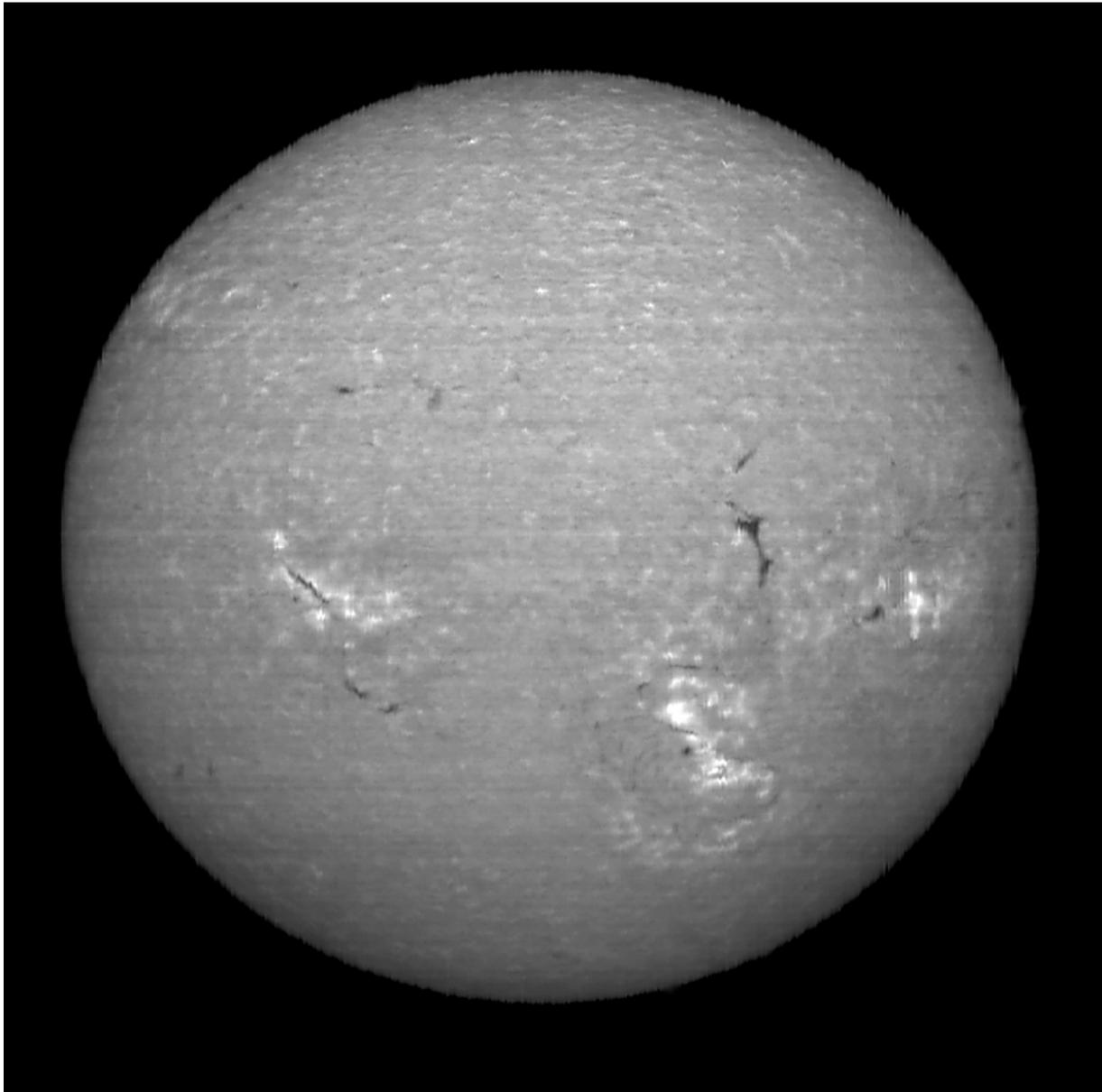
Andare quindi sul menu "Reconstruct" (immagine seguente) ed indicare, nella finestra "enter range for one or more channels" i pixel relativi alle colonne che verranno utilizzate nell'immagine.Se, come detto prima, il pixel centrale della riga è il 30, allora scrivendo 30-30 si utilizzerà solo questo nella ricostruzione, mentre scrivendo 25-35 si utilizzeranno 10 pixel e l'immagine finale sarà meglio campionata.



Devo dire che la funzionalità della routine, a prima vista un po' macchinosa, è molto buona e rende immagini di buon livello: l'unica pecca sono, a mio avviso, i tempi di elaborazione in computer di media potenza forse un po' lunghi, superiori a quelli di IRIS (che tuttavia permette la ricostruzione su un solo pixel) e, ancor di più, di Spectral Line Merge che è sicuramente il più veloce di quelli esaminati. Una volta fatta la mano con la procedura BASS funziona comunque bene ed ha inoltre a disposizione un accurato manuale nel quale sono esplicitate tutte le sue numerose funzioni, dedicate non solo alla spettroeliografia, ma alla spettroscopia in generale. Esso prevede anche una procedura di soppressione del trasversalium con una flat sintetica.



Qui di seguito , un'immagine H alpha ottenuta da chi scrive con l'elaborazione di un file AVI con BASS, senza applicare alcuna flat: il risultato è più che buono. La caratteristica che distingue BASS dagli altri software citati è che il medesimo costituisce, come accennato, un ottimo e completo software di spettroscopia, che chi scrive spesso usa in complemento con Visual Spec per il trattamento e la elaborazione degli spettri stellari e del cielo profondo.



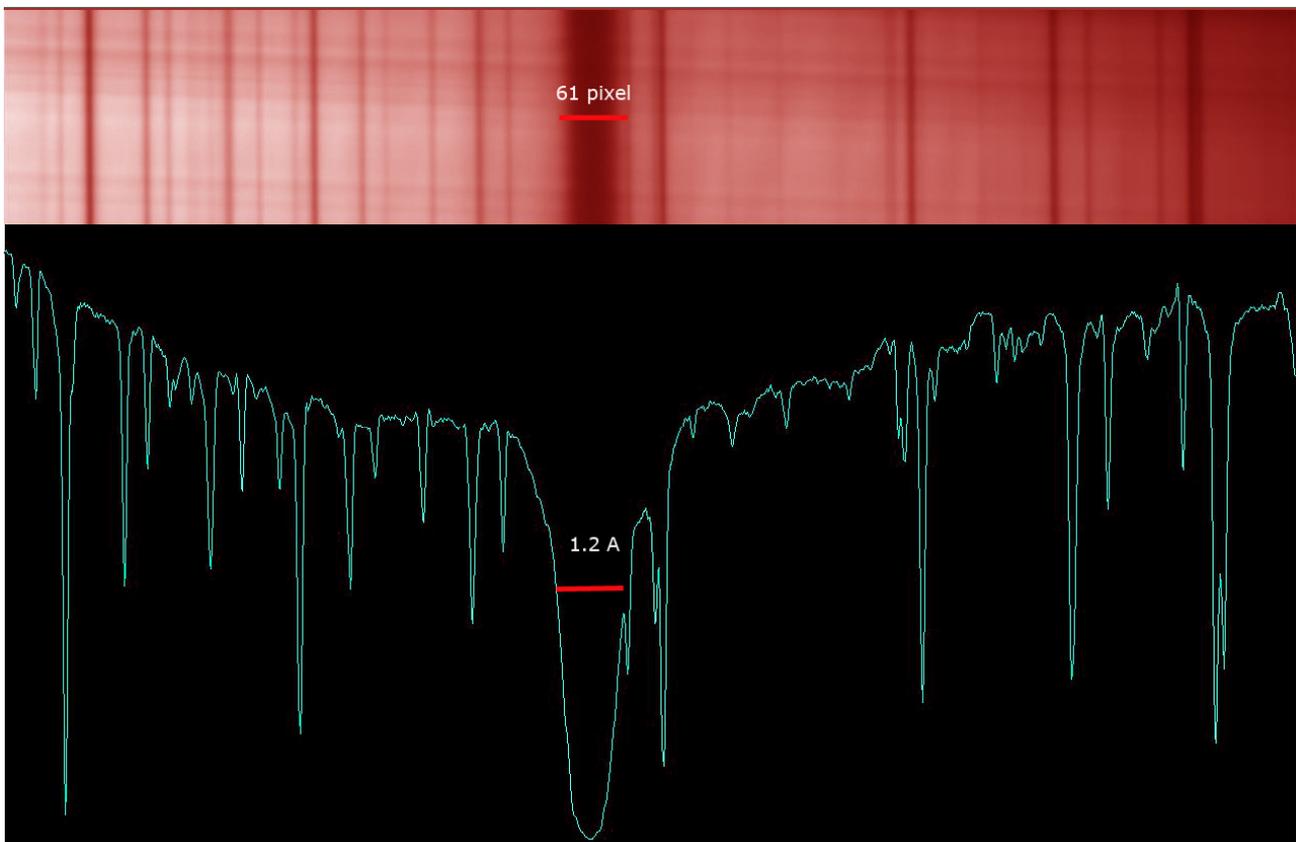
Risultati ottenibili in spettroeliografia digitale don uno spettroeliografo Littrow a doppio passaggio

Andiamo ora ad esaminare alcuni risultati ottenibili nell' imaging solare a tutto disco con uno spettroeliografo auto costruito di tipo Littrow come quelli dei quali si è precedentemente discusso. Prima, tuttavia, è bene esaminare alcuni aspetti non a tutti noti.

La prima domanda che il neofita di osservazione solare si pone è del tipo: "ma a cosa potrebbe servire uno spettroeliografo, dato che le immagini in luce Halpha e CaIIK che forniscono i filtri commerciali sono molto belle e dettagliate, ed esteticamente superiori a quelle spettroeliografiche?".

La risposta è semplice: il punto di forza della spettroeliografia è l'elevatissimo livello di risoluzione spettrale raggiungibile, anche con strumenti modesti come quelli di cui si è parlato: per chiarire ciò valga la seguente considerazione: un normale filtro Halpha commerciale amatoriale possiede in genere una banda passante tra 1 \AA e 0.3 \AA ; oltre tale limite i costi, già molto elevati, divengono proibitivi ed accessibili solo agli utilizzatori professionali.

Spettroeliografi come VHIRRS o Solarscan raggiungono senza alcun problema mediamente una risoluzione oscillante tra 0.03 e $0.019 \text{ \AA} / \text{pixel}$ (a seconda della lunghezza d'onda) con una camera come le DMK, con pixel da 4.65 o 4.4 \mu m . In pratica, quindi, ipotizzando la risoluzione media di 0.025 \AA , questa è pari a 40 volte quella di un filtro da 1 \AA e 20 volte uno da 0.5 \AA . Ma la cosa non finisce qui: l'elevatissimo livello di dispersione per pixel fa sì che la riga H alpha, ad es., a $0.0195 \text{ \AA} / \text{pixel}$ appaia larga ben 61 pixel sullo schermo di un PC, come si osserva in figura, con una banda passante ben 51 volte più stretta di un filtro da 1 \AA e con un livello di risoluzione dell'immagine finale 51 volte superiore !.



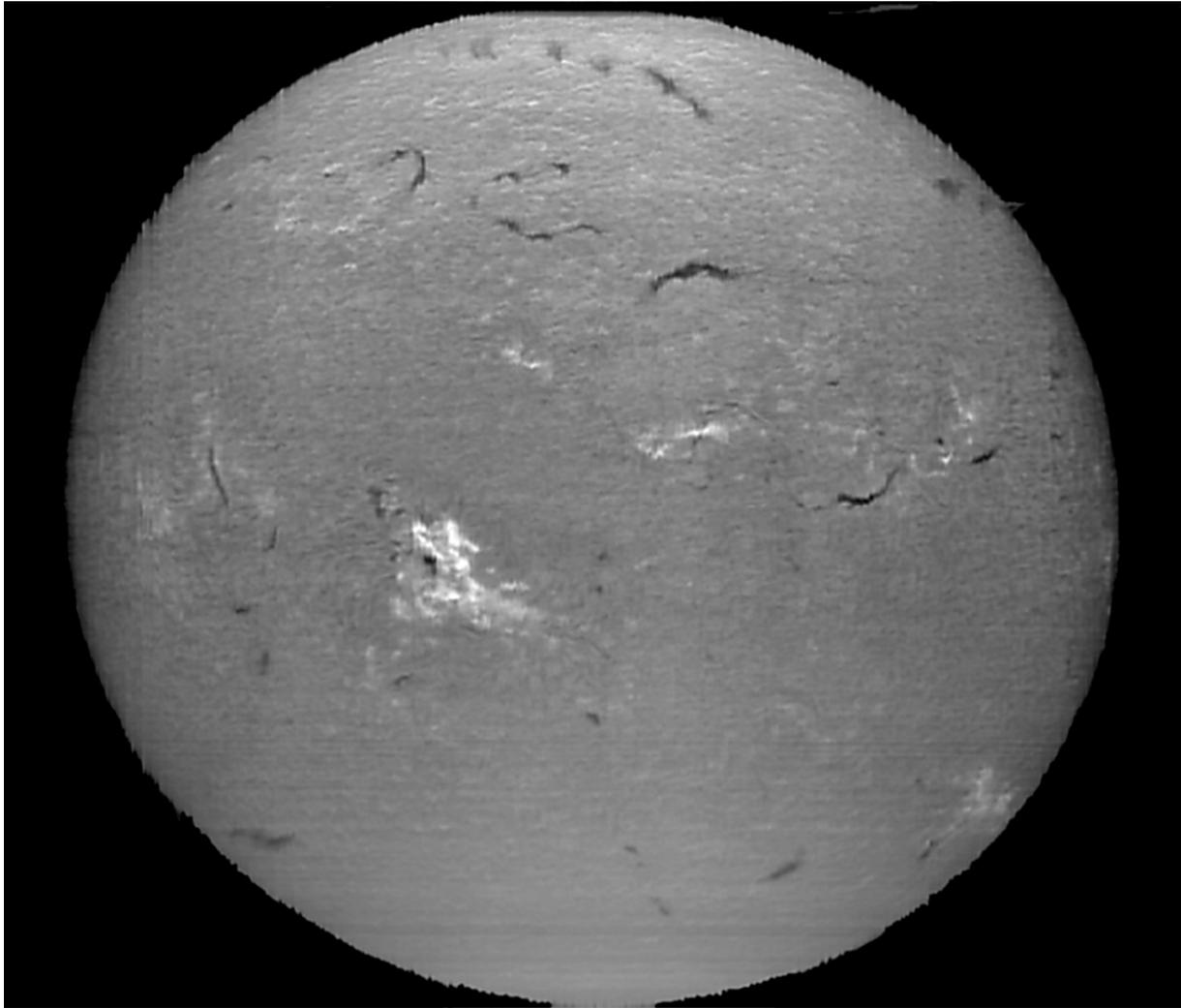
Questo ha l'importantissima conseguenza che è possibile posizionare la colonna di 1 pixel di acquisizione dell'immagine a 30 pixel di distanza dal centro della riga, ottenendo in definitiva ben 61 immagini della riga H alpha dal centro alle ali:1 al centro,30 verso il blu e 30 verso il rosso.Identica cosa per la riga CaIik, CaII H e così via .Ma questo ci permette di andare dalla bassa cromosfera,ai confini con la fotosfera, sino alla parte più alta di questa, operando quindi una vera e propria tomografia delle cromosfera stessa, cosa impossibile con i filtri commerciali.

Inoltre tale particolarità ci apre le porte allo studio scientifico della cromosfera solare, come lo shift doppler, la misurazione dei campi magnetici solari, la spettroeliografia differenziale, senza contare che lo strumento serve anche come mero spettroscopio, per dimostrazioni e didattica.

E' un mondo nuovo , sinora esplorato solo dai professionisti con strumentazioni di costo troppo elevato per essere accessibile agli amatori, che si apre all'astrofilo dotato di tenacia e buona volontà, almeno sino a quando non verranno immessi in commercio strumenti del tipo di quelli descritti.Ma ora vediamo alcune delle osservazioni possibili.

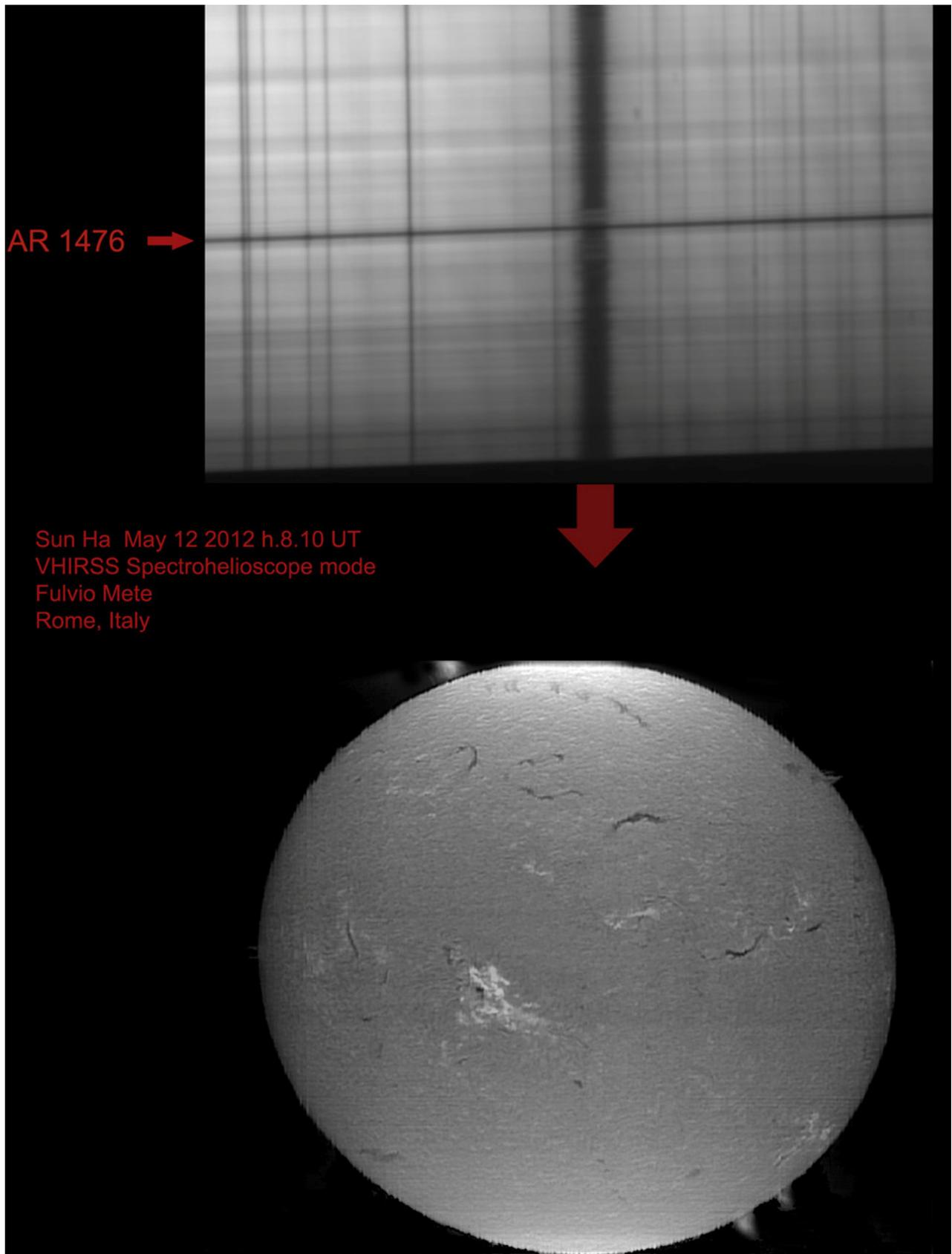
H alpha 6562.8 Å

Quella che segue è un'immagine solare presa con VHIRSS il 12 maggio 2012, in un periodo di stabilità atmosferica e buon seeing.Media delle immagini ottenute da 22 pixel distribuiti ai lati del centro riga.Incredibile il numero di particolari visibili.



