



Responsabile della Sezione: **Fulvio Mete** spettroscopia@uai.it

Funzionamento dei principali tipi di spettroscopi astronomici

di Fulvio Mete

Generalità sugli spettroscopi

Gli elementi di uno spettroscopio tipo sono essenzialmente quattro: l'elemento dispersivo, prisma o reticolo, la fenditura, l'ottica collimatrice, l'ottica della camera o di osservazione. A questi quattro elementi fondamentali deve aggiungersi il box contenente il reticolo o il prisma, col sistema meccanico di movimentazione dell'elemento che disperde o diffrange, ovvero quello che consente il basculamento dello stesso sul proprio asse.

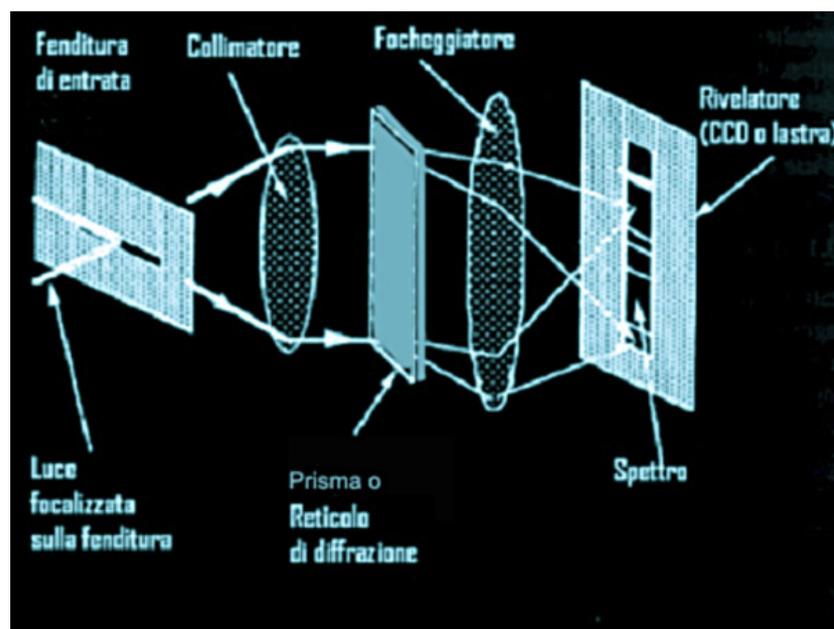
La **fenditura** assolve l'importante funzione di costituire l'apertura di entrata di uno spettroscopio e di garantire l'omogeneità della radiazione in ingresso che arriva al mezzo di dispersione (prisma o reticolo) per tramite del collimatore

L'**Ottica di collimazione o collimatore** è l'elemento di uno spettroscopio la cui funzione è di rendere parallelo il fascio ottico da inviare al reticolo, ossia di collimarlo. In pratica si tratta (se costituito da sistemi a lenti) di un cannocchiale sistemato all'incontrario, il cui obiettivo è rivolto verso il reticolo e sul cui foceggiatore è alloggiata la fenditura

L'**elemento dispersivo o diffrattivo (Prisma o sistema di prismi; reticolo a trasmissione o a riflessione)** costituisce il cuore dello spettroscopio, ossia il componente che effettua la dispersione della luce nelle sue varie lunghezze d'onda

L'**ottica di osservazione** ha la funzione di ingrandire il fascio parallelo diffratto proveniente dal reticolo, ossia lo spettro, ed osservarlo tramite un oculare o riprenderlo con una camera CCD, webcam, digicam o quant'altro

Qui di seguito si riporta uno schema generale, classico, di spettroscopio con elementi a trasmissione, reticoli o prismi:

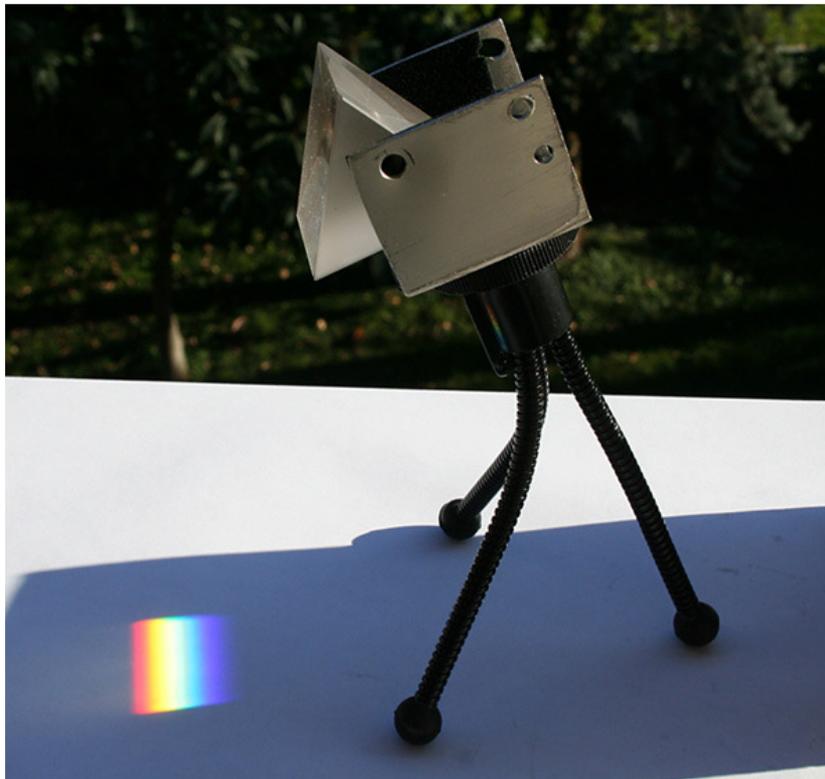


1- Spettroscopi a prismi

La dispersione della luce con un prisma

La luce del sole (e di molte altre stelle) è luce bianca e va quindi dispersa in tutte le sue componenti monocromatiche, dal violetto al rosso. Il modo più semplice e più usato in passato per ottenere ciò è quello di usare un prisma, sfruttando il principio della rifrazione, in base al quale quando la luce passa attraverso un prisma le lunghezze d'onda più lunghe (parte rossa dello spettro) vengono rifratte in misura diversa e subiscono una deviazione con un angolo inferiore di quelle più corte (blu-violetto). Nella figura è mostrato un esempio di spettro solare ottenibile con un prisma a 60° opportunamente orientato, proiettato su un foglio di carta bianca. Un prisma può anche essere anteposto ad un obiettivo fotografico agendo quale prisma-obiettivo per la registrazione di spettri stellari.

Dal punto di vista dell'indagine spettroscopica, il prisma presenta un vantaggio, la concentrazione della luce diffratta in un solo ordine, con un guadagno di luminosità ed efficienza che può raggiungere anche il 100%, ed un serio inconveniente: la dispersione spettrale è piuttosto limitata, come si può osservare nella Fig 2 dove uno spettro ottenuto con un prisma di vetro flint è messo a confronto con quello con un reticolo di diffrazione a trasmissione da 300 l/mm. Inoltre, cosa ancora più importante, la dispersione è non lineare, in quanto proporzionalmente minore nella parte rossa dello spettro rispetto a quella blu-violetto: lo spettro blu-violetto avrà quindi un'estensione maggiore di quello rosso:



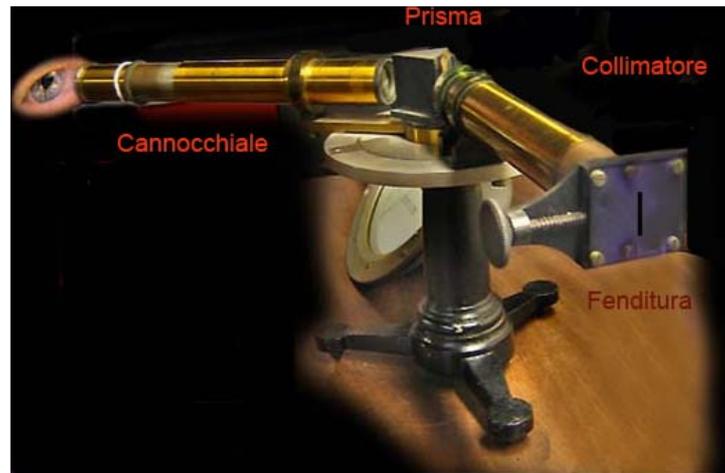
Dispersione della luce solare di un prisma: notare la differente estensione dello spettro blu rispetto al rosso



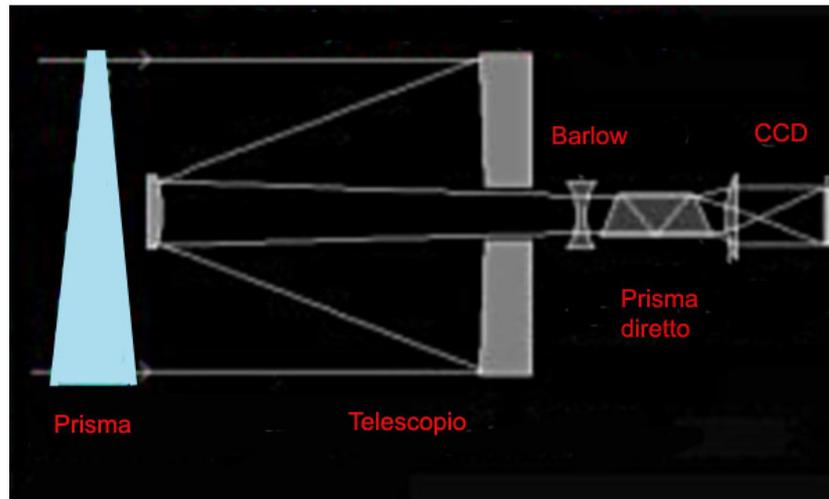
Confronto tra la dispersione di un prisma e quella di un reticolo

Gli spettroscopi a prisma furono usati nel secolo scorso, prima dell'avvento del reticolo di diffrazione, ideato da Norbert e perfezionato dall'americano Rowland. Furono spesso usati strumenti con un "treno" di prismi in serie, anche sei od otto, per aumentare la dispersione spettrale, piuttosto limitata con un solo prisma. Qui di sotto è riportata

l'immagine di un semplice spettroscopio a prisma. Ai giorni nostri quasi tutti gli strumenti professionali sono dotati di spettroscopi a reticolo di diffrazione, se si eccettuano alcuni, come, ad esempio gli "Echelle", capaci di funzionare, come vedremo, con un reticolo ed un prisma.