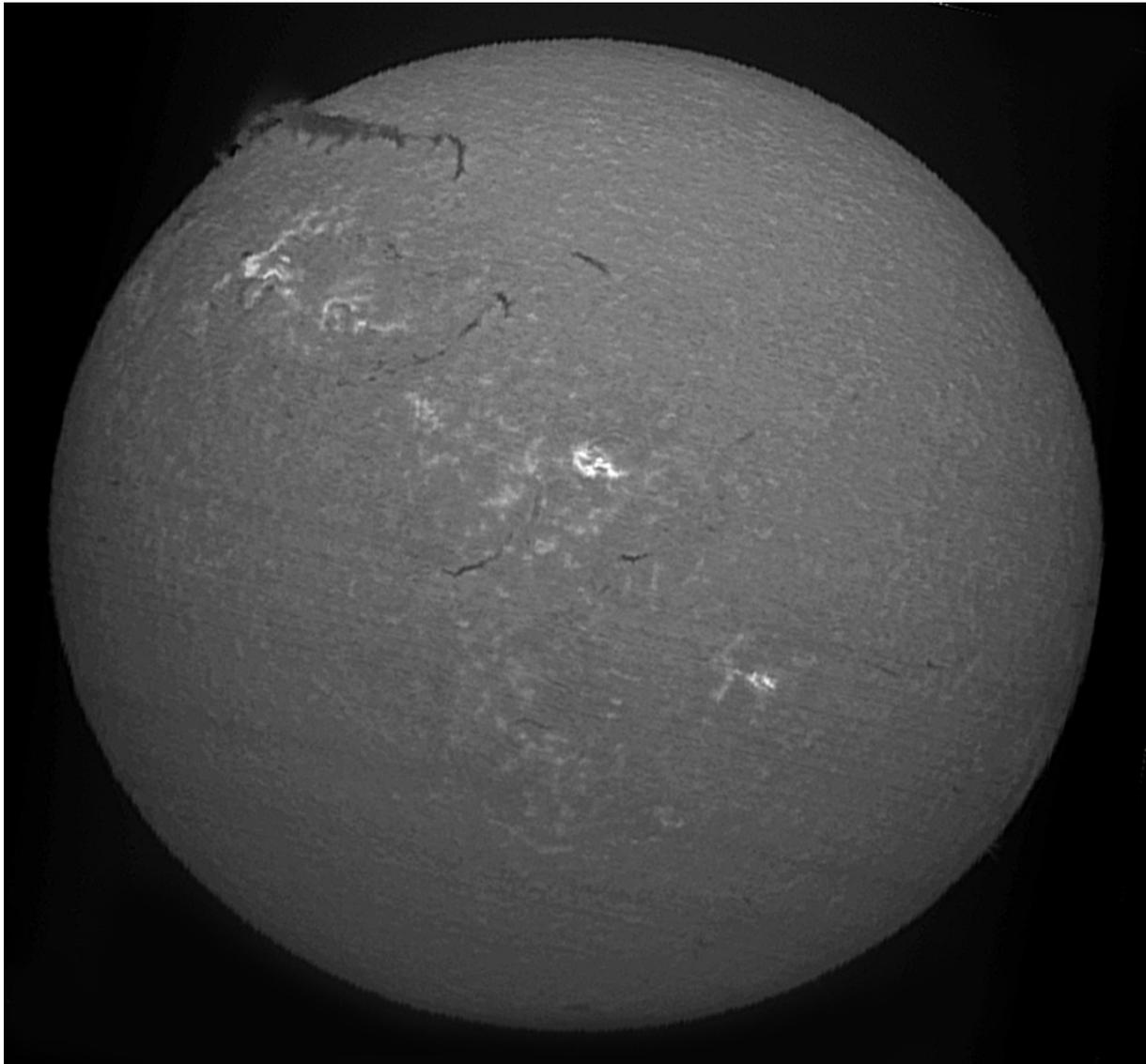
Tale immagine può ritenersi esemplificativa della differenza tra spettroeliografia e imaging amatoriale tradizionale: i particolari visibili nella prima sono nettamente superiori a quelli della seconda, mentre la qualità delle immagini è inferiore.

Ciò comporta che da un punto di vista meramente estetico l'imaging con filtri solari a banda strettissima è vincente, mentre da quello scientifico la spettroeliografia è superiore.

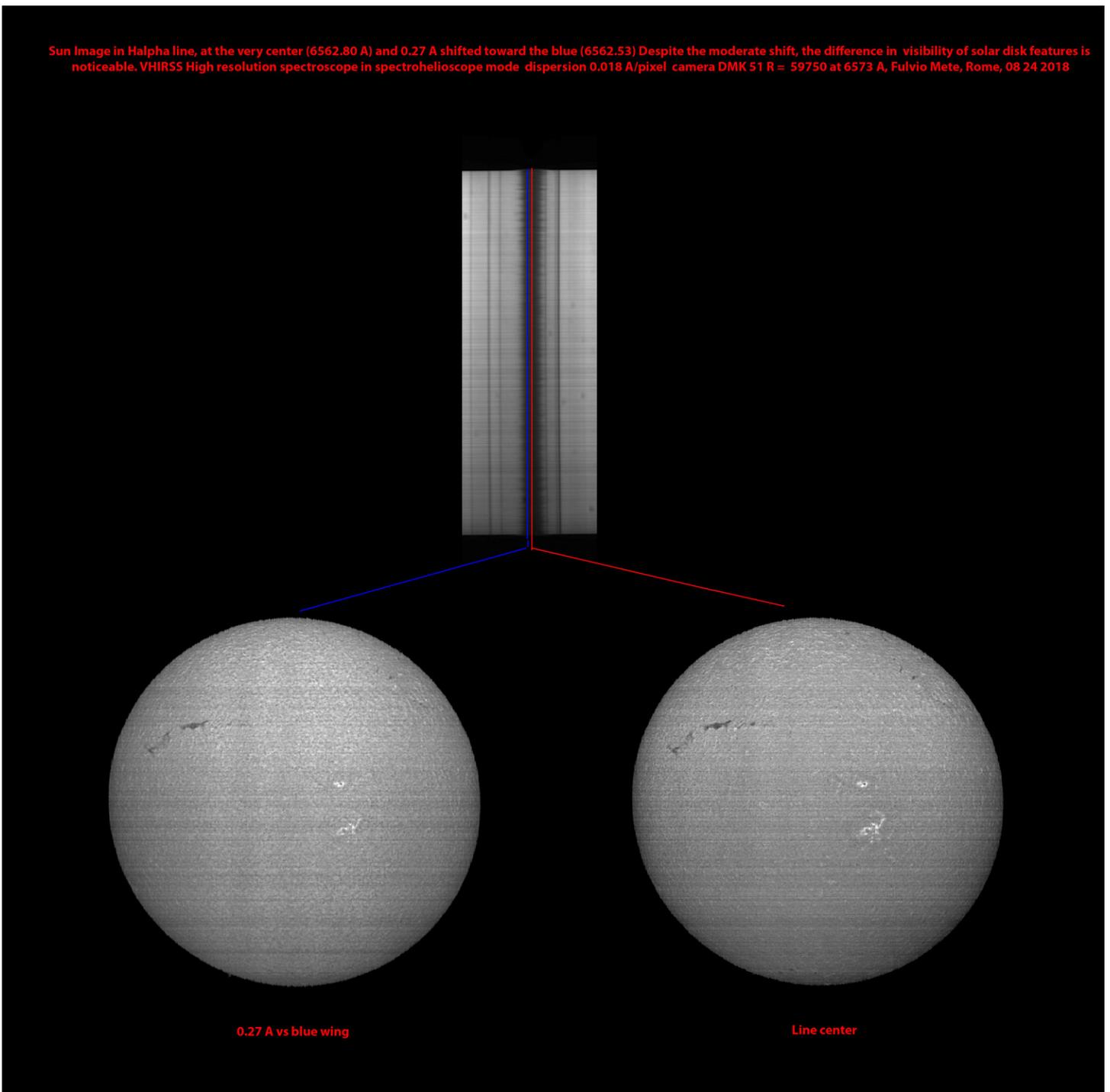


La stessa immagine con le protuberanze meglio osservabili

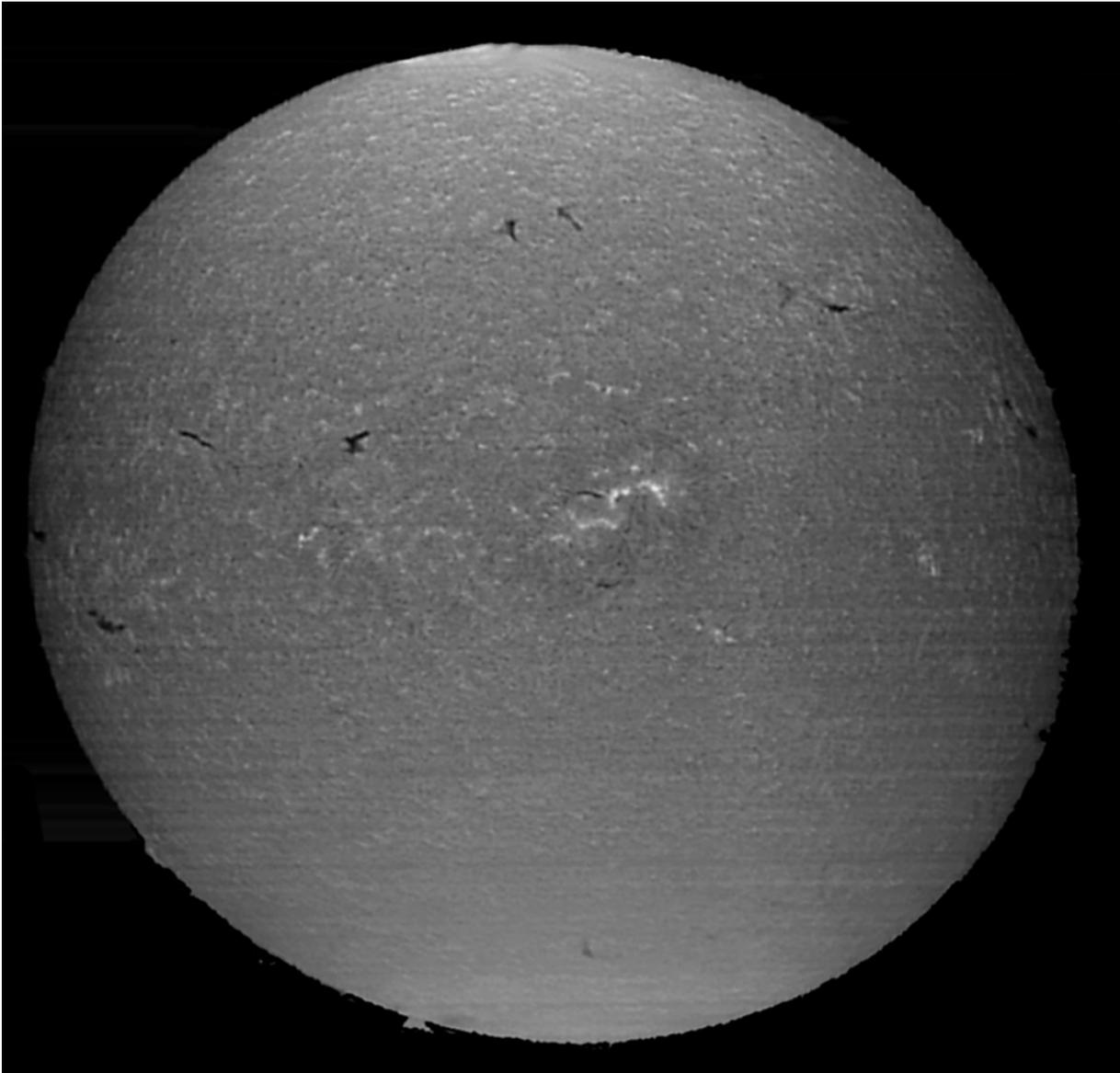
Un'immagine caratteristica del sole con una gigantesca protuberanza che si estende dal disco, visibile come filamento, al bordo, somigliante vagamente ad un millepiedi.



L'immagine sottostante dimostra invece il cambiamento dell'aspetto del disco solare in luce H α ripreso a soli 0.27 Å di differenza rispetto al centro della riga, nell'ala verso il blu (6562.53 Å), ed al centro riga (6562.80 Å). Si tratta di un solo quarto di Å circa, ma è già sufficiente per visualizzare i cambiamenti nella visibilità dei particolari cromosferici passando dall'ala al centro riga. Ciò in quanto andando dal continuo verso le ali e poi verso il centro riga si passa dai confini con la fotosfera alla bassa e quindi all'alta Cromosfera.

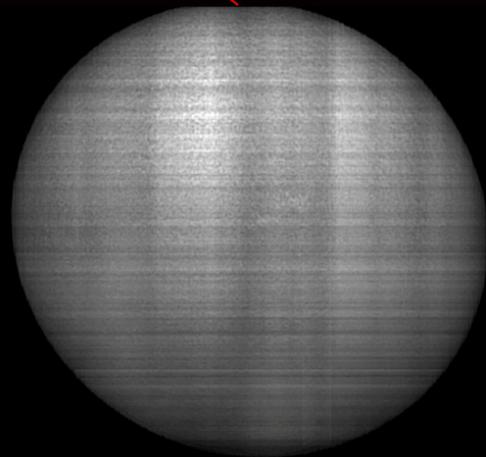
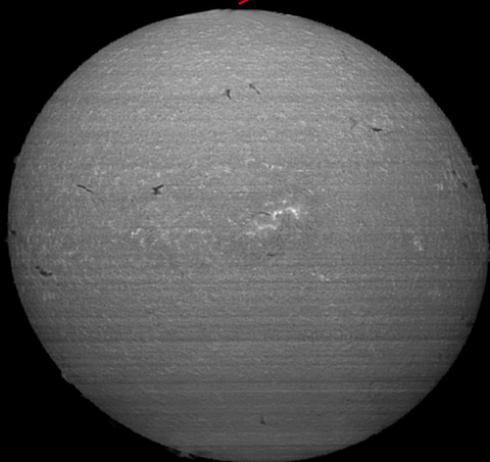
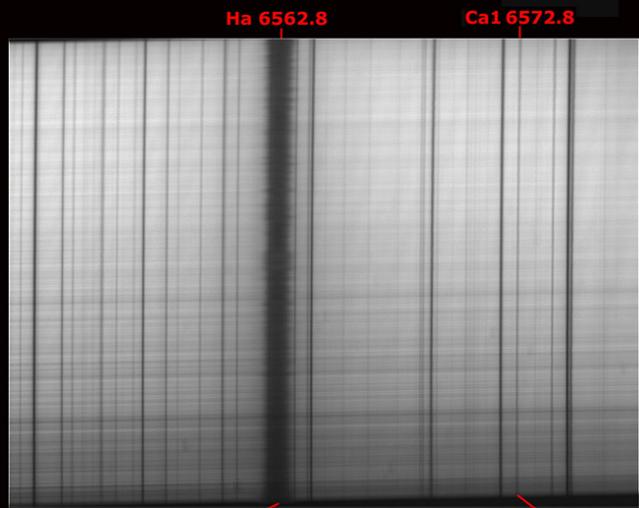


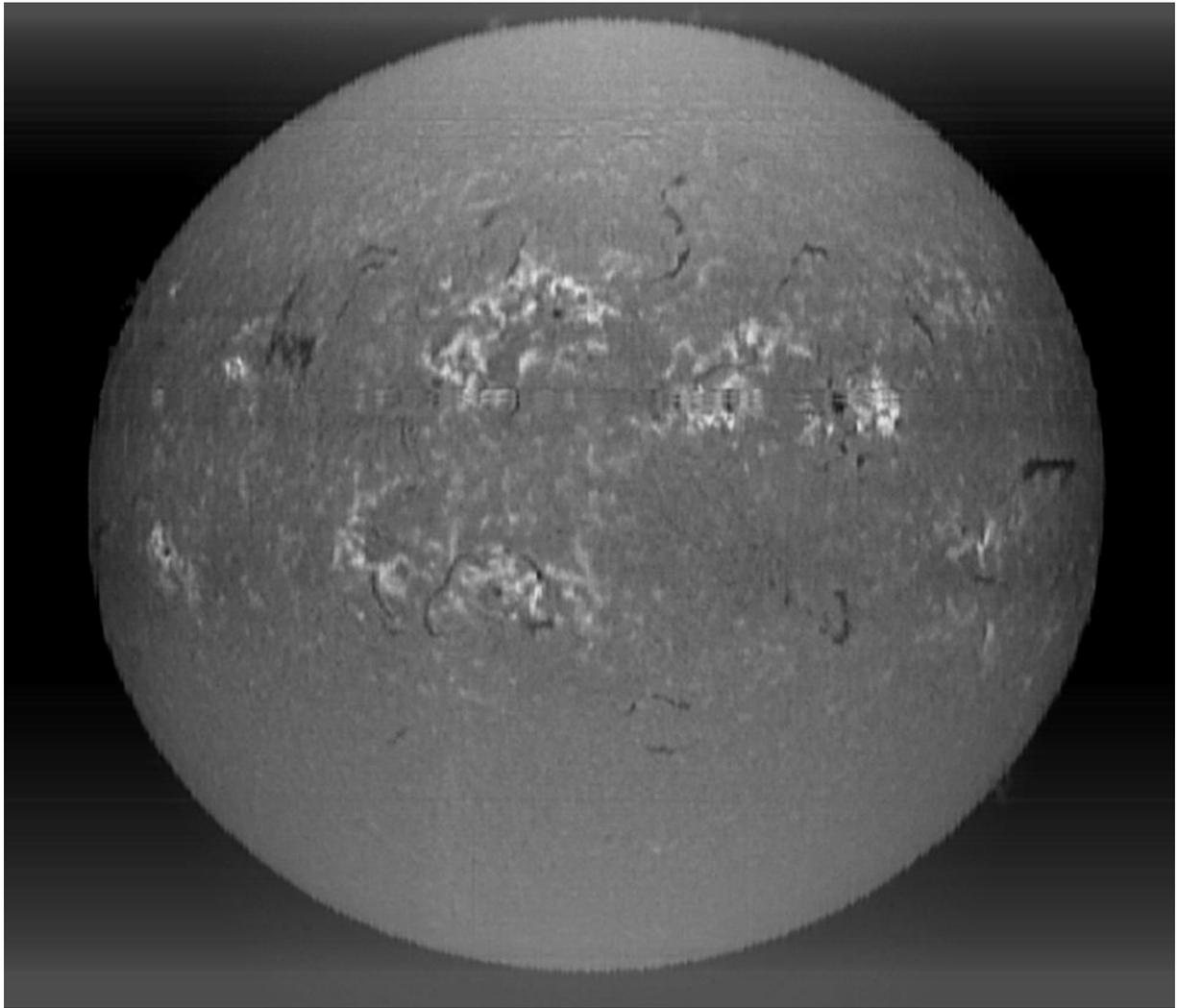
Un'altra immagine H alpha di VHIRSS del 21 agosto 2016, cui è stato applicato un flat sintetico per eliminare il trasversalium.



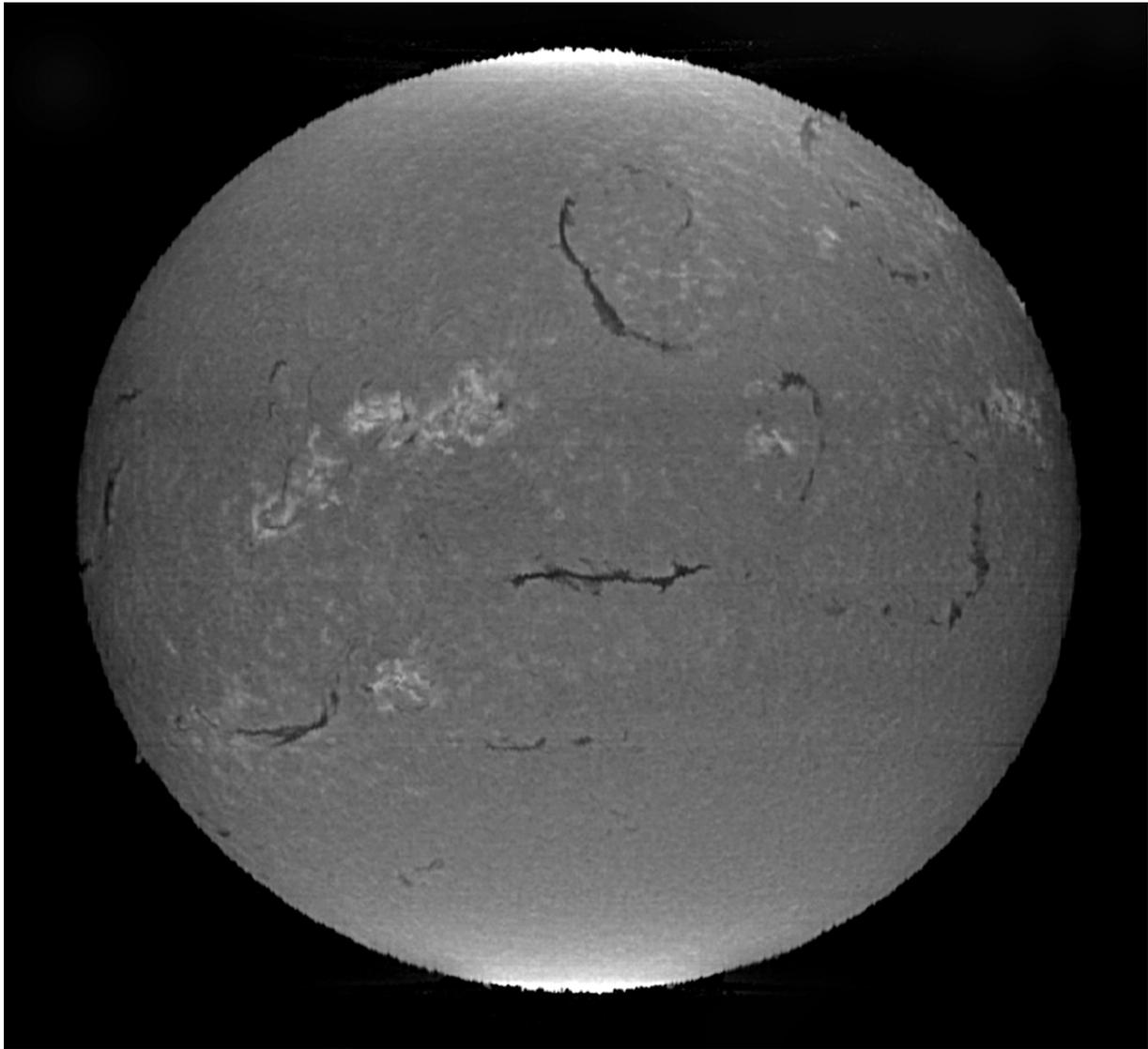
Nella composizione che segue, l'immagine precedente è stata raffrontata con una in luce Calcio neutro (CaI). Si osserva la scarsa sensibilità di tale elemento ai campi magnetici delle regioni attive, al contrario di quanto avviene per il Calcio ionizzato una volta (CaII).

Comparison between Hydrogen Alpha and neutral Calcium (Ca I) images - VHIRSS in spectrohelioscope mode - camera IS DMK 41 Fulvio Mete, Rome, Italy





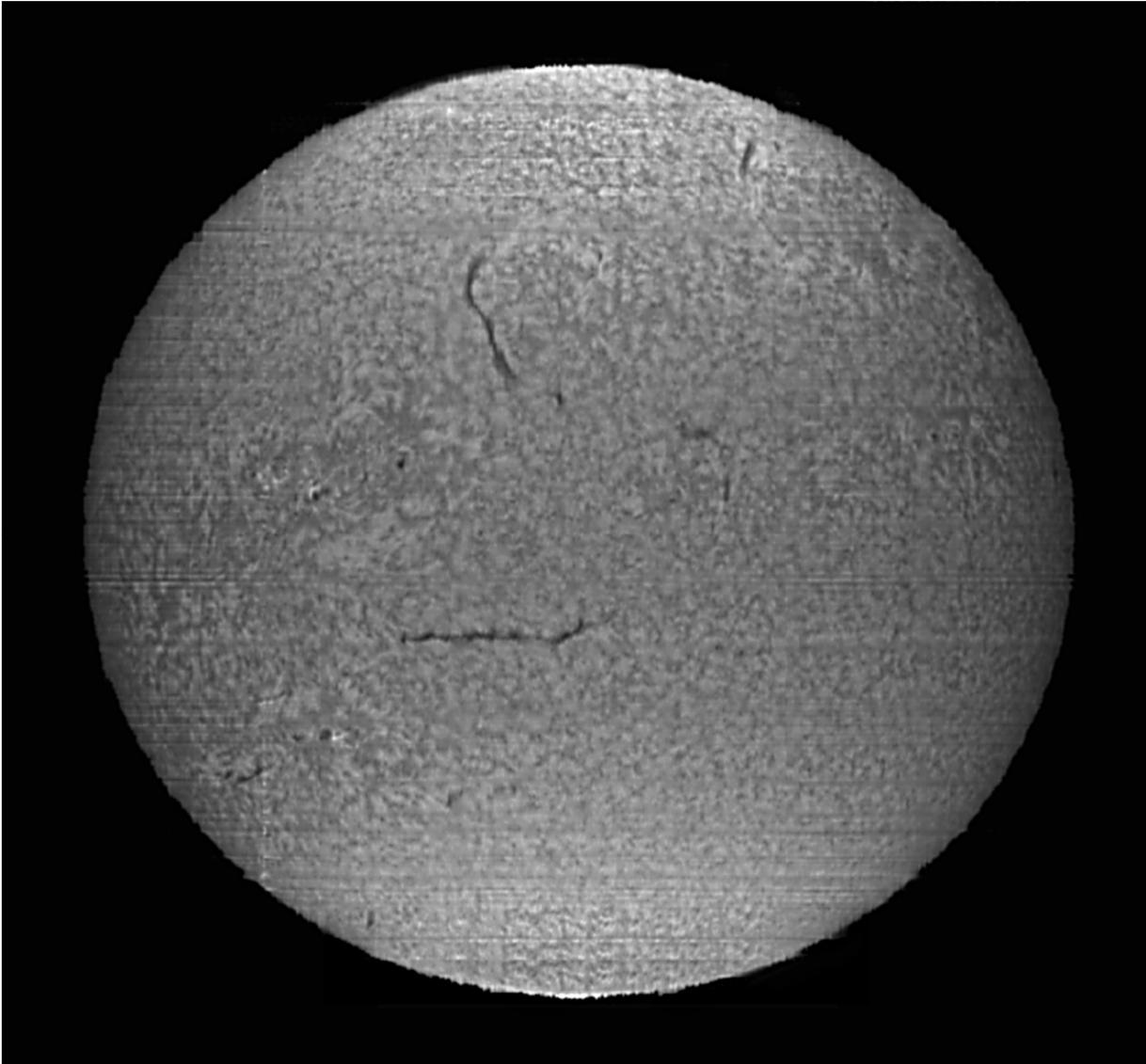
L'impressionante mole di particolari visibili : POSS2, scansione del 6 luglio 2014

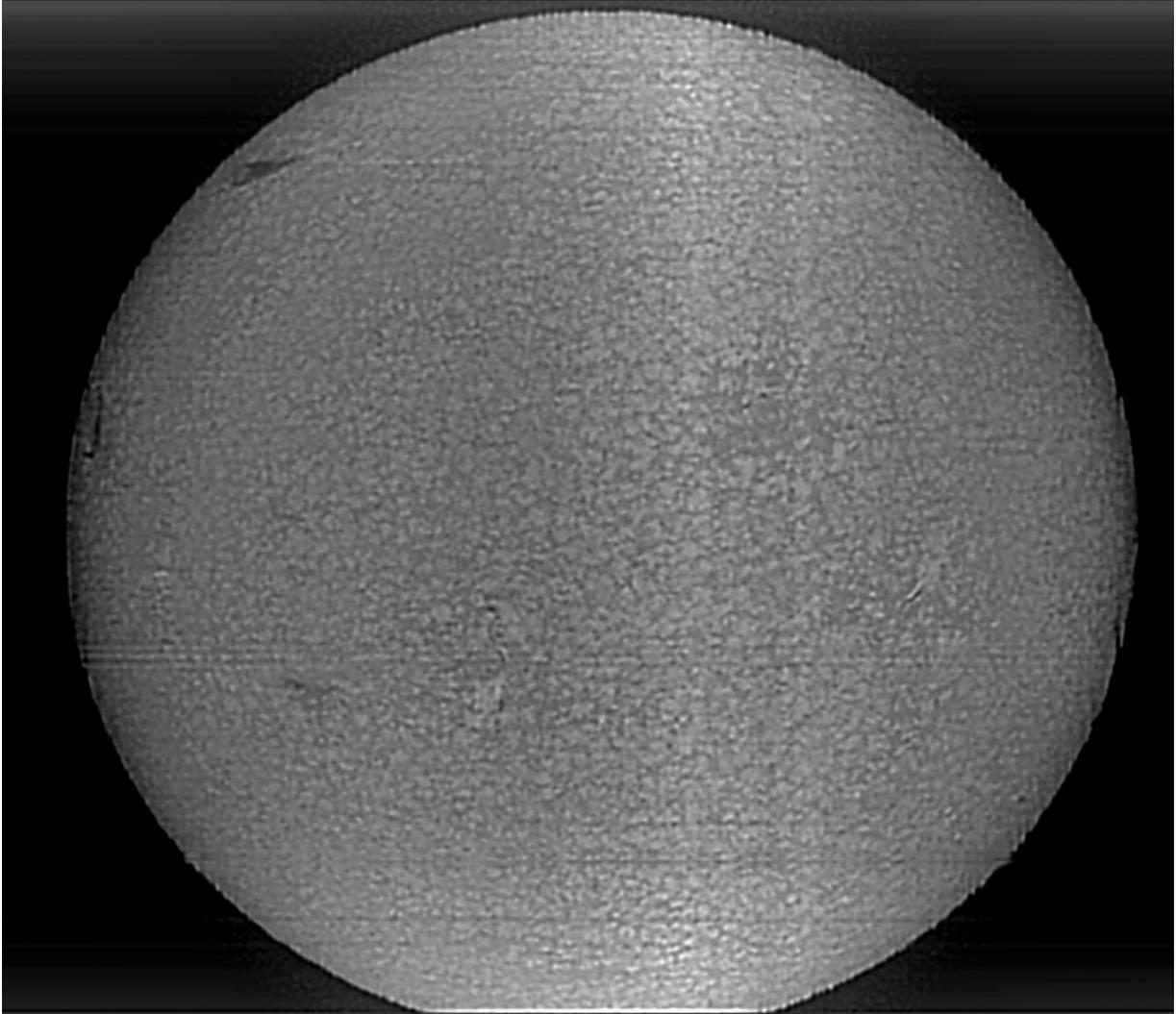


Una contrastatissima immagine di solarscan del 27 settembre 2014 :i punti saturati a nord e sud sono dovuti alla procedura di flatting con Astroart 3

H Beta a 4861.34 Å

La diversità delle riprese in luce $H\beta$ è duplice: relativamente alla capacità delle videocamere di registrare i particolari cromosferici, questa risulta notevolmente intensificata per effetto della posizione della riga, in una zona spettrale dove la maggior parte dei sensori presenta la massima efficienza quantica: non è tuttavia tutt'oro quello che riluce, in quanto ciò si traduce non solo nella migliore lettura della cromosfera dentro la riga, ma anche nell'intensificazione del trasversalium, ossia delle righe trasversali dovute ad errori di lavorazione o granelli di polvere sulle lame della fenditura. Si impone quindi, ancor di più dell' $H\alpha$, l'uso di fenditure ben lavorate e/o di flat sintetici. Di seguito due immagini in tale lunghezza d'onda.



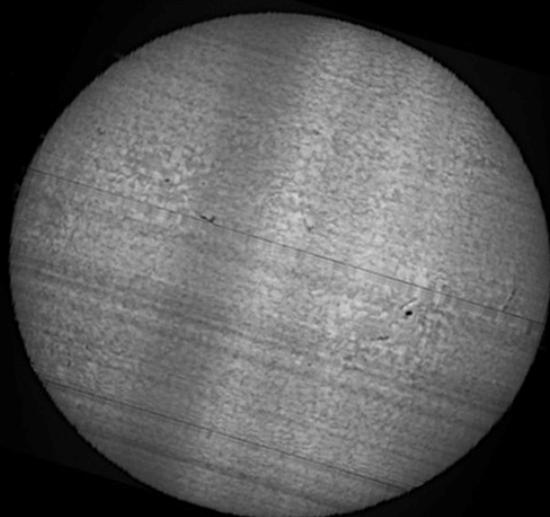
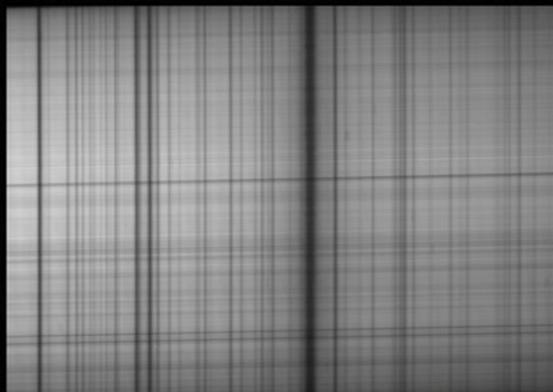


La seconda caratteristica, cui si era precedentemente accennato, è la minore osservabilità di alcuni particolari cromosferici, come le plages delle regioni attive, che appaiono scure anziché brillanti come in H alpha, e la maggiore, per contro, evidenza della supergranulazione. Nell'immagine sottostante è mostrato un confronto tra H α e H β nel quale è evidente tale caratteristica.

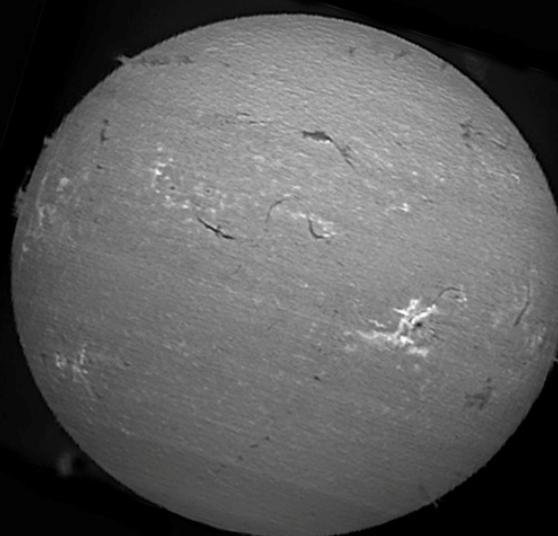
Sun disk Hydrogen beta- Hydrogen alpha comparison

VHIRSS spectroscope in spectrhelioscope mode May 13 2012
Fulvio Mete, Rome, Italy

H beta
4861 A

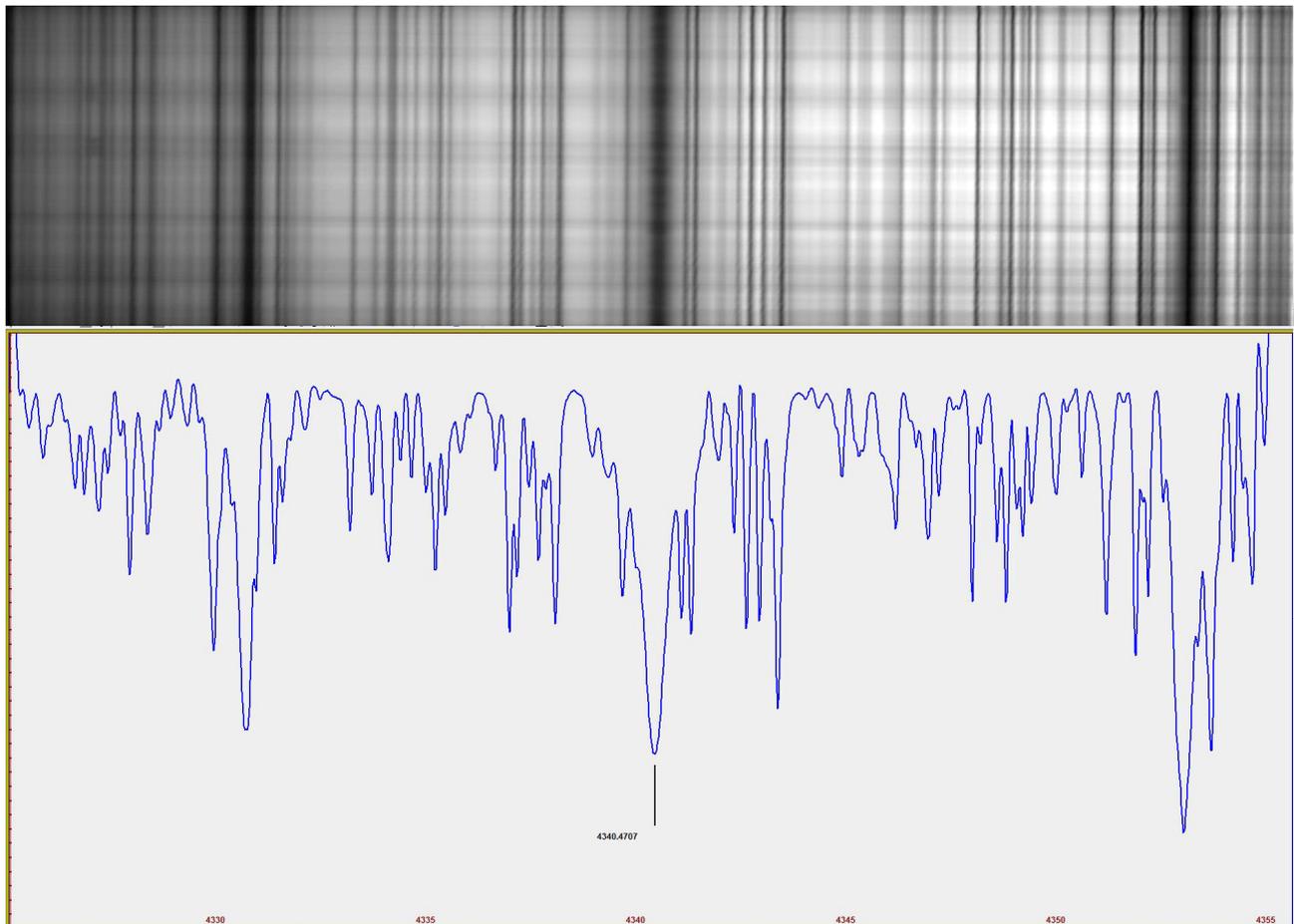


H alpha
6563 A

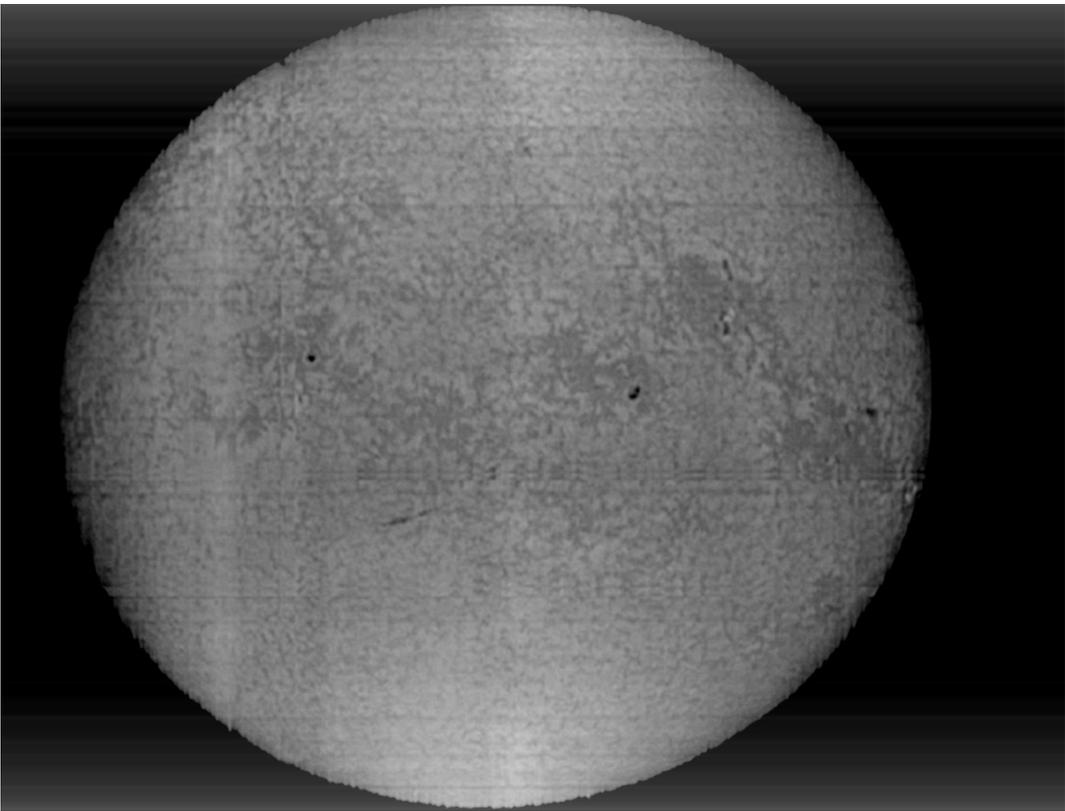
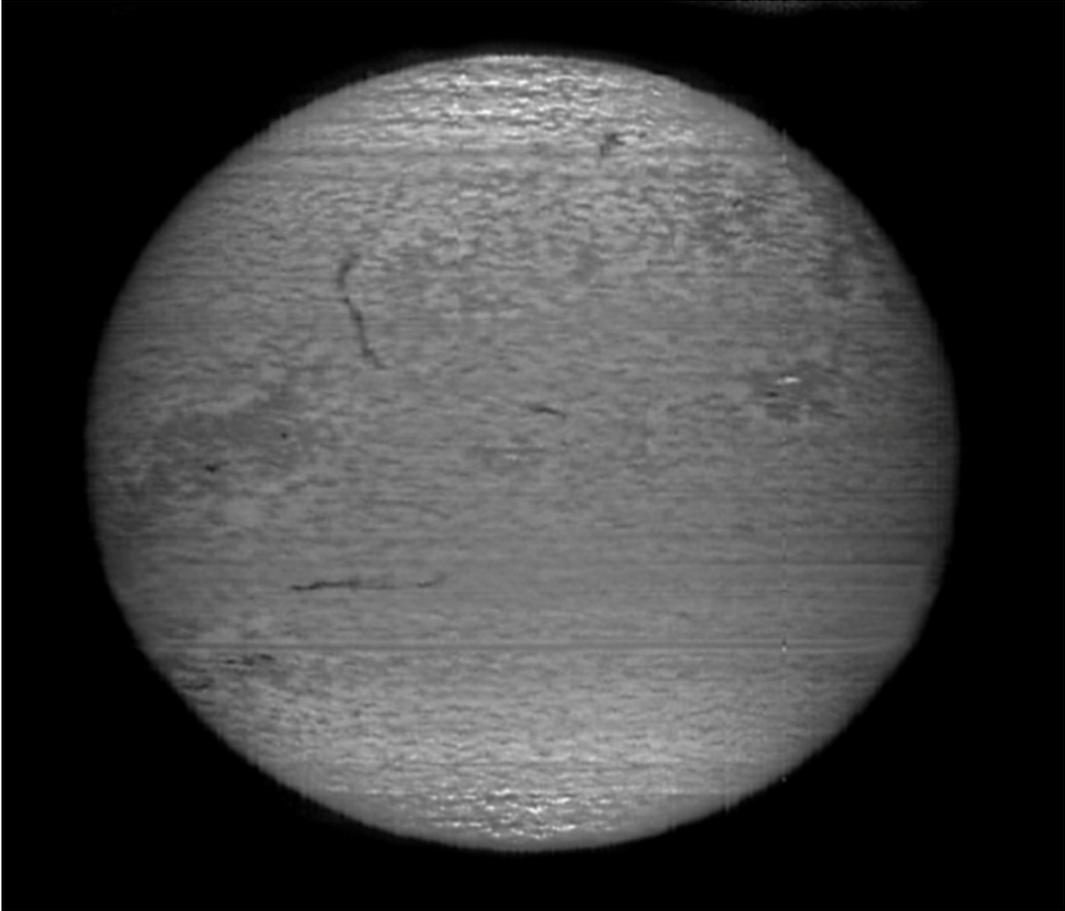