Un sistema alternativo di spettroscopio a prisma era quello, oggi in disuso, che utilizzava il cd. "Prisma obiettivo", ovvero un prisma di circa 10° di angolo e di diametro pari all'obiettivo del telescopio. La dispersione era però limitata, il peso ed il costo piuttosto notevoli in rapporto alle prestazioni. Per aumentare la dispersione dello spettro poteva anche essere utilizzato un secondo prisma a visione diretta in uscita dal telescopio.



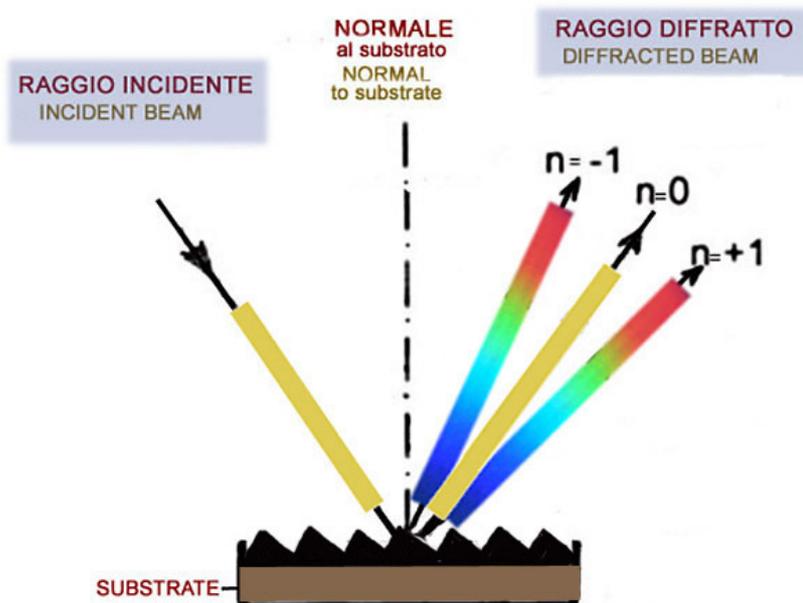
1- Spettroscopi a reticolo

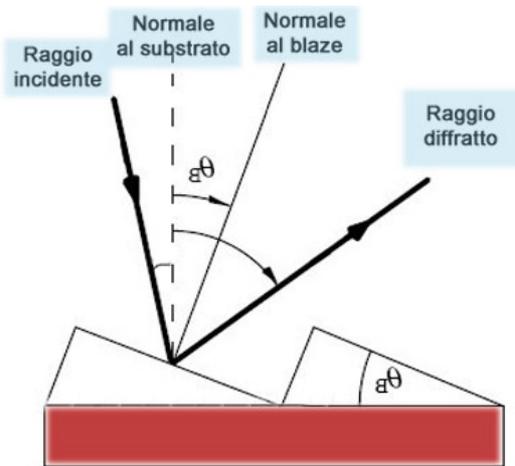
La diffrazione con reticolo

Una breve premessa sulla natura della diffrazione della luce, sulla quale si basa la costruzione dei reticoli. La diffrazione è un fenomeno basato sulla stessa natura ondulatoria della luce e consiste nella deviazione rispetto alla propagazione in linea retta che un'onda presenta quando incontra un ostacolo: se consideriamo la diffrazione che avviene col passaggio di un fascio di luce attraverso due fenditure, esistono regioni dove si crea un'interferenza costruttiva, e regioni dove si crea un'interferenza distruttiva. L'interferenza costruttiva avviene ad angoli diversi a seconda delle diverse lunghezze d'onda (colori). Tale concetto può essere generalizzato per n fenditure, e le linee o scanalature del reticolo possono essere assimilate a delle fenditure: maggiore quindi sarà il numero delle linee per mm del reticolo e maggiore sarà la dispersione che esso, a parità di altre condizioni, potrà fornire. Si può quindi definire in ultima analisi il reticolo di diffrazione come *quello strumento capace di trasmettere o riflettere o (a seconda che sia a trasmissione o a riflessione) le diverse lunghezze d'onda di una sorgente di luce policromatica in diversi angoli di diffrazione*. Il fascio di luce incidente su un reticolo è in parte trasmesso o riflesso (Ordine 0) ed in parte diffratto più volte sia a destra che a sinistra del raggio stesso, secondo i vari ordini di diffrazione (che non sono altro che i picchi di energia luminosa diffratta), che prendono numeri negativi e positivi. L'ordine 1 è quello nel quale il fascio diffratto presenta la maggiore energia relativa, mentre negli altri man mano questa decresce. l'ordine 1 (ed in particolare il +1) è lo spettro più luminoso, dove l'energia è maggiore ma anche quello dove la dispersione è minore