H gamma a 4340.47 Å

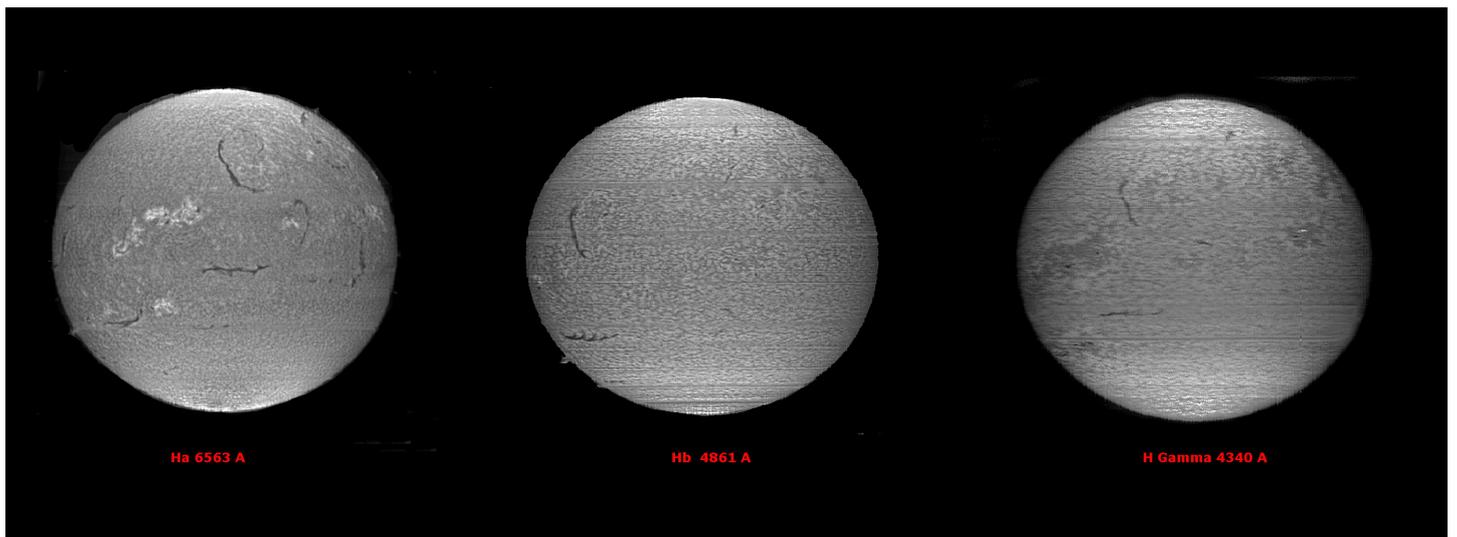
La ripresa spettroeliografica in H γ non è banale, per la relativa scarsa estensione della riga e delle relative finestre ottiche in cromosfera.



Le caratteristiche di minore osservabilità delle plages ed in generale delle regioni attive in luce H β si ripropongono tuttavia con maggiore evidenza nelle immagini del disco solare in luce H γ a 4340.47 Å, come si osserva nelle immagini che seguono, riprese con SolarScan e VHIRSS:

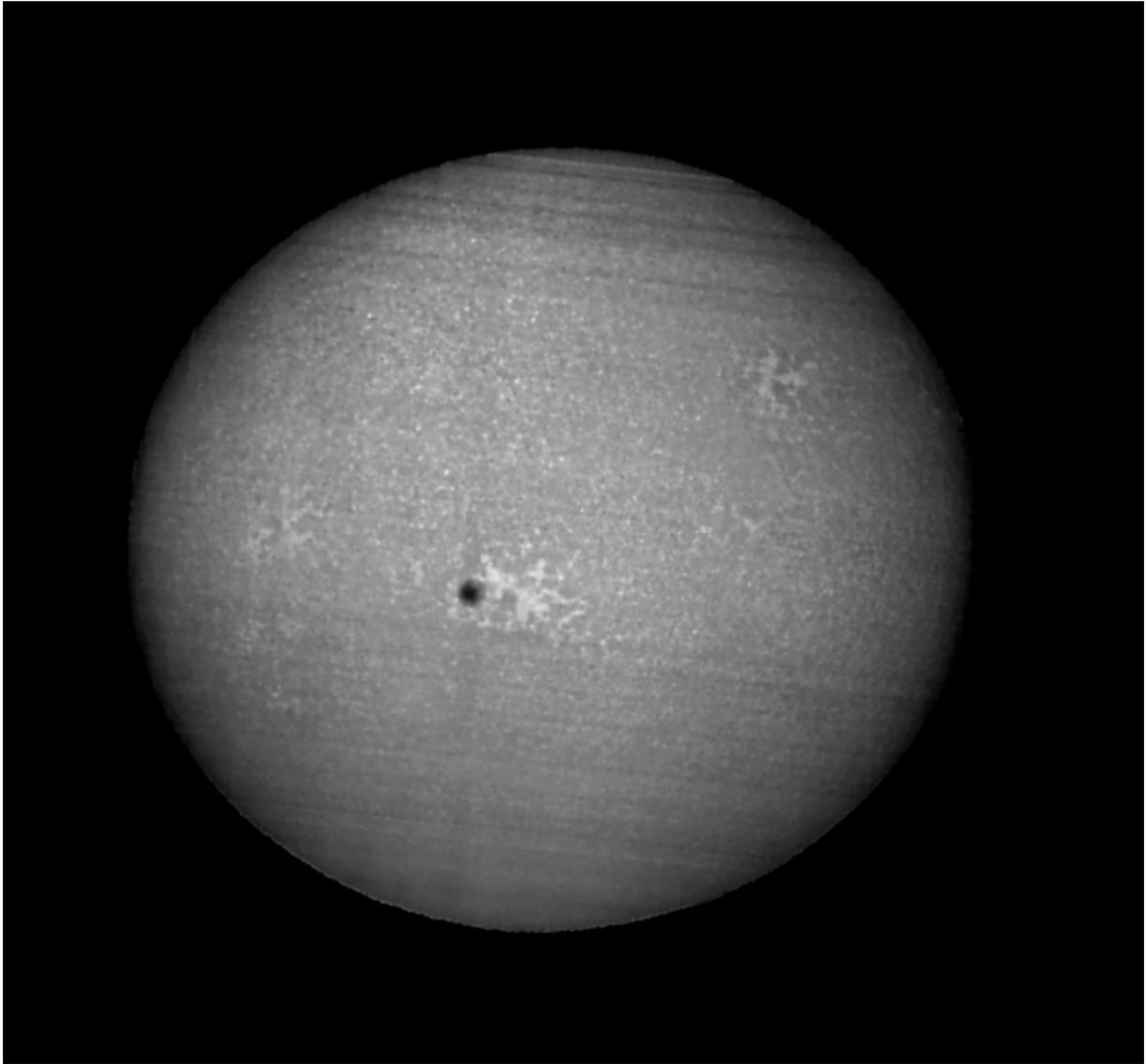


L'immagine del disco solare nelle principali righe dell'idrogeno ionizzato , H α , H β , H γ conferma l'andamento descritto sull'apparenza delle regioni attive, che passano dal bianco brillante delle plages nell'H α al grigio scuro dell'H γ , mentre il grigio molto scuro dei filamenti dell'H α diviene più tenue nell'H γ . Non si tratta solo di profondità ottica, ma anche di diversa collocazione delle righe in cromosfera e di differenza di temperatura.



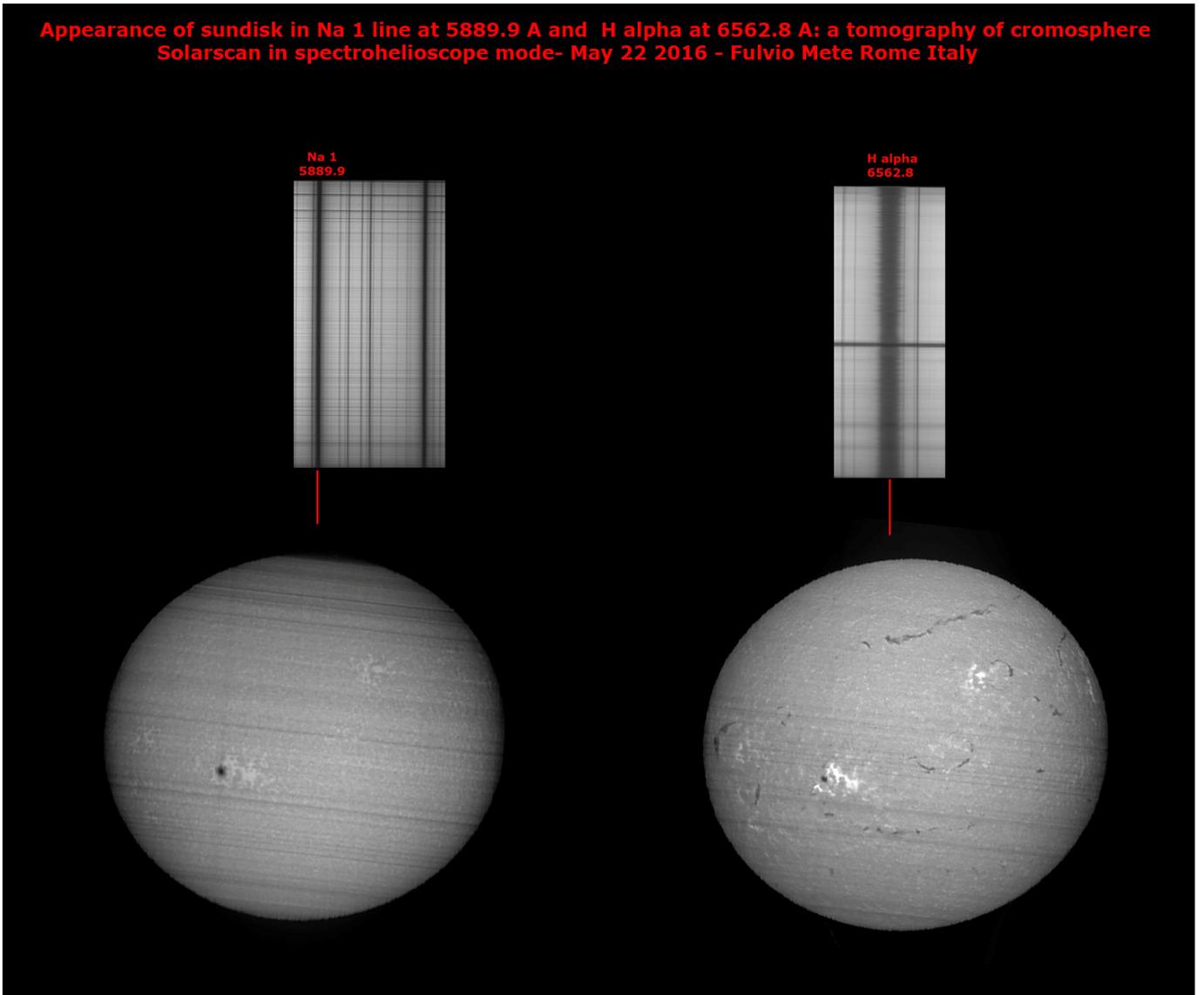
Na 1 e 2 a 5889.75 e 5895.94 Å

Un'immagine in luce Sodio (NaI) a 5889.75 Å ripresa con Solarscan il 22 maggio 2016 si nota un aspetto facolare e della granulazione per certi versi simile a quella in luce Calcio ionizzato, seppure molto più attenuato.



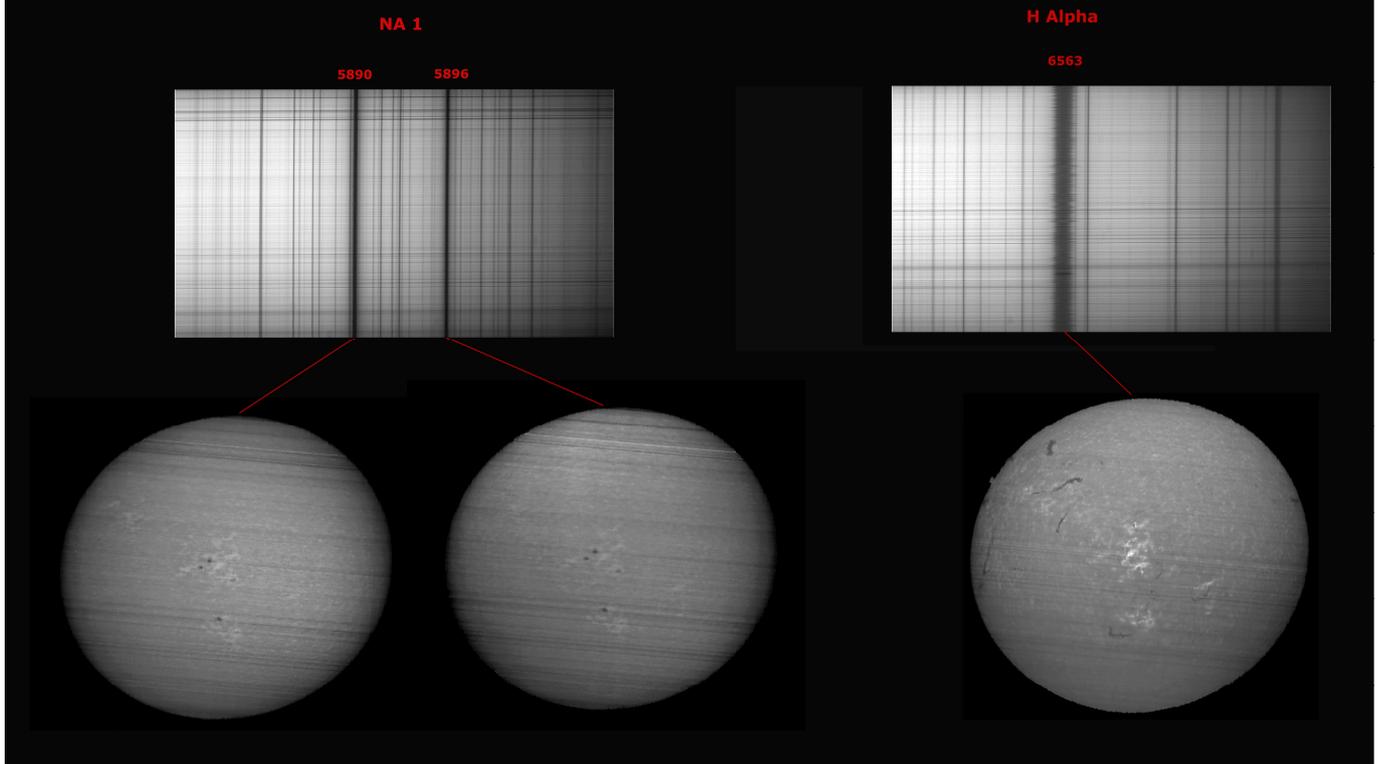
Successivamente, un confronto tra la predetta immagine ed una ripresa in luce H α effettuata nello stesso giorno. Le plages sono ben visibili, seppure meno brillanti che nell'H α , mentre i filamenti sul disco sono pressoché assenti.

Appearance of sundisk in Na 1 line at 5889.9 Å and H alpha at 6562.8 Å: a tomography of cromosphere
Solarscan in spectrohelioscope mode- May 22 2016 - Fulvio Mete Rome Italy



Un'altra interessante osservazione è stata quella del 14 agosto 2016, nella quale è stato fatto il raffronto tra le immagini, a livello cromosferico, del disco solare in luce Sodico Na I e II e quindi tra queste e l'Idrogeno Alpha.

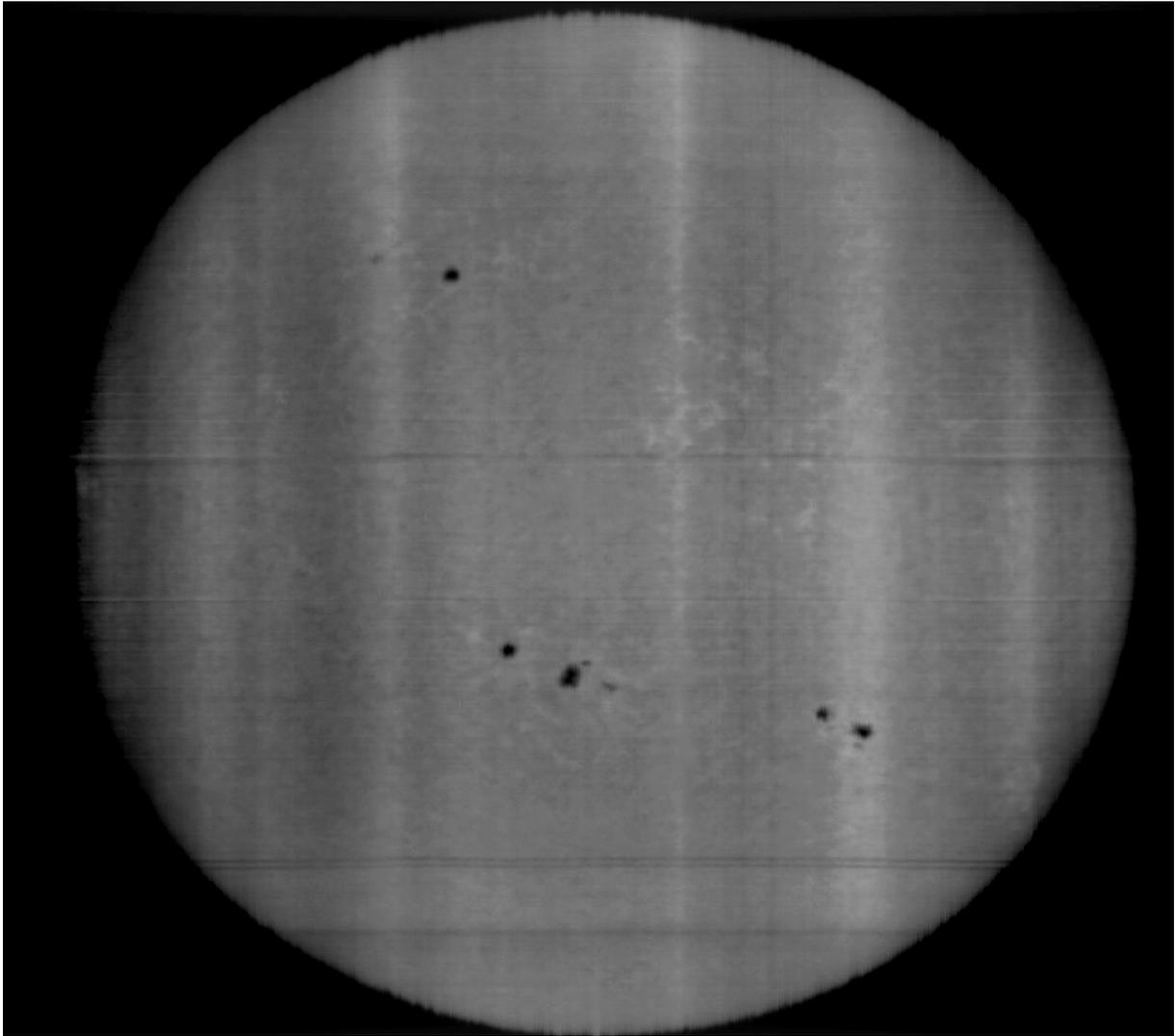
Comparison between Na 1 and H alpha solar images. Solarscan in spectrohelioscope mode
Fulvio Mete -Rome, august, 14 2016



FE 1 4957.61 Å

Una prova volta a registrare immagini in una riga del Ferro, quella a 4957.61 Å ,vicino l'H β.

Si riescono ad osservare le zone facolari intorno alle macchie ed un accenno di supergranulazione



Le righe del Calcio ionizzato:

Come si è visto tali righe forniscono elementi per una profonda e completa osservazione della cromosfera solare nell'UV vicino, in complemento all'H alpha.

CaII K a 3933.68 Å

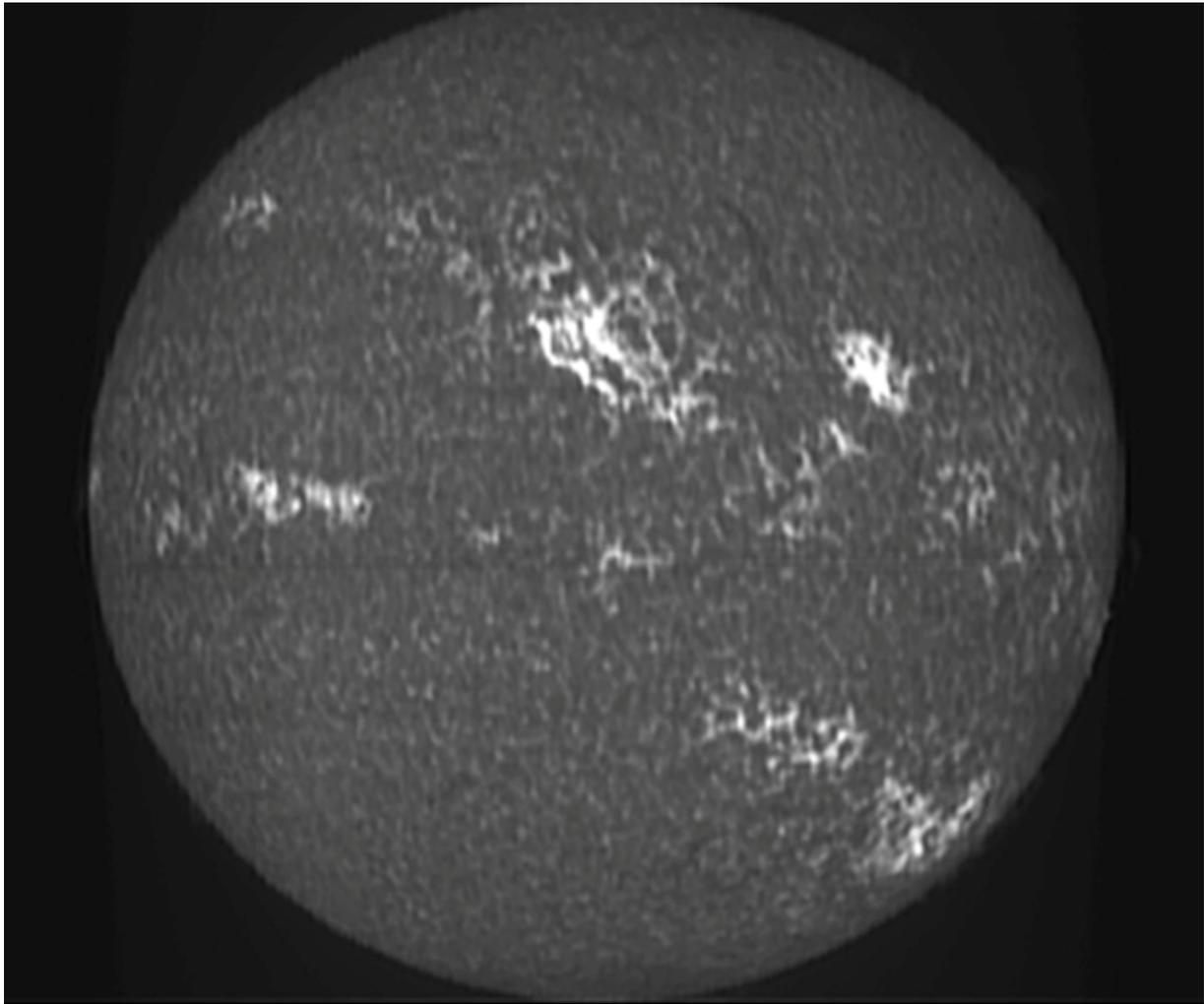
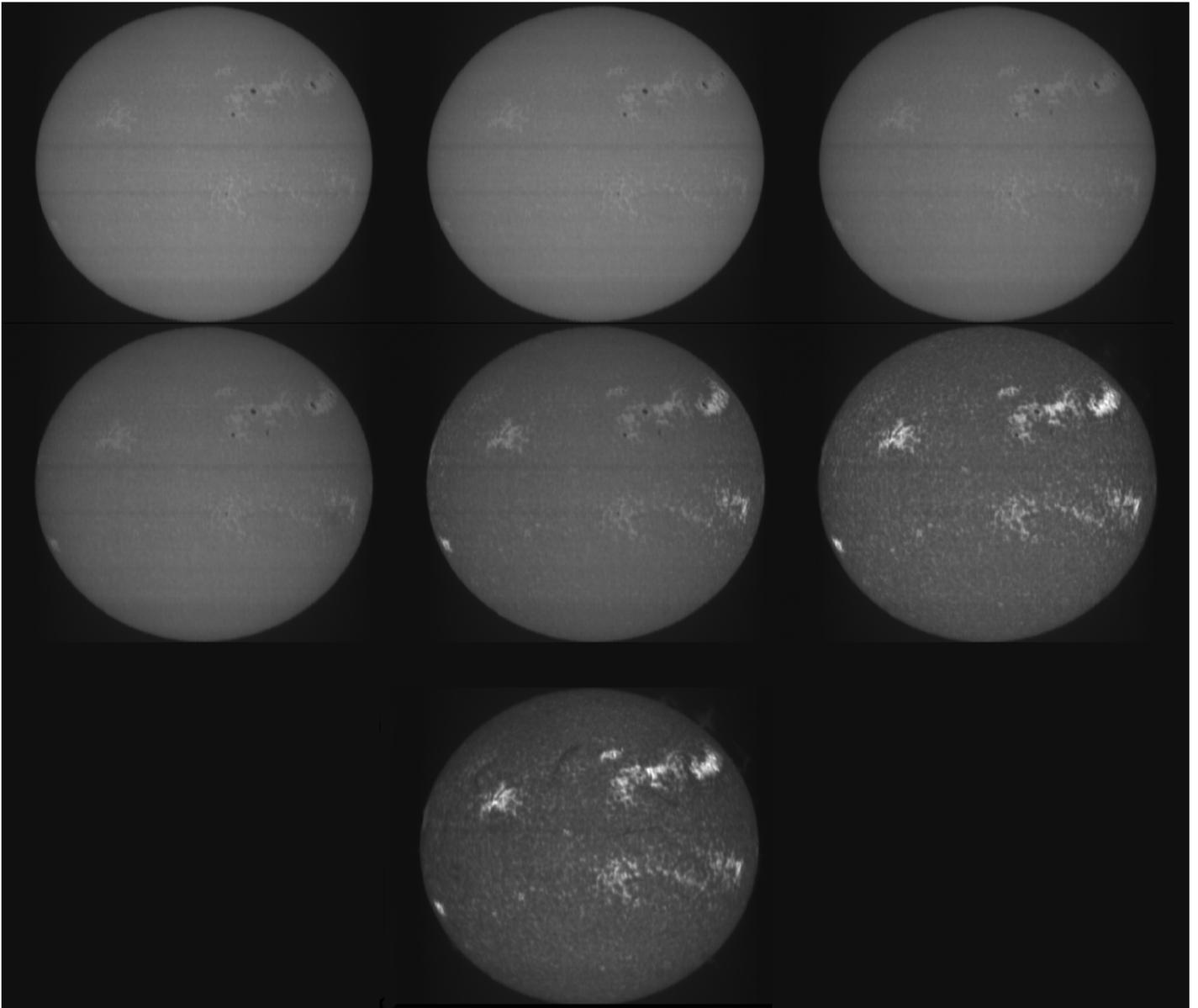


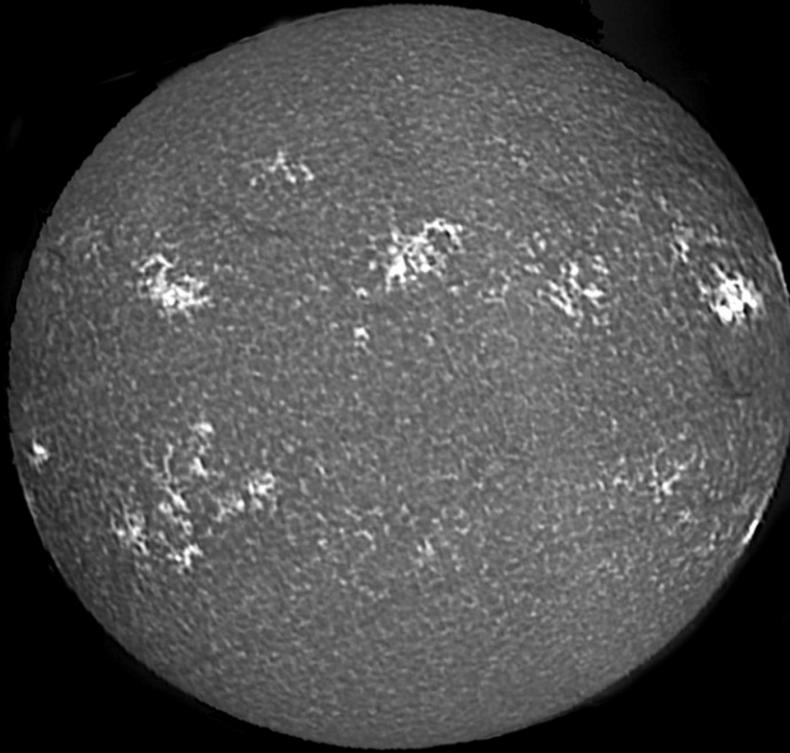
Immagine del sole in luce Ca I K3 (centro riga) del 28 luglio con VHIRSS

Nell'immagine seguente è invece visualizzata la successione di 7 frames da 0.029 \AA ciascuno nell'ala violetta della riga distanziati tra loro di 0.174 \AA , che vanno quindi da 3932.61 \AA a 3933.68 \AA (centro riga K3), nei quali è compresa l'immagine del punto di stazionarietà K1v a 3933.32 \AA . Considerato che il coefficiente di assorbimento di una riga rispetto al continuo è funzione dell'altezza rispetto alla base della fotosfera e varia in modo continuo con la lunghezza d'onda, la variazione del coefficiente di assorbimento della riga dall'ala verso il centro permette di effettuare una sorta di tomografia dell'altezza della zona di cromosfera osservata sino a giungere a oltre 2000 Km dalla fotosfera nel centro riga K3. Ciascun frame corrisponderebbe quindi ad una zona dell'alta cromosfera. Drammatico il cambiamento dell'aspetto della cromosfera stessa nell'ambito di un solo Angstrom, in primis per quanto concerne la variazione della sensibilità della riga ai campi magnetici delle regioni attive, con il passaggio da assorbimento in emissione, e poi per la visibilità dei filamenti e delle protuberanze.



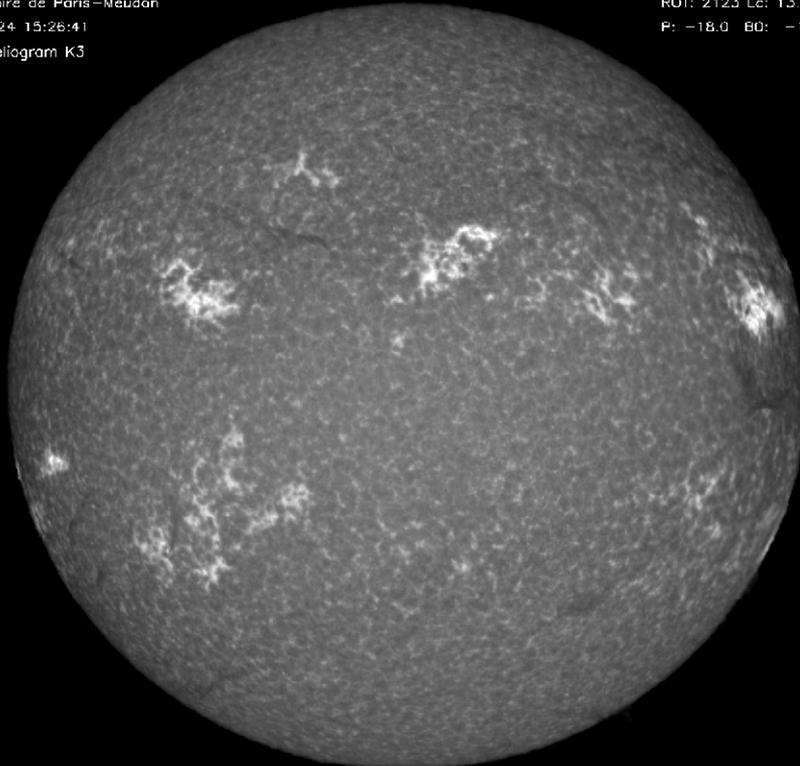
Nell'immagine che segue un raffronto tra un'immagine solare in luce CaIIK ottenuta con VHIRSS ed una con lo Spettroeliografo dell'Osservatorio di Parigi-Meudon, cui si è accennato in precedenza: la differenza è inferiore a quanto si potrebbe immaginare.

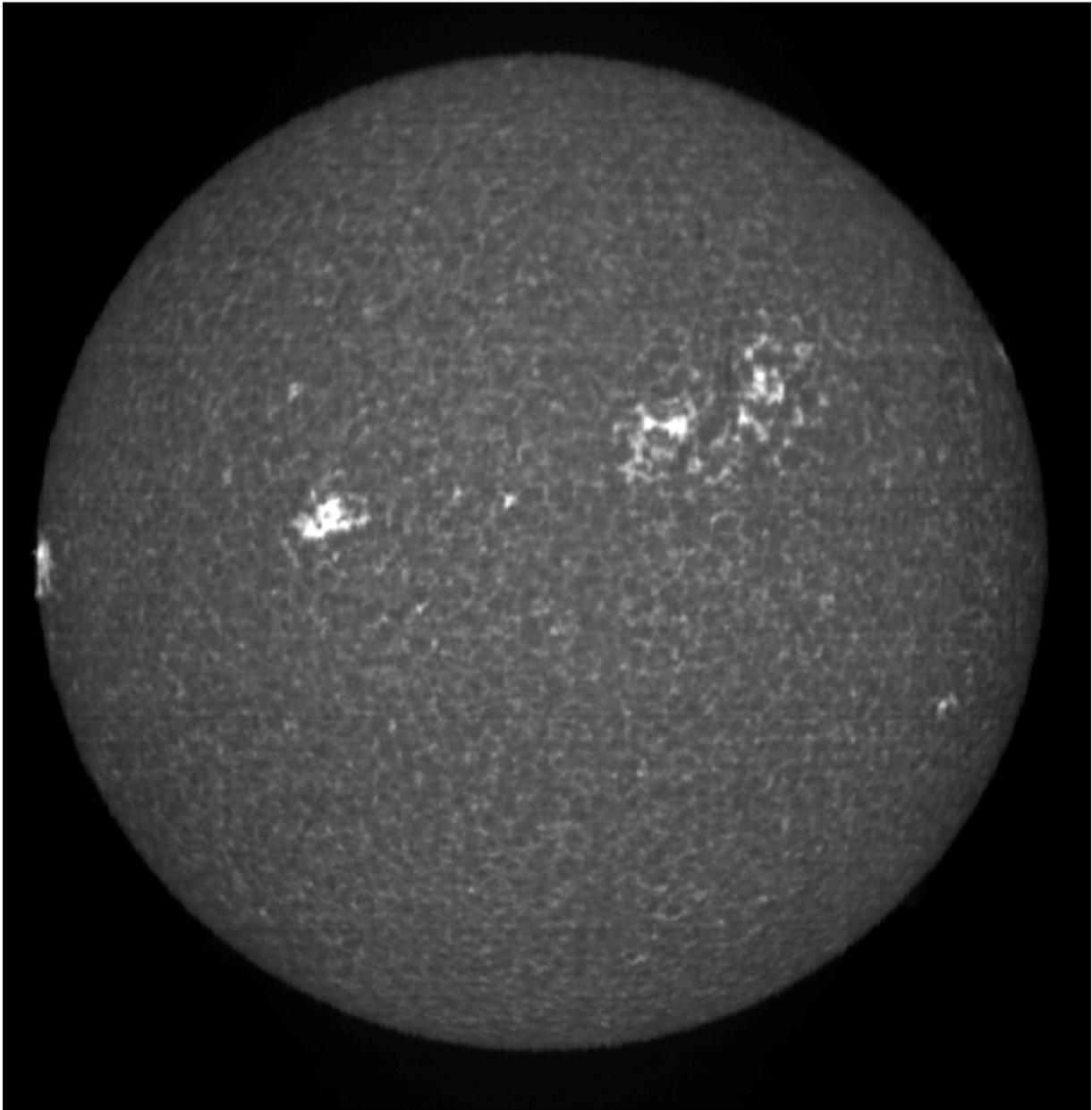
Sun CaII K VHIRSS
24-05-12 Fulvio Mete
Rome Italy



Observatoire de Paris-Meudon
12/May/24 15:28:41
Spectroheliogram K3

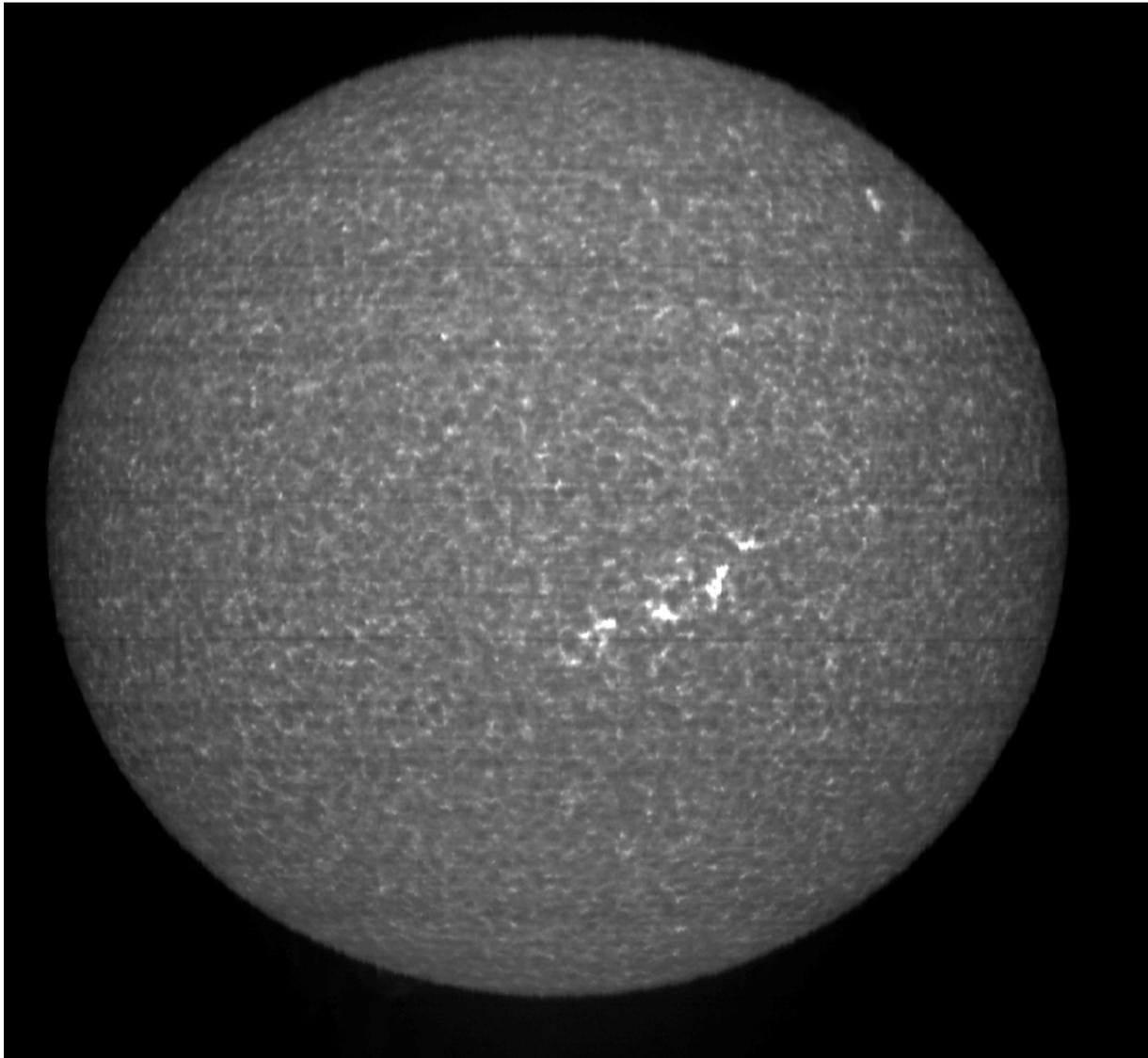
ROT: 2123 Lc: 13.8
P: -18.0 B0: -1.5



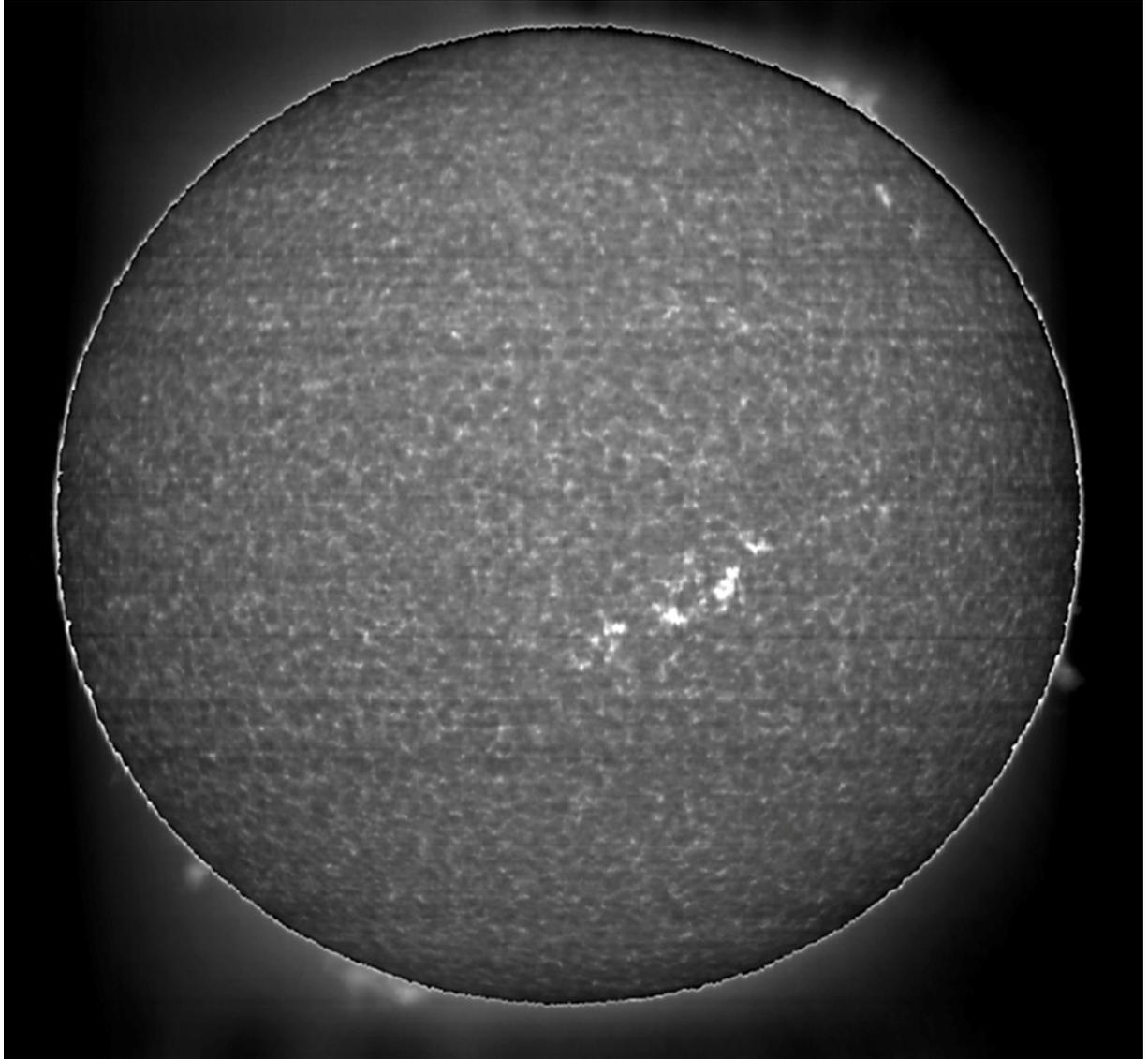


Una bella immagine in CaIHK3 (centro riga a 3933.68 \AA) del 24 giugno 2018 con POSS2 banda passante 0.037 \AA . Notare la pratica impossibilit  di ottenere tali immagini del centro riga coi filtri amatoriali CaII K, di banda passante troppo larga (circa 2.2 \AA)

Una dettagliata immagine in CaIIK3 del disco solare ripreso il 18 ottobre 2018
con POSS2

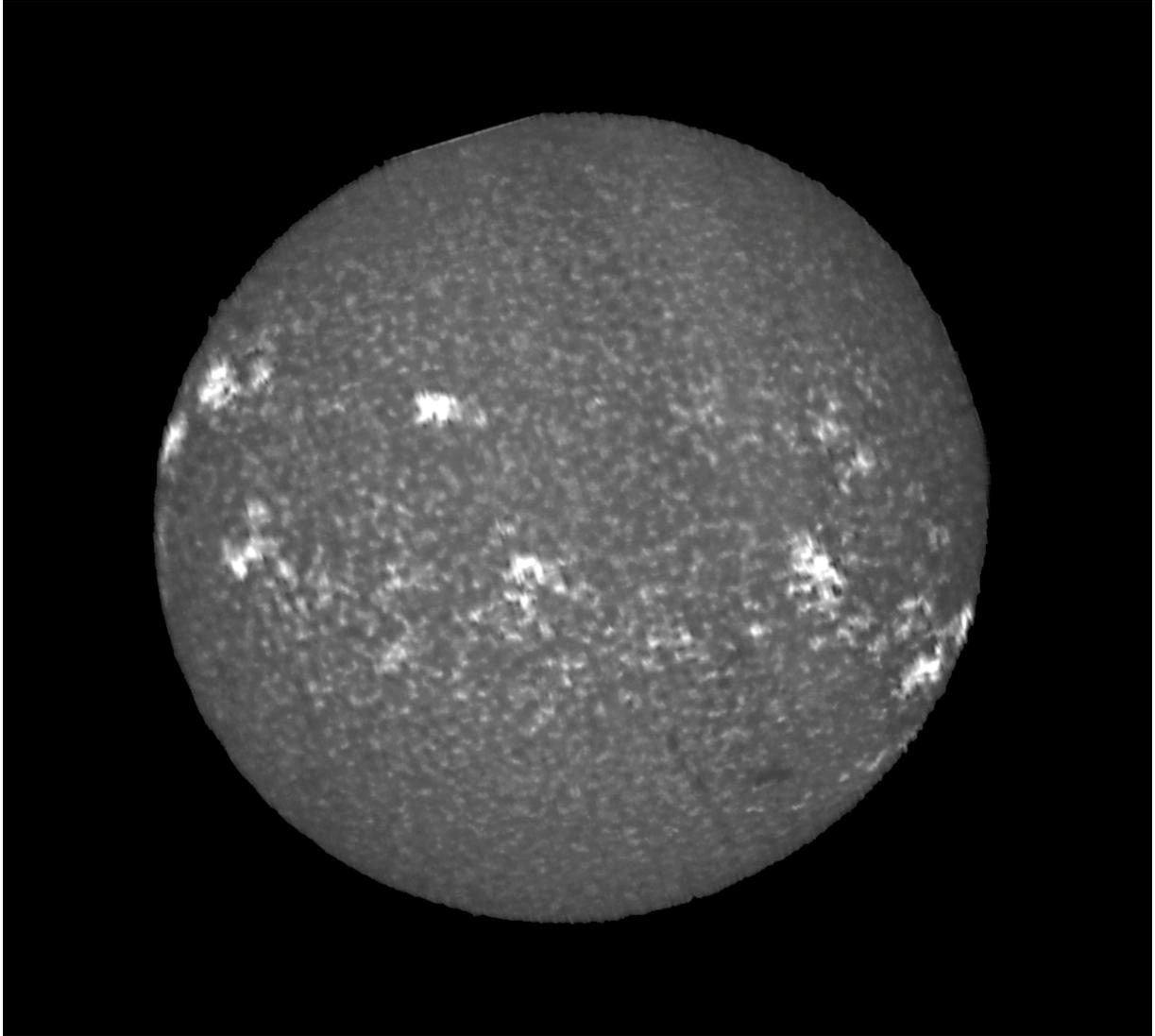


La stessa immagine con due esposizioni, una per il disco ed una per le protuberanze, sovrapposte via software.

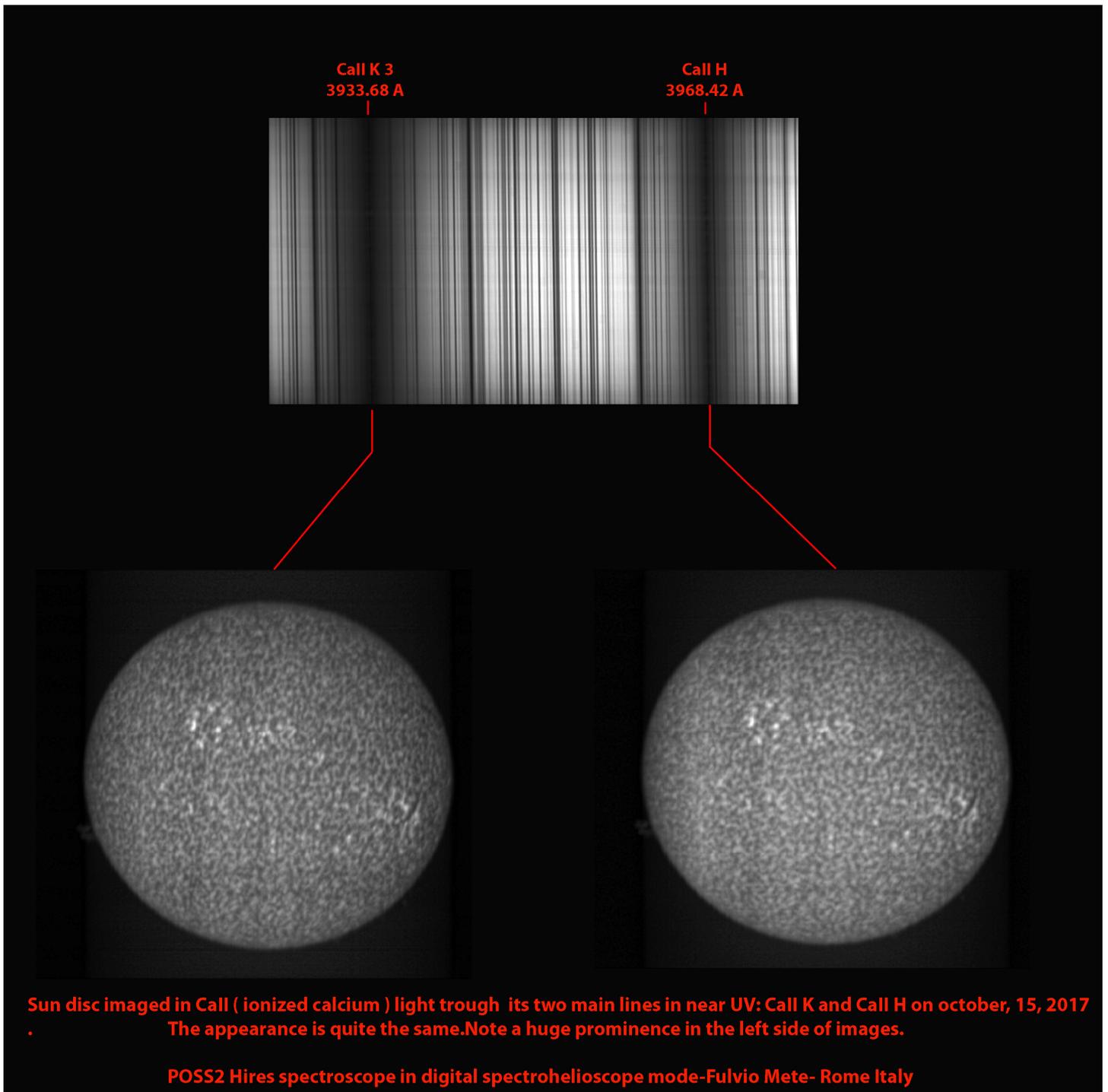


CaII H a 3968.49 Å

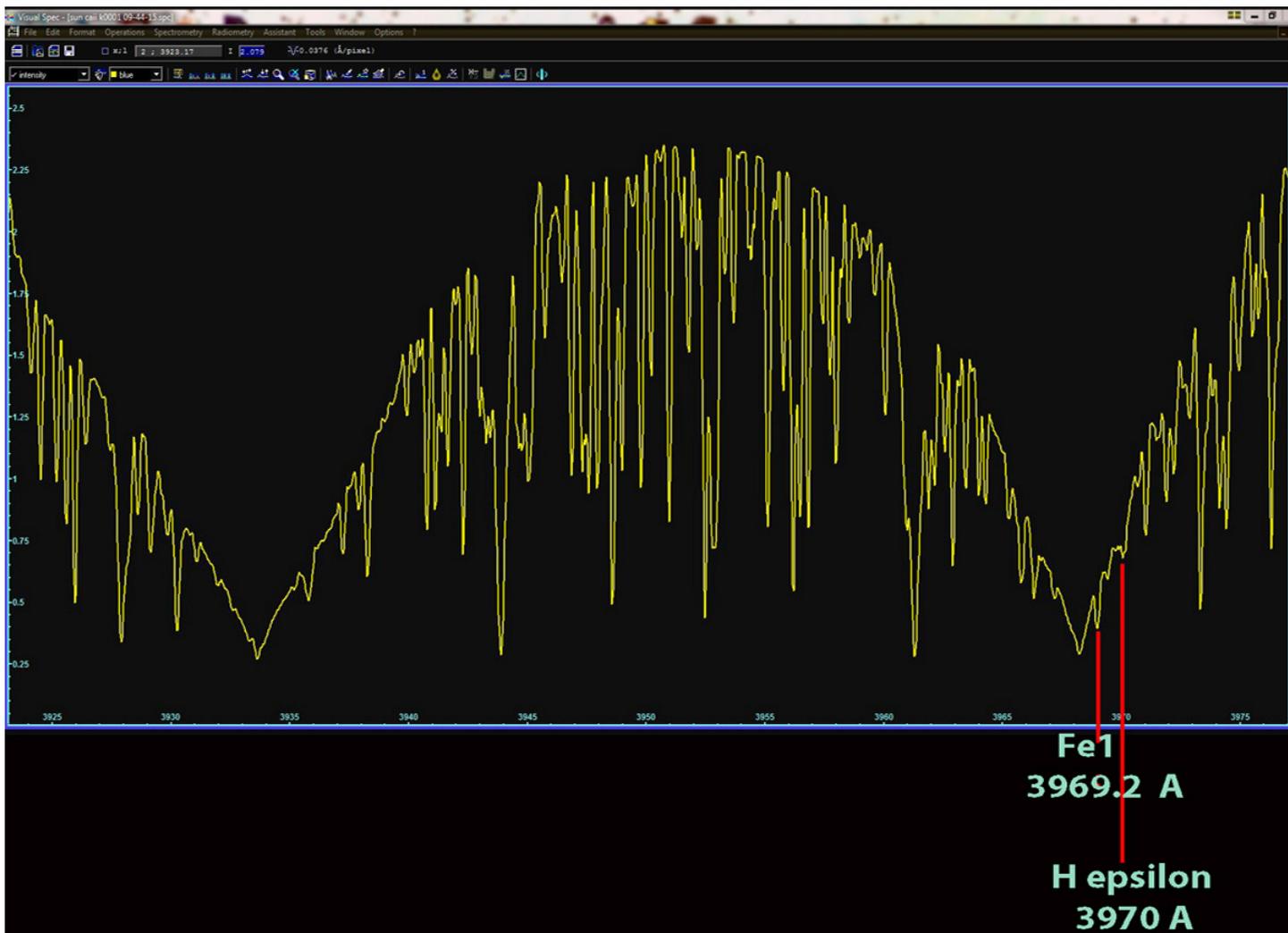
E' la seconda delle righe del calcio ionizzato nel vicino UV,



Osservandola, sorge spontanea la domanda di quale sia la differenza con la più nota CaII K. A prima vista nessuna, come si osserva dal seguente confronto:



Le due immagini, ottenute da 1 colonna di 1 pixel da 0.037 \AA sul centro di entrambe le righe, non mostrano sostanziali differenze. Nel caso di una banda passante più larga, invece, la riga rischierebbe di essere osservata in blend con quella del ferro a 3969.2 \AA e dell'Idrogeno Epsilon a 3970.0 \AA .

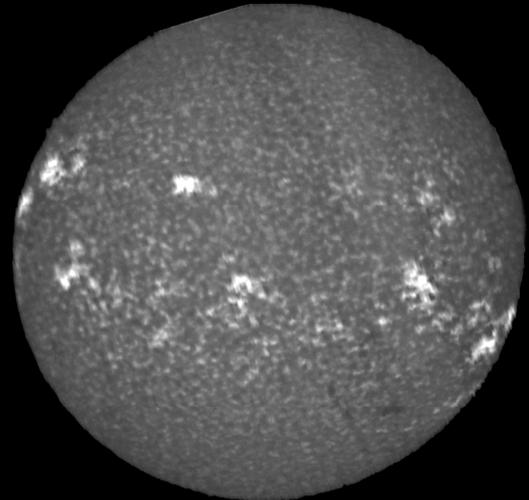
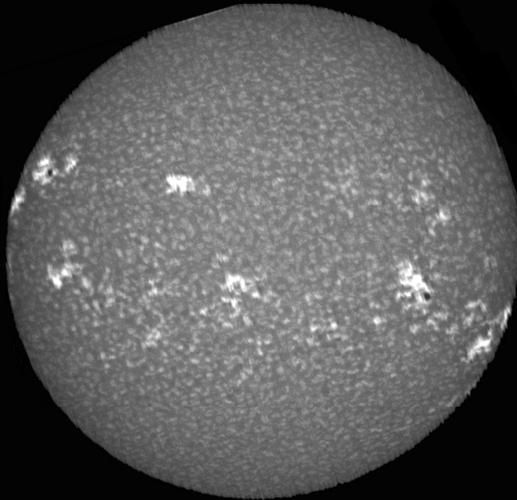


Nell'immagine che segue, del 2014, un confronto tra due immagini solari in luce CaII H ottenute con la media di frames corrispondenti a 0.2 \AA e a 1.44 \AA , entrambe sul centro riga: la differenza è piccola, ma visibile.

Spectroheliogram in Ca2h light at 3968.49 A in 1.44 A and 0.2 A bandwidth- VHIRSS in spectrohelioscope mode
Fulvio Mete- Rome- May 06 2014 8.15 UT -

1.44 A

0.2 A



Elaborazione e flatting delle immagini spettroeliografiche

I metodi di elaborazione che andrò ad esemplificare sono frutto esclusivo delle mie sperimentazioni sul tema, e sicuramente gli esperti di informatica sapranno trovarne di migliori, tuttavia essi sembrano funzionare in modo accettabile, migliorando non solo l'aspetto complessivo delle immagini, ma anche la visibilità dei particolari cromosferici.

1- l'elaborazione

Per elaborazione intendo soltanto alcuni passaggi cosmetici per rendere le immagini più piacevoli dal punto di vista estetico. Va da sé che tali modifiche dei files (Fits, PNG, BMP) li rendono poi non utilizzabili per qualsiasi attività scientifica. Un'elaborazione che non uso spesso, ma piacevole esteticamente, è quella di modificare con Photoshop l'immagine centrale di una serie, moltiplicandola per quelle (o quella) alle estremità della serie stessa.

Mi spiego: ammettiamo che da un dato filmato di scansione solare trattato con uno dei software di cui si è detto in precedenza, ottengo, per ipotesi, 41 immagini della riga H alpha (ciò è senz'altro possibile con Spectral Line Merge che converte il filmato in un numero di files png sino a 100) ciascuna di un pixel, centrate sul centro riga e quindi 20 verso il blu e 20 verso il rosso.

Si prende allora quella corrispondente al centro riga, diciamo la 21, e si moltiplica per quella delle estremità verso il blu, la 1, utilizzando l'apposito menu "Image > Calculations" di Photoshop, la moltiplicazione può anche essere effettuata per entrambe le immagini estreme delle due ali, ma non sempre il risultato è convincente. Una volta fatto ciò e regolato i livelli, si potrà applicare un filtro passa basso (Blur) e una maschera sfocata (Unsharp Mask).

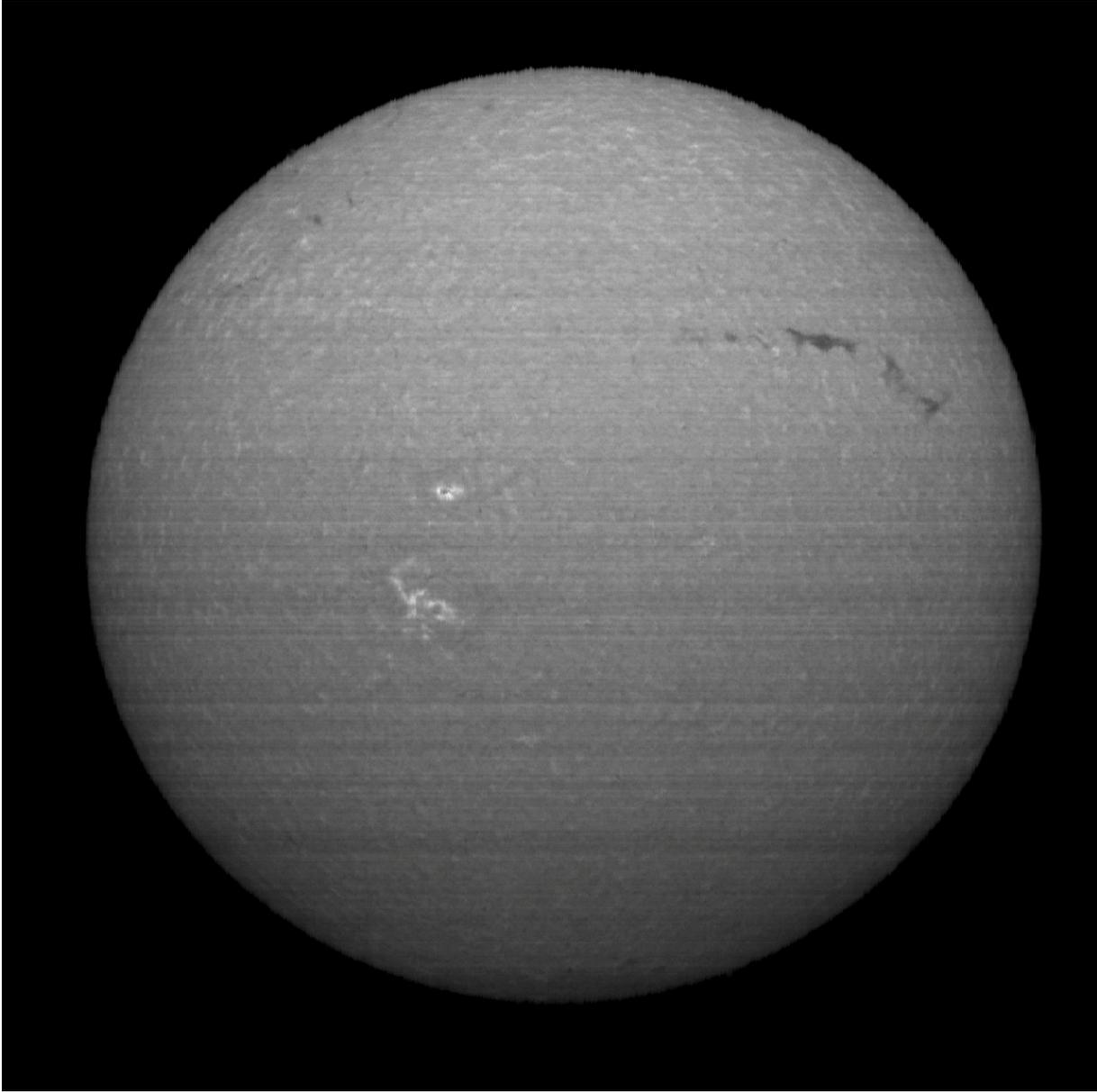


Immagine centrale della serie, al centro della riga

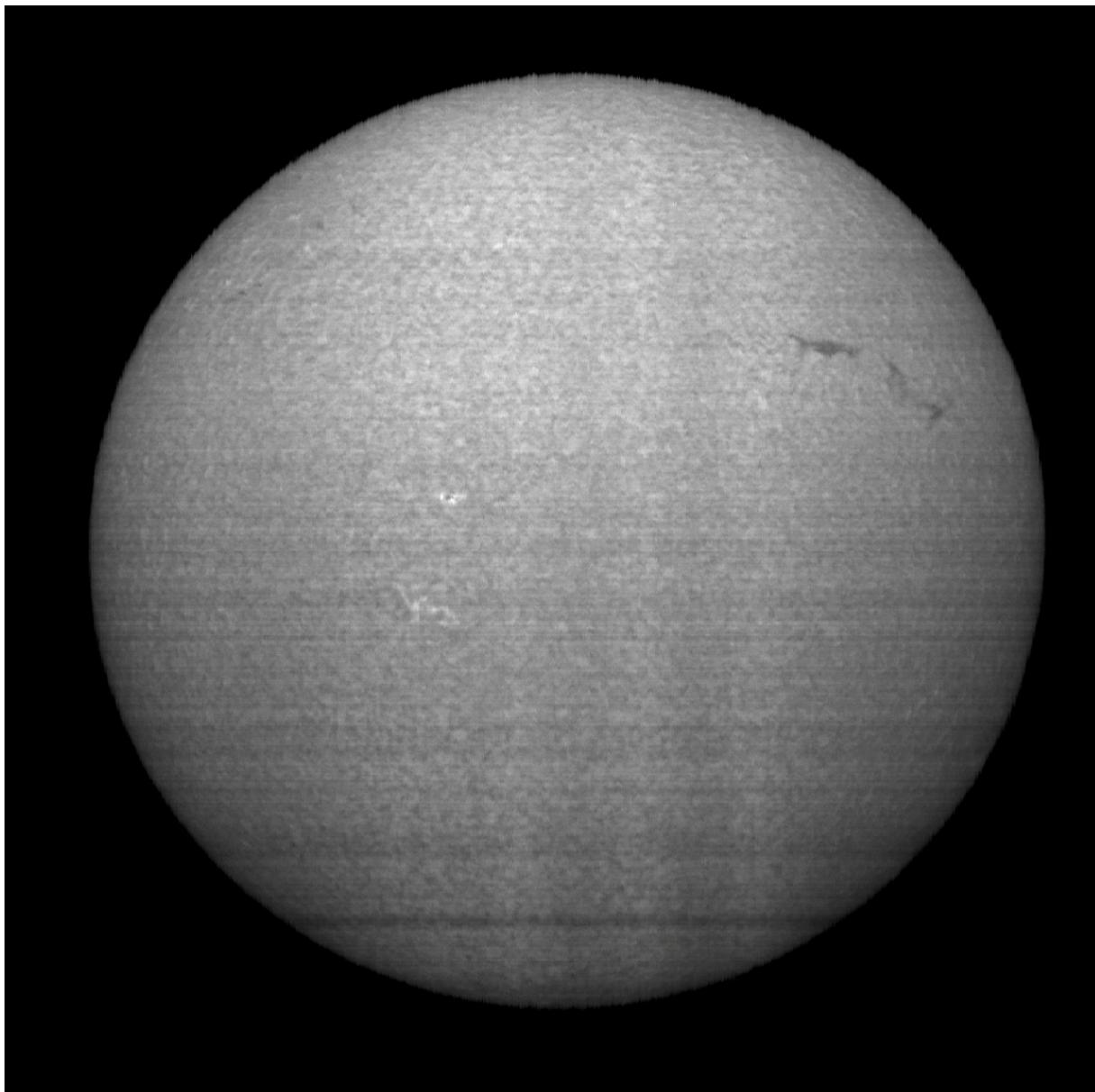


Immagine dell'estremità blu della riga

L'immagine che segue è quella ottenuta dal procedimento di moltiplicazione e rifinitura dianzi detto e dall'applicazione di una flat sintetica.

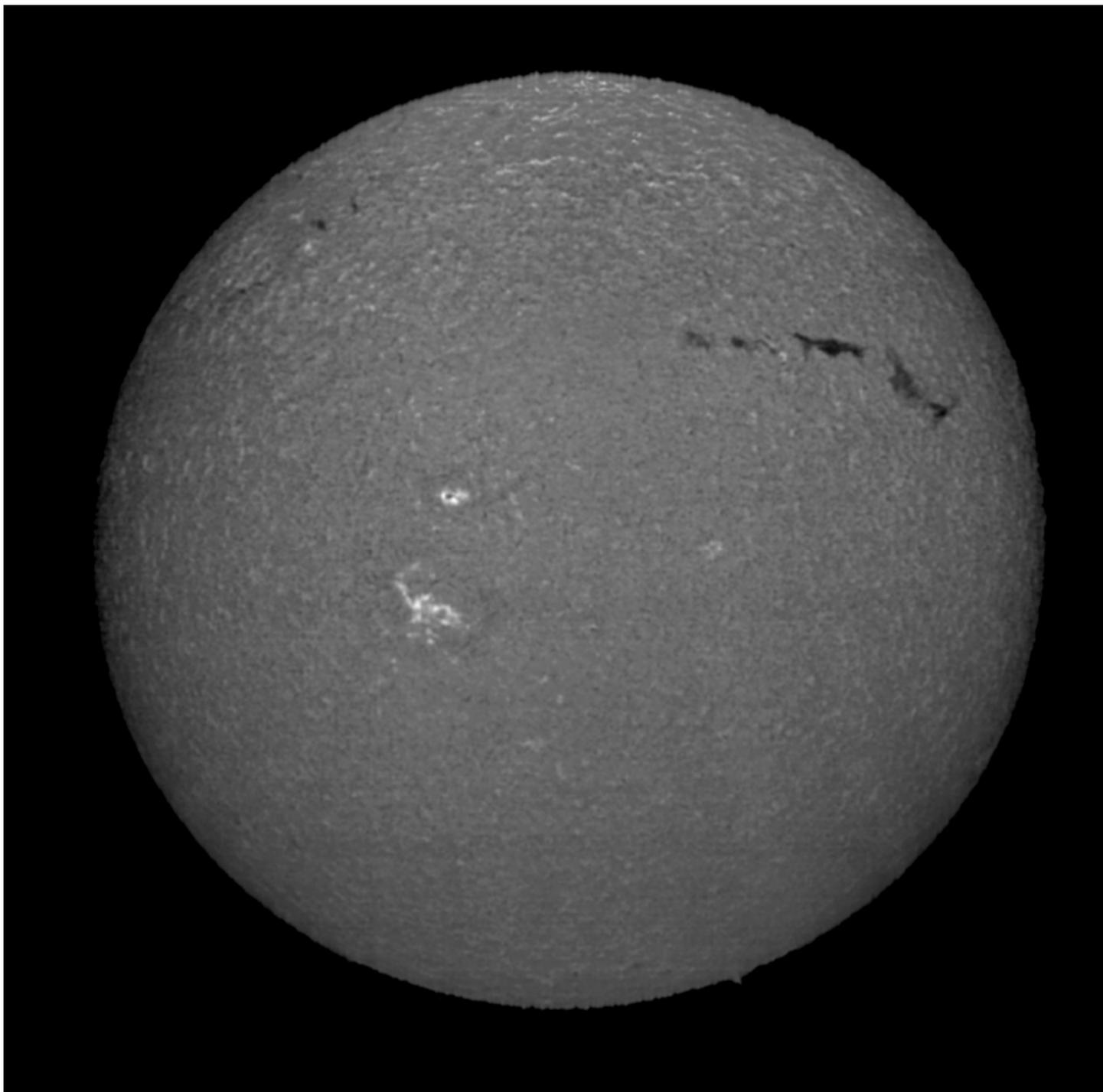


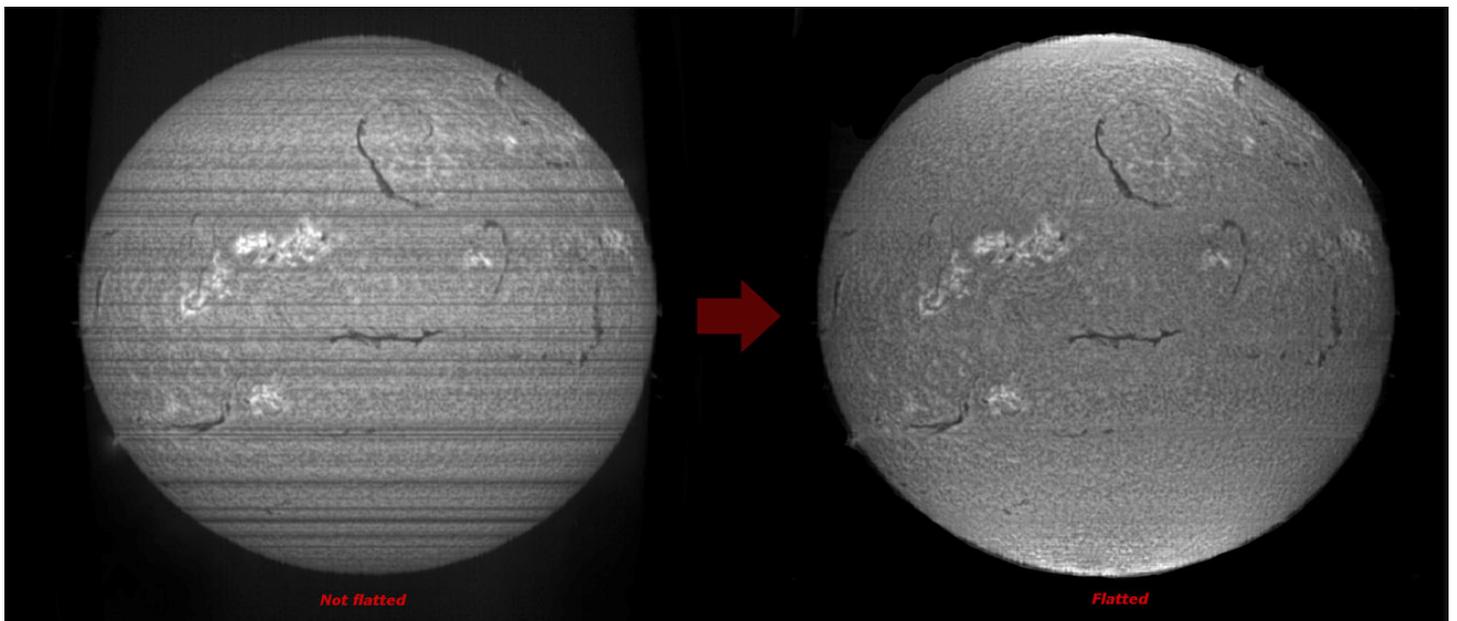
Immagine finale dopo l'elaborazione.

2 - La flat sintetica

Come si è detto, l'unico modo per eliminare o contenere al massimo il trasversalium, le righe orizzontali dovute alla fenditura, consiste nell'operare una flat sintetica, dato che la flat ordinaria non è possibile con la luce solare. Alcuni programmi, come BASS, prevedono già una routine per effettuare la flat delle immagini spettroeliografiche, altri come Spectral Line Merge, indicano la procedura per effettuarla. In ogni caso si tratta di operazioni di una certa complessità, così mi sono posto il problema di trovare un sistema semplice e rapido per tale incombenza. Sapevo che Astroart prevede, in tutte le sue versioni, dalla 3 in poi, un'operazione di binning sulle immagini, che consiste nello "stiramento" dell'immagine stessa nel senso del lato X dei pixel o su quello Y (image > binning > X average o Y average). Ho pensato quindi di effettuare questa semplice procedura:

- 1- Caricare e duplicare l'immagine su AA3
- 2- Sul duplicato effettuare l'operazione di binning X average
- 3- Sottrarre tale immagine di binning da quella principale (arithmetic > subtract)
- 4- Per renderla leggibile operare un "add offset" (arithmetic > add offset) tra 60 e 80.

Può sembrare strano operare una flat per sottrazione anziché per divisione, ma il fatto è che effettuando la divisione l'immagine viene spesso "bruciata" nelle zone nord e sud in alcuni casi, tuttavia essa funziona in modo adeguato, come nell'esempio che segue:



La flat applicata con la divisione sembra fornisca risultati migliori che con la sottrazione quando le righe trasversali sono molte e marcate, mentre la sottrazione fornisce un buon risultato con righe poco evidenti.

Non solo imaging

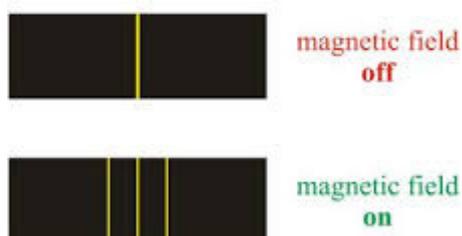
Dopo questa carrellata sulle possibilità offerte dall'osservazione spettroeliografica, a mio avviso di estremo interesse sia per l'amatore evoluto che per il principiante desideroso di apprendere, ci si può chiedere se la strumentazione ad essa dedicata della quale si è discusso abbia esaurito le sue possibilità. La risposta è negativa, *in quanto la stessa strumentazione (in alcuni casi con piccole modifiche) ci potrà permettere una sfida ancora più impegnativa ed esaltante: la misura dei campi magnetici delle regioni attive e delle macchie solari tramite l'effetto Zeeman, un'attività sinora esclusiva delle strumentazioni professionali del costo di milioni di euro o dollari.*

Ma andiamo con ordine:

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 scomponivano 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.

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



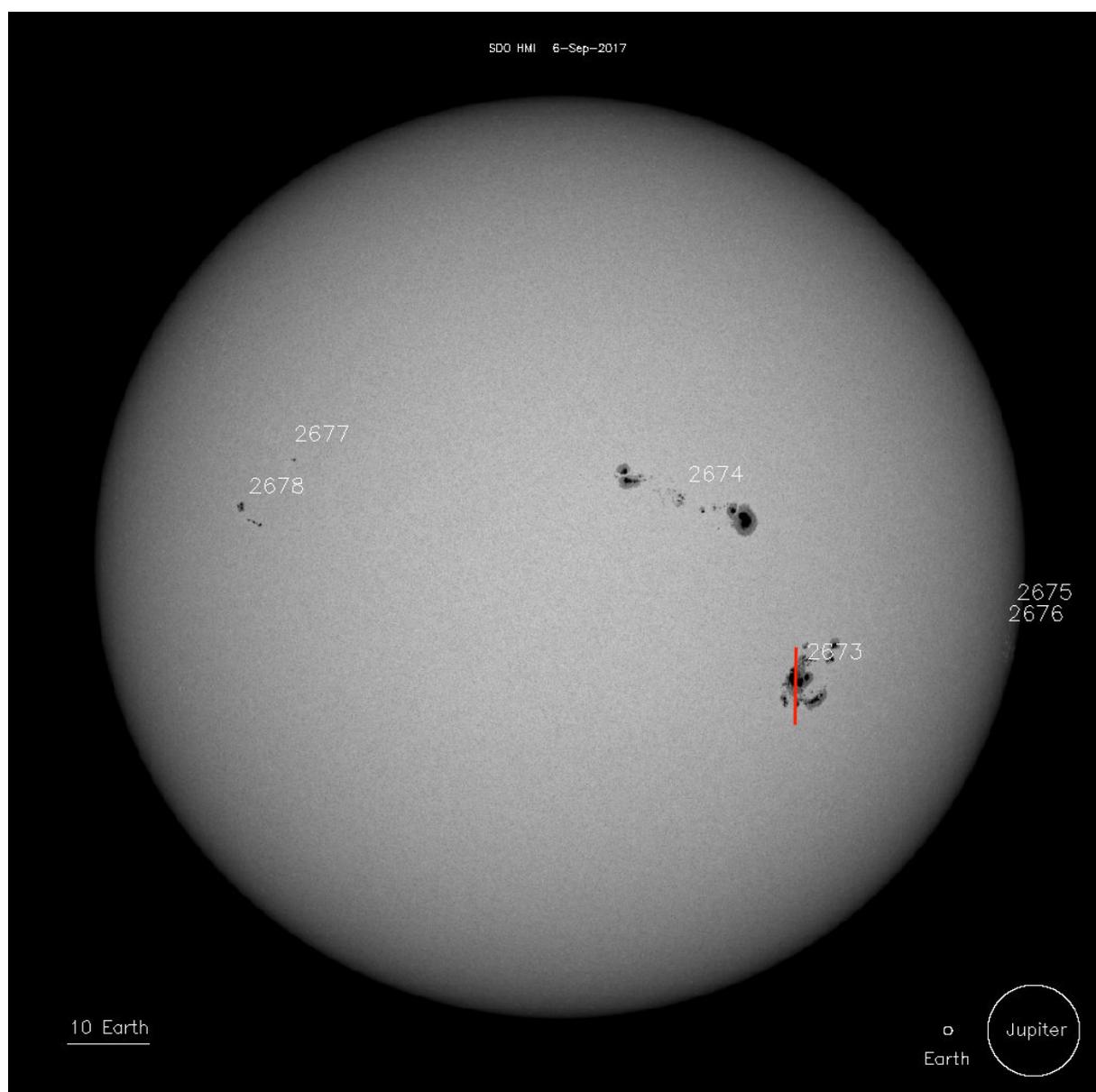
Se la riga è in emissione si parla di effetto diretto, mentre se è in assorbimento, di effetto Zeeman inverso. Dal punto di vista dell'astronomia amatoriale, il fenomeno in questione è molto difficile da osservare per il semplice fatto che richiede poteri risolutivi spettrali molto elevati (a mio avviso > 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.

Nel mio caso la strumentazione era già pronta e collaudata :lo spettrografo Hires Solarscan ed una camera DMK 41, con sensore Sony da 1280 x 1024 su montatura Losmandy G 11. C'è da dire. Tale strumento, costruito con criteri professionali era eccellente sotto tutti gli aspetti, tuttavia per un compito talmente difficile occorreva potenziarne ancor di più le caratteristiche e potenzialità. Un deciso aumento delle prestazioni poteva essere effettuato , a parità di altre condizioni, soltanto agendo sulla fenditura: decisi quindi (non senza rimpianti) di sostituire la fenditura originale regolabile con un sofisticato e complesso sistema a molla, con di una fenditura fissa da 5 micron, acquistata da Edmund Optics, i cui bordi era tagliati al laser di precisione e quindi con tolleranze strettissime, difficili da ottenere con un sistema a chiusura, per quanto ben costruito. 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.

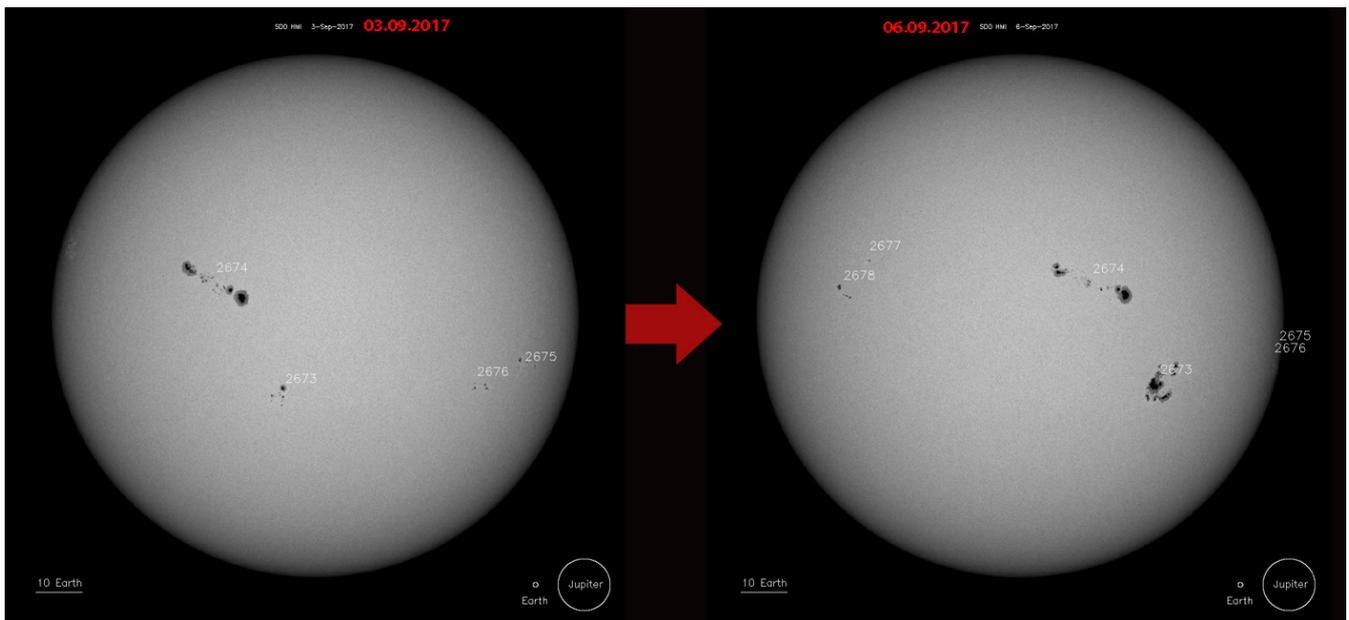
Questa mia scelta di Solarscan non fu dettata solo dalla qualità dello strumento e dei suoi componenti, ma anche dalla consapevolezza della sua affidabilità e costanza ripetitiva nel tempo nelle osservazioni del fenomeno in questione.

In realtà, anche se non l'ho sperimentato direttamente, strumenti come VHIRSS potrebbero comunque registrare il fenomeno, specie sulle macchie solari di maggiori dimensioni.

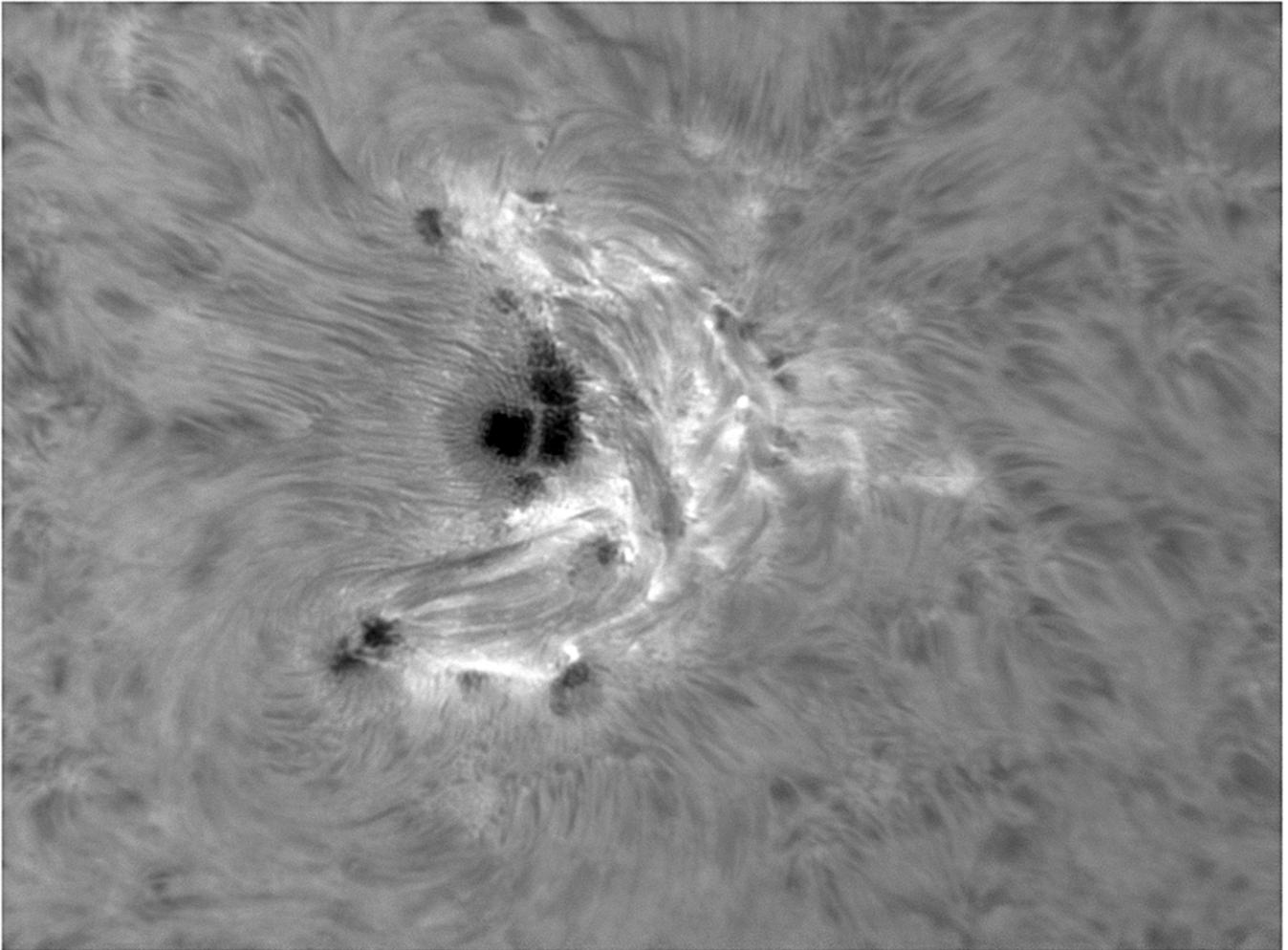
Esemplificativo è stato il caso di quella che si è rivelata la macchia solare più intensa del 2017, la AR 2673, la cui osservazione fu effettuata il 6 settembre 2017. Tale macchia, facente parte di una regione attiva piuttosto complessa come si osserva nella figura sottostante (SDO- HMI) nella quale 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)



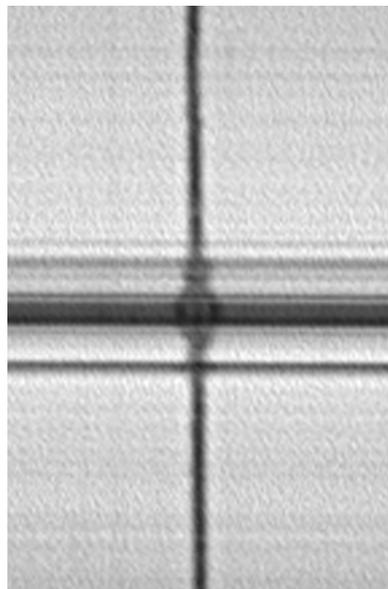
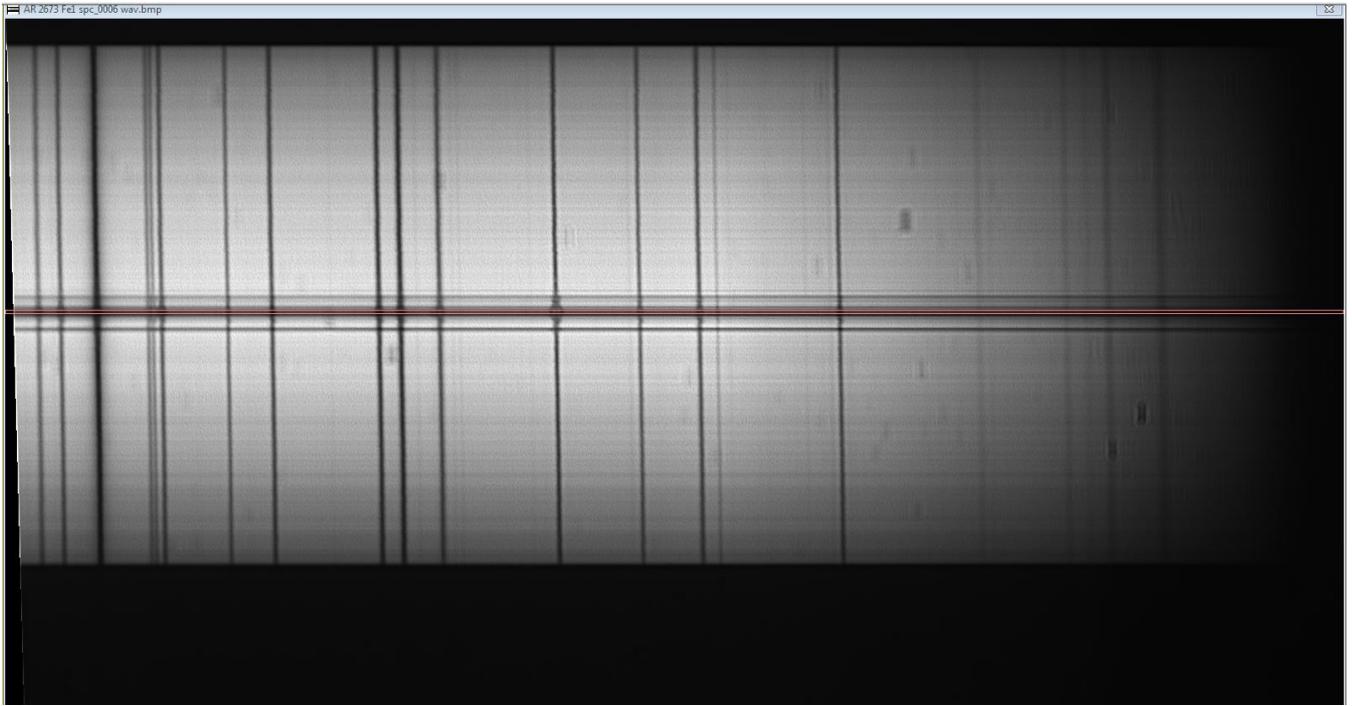
Evoluzione temporale dell'AR 2673 nei tre giorni dal 3 al 6 settembre 2017.



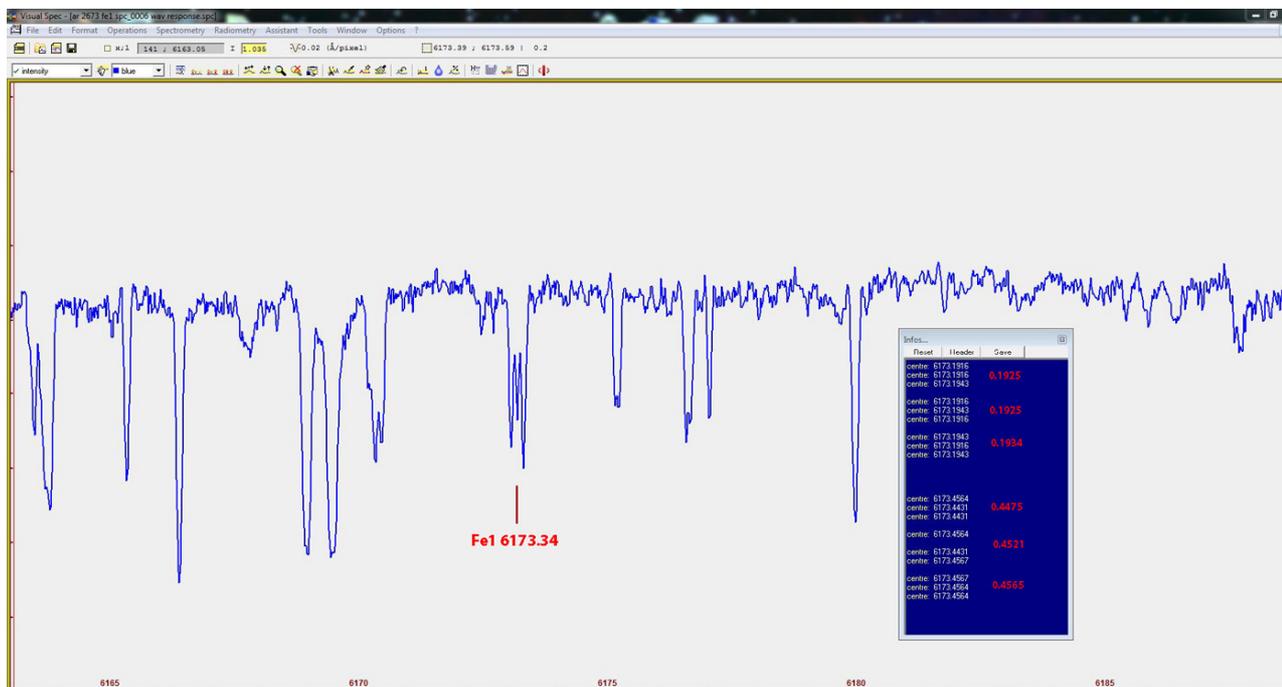
La complessa attività intorno alla macchia 2673: foto dell'autore in luce H α con un rifrattore acromatico da 150 mm di apertura e 900 mm di focale (con un ERF da 70 mm nel percorso ottico) ed un filtro H α Daystar Quark cromosphere.

Tale sviluppo era sintomo di un'attività magnetica complessa, come del resto si è constatato dai numerosi microflares e flares (il più grande uno di classe M8.1): la macchia era quindi il candidato ideale per una misurazione sufficientemente precisa del suo campo magnetico in luce non polarizzata.

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 l'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 and the magnetic field 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:

2913 +- 45 Gauss *

Ed ecco come uno strumento essenzialmente concepito per spettroeliografia può essere destinato ad un compito per certi versi molto più impegnativo e difficile, 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 settanta del 1900 in tandem con quella di Mount Wilson.

Questo dimostra, se ce ne fosse bisogno, la versatilità di uno spettroscopio Littrow ad alta risoluzione nell'osservazione solare.

*) 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>

Ovvero l'articolo sul numero 222/ 2018 della rivista on line Coelum

Conclusioni

Siamo giunti al termine di questa carrellata su un tema non certo popolare, ma penso interessante per la maggior parte degli astrofili , quello della spettro eliografia digitale e dei suoi strumenti. 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 della figura, possiamo immaginare, senza allontanarci troppo dalla realtà, 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 una comune videocamera da poche decine di euro.

E' un ulteriore dimostrazione di come il progresso dell'informatica abbia saputo stravolgere le nostre esistenze, rendendo possibile l'inimmaginabile di pochi decenni 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, ed un augurio per tutti coloro che qui in Italia vorranno mettere le loro capacità al servizio di questa branca dell'Astronomia.

Roma, 1 gennaio 2019

Cordialmente





=



Riferimenti e Link

Ken M. Harrison – Imaging sunlight with a digital spectroheliograph- Springer

Egidio Landi degl’Innocenti – Fisica Solare – Springer

J.M Lerner and A.Thevenon- Tutorial in Spectroscopy-Horiba Yobin Yvon

J.M Malherbe Meudon spectro tour - BASS 2000 – 2013

Thorlabs – Introduction to diffraction gratings

NASA – Sun fact sheet-

<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>

NASA – Stereo

<https://stereo.gsfc.nasa.gov/>

NASA- SDO

<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>

NASA – The cromosphere

<https://eclipse2017.nasa.gov/chromosphere>

Phil Rousselle - Observing the sun with a Spectroheliograph-

<http://www.astrosurf.com/spectrohelio/index-en.php>

University of Chicago Photographic Archive- Kenwood Observatory

Frederick Veio – Leonard Higgins – The spectrohelioscope.org

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

Siti web dell'autore

<http://www.lightfrominfinity.org/>

<http://www.pno-astronomy.com/>

<http://www.amateur-astronomy-researchers.com/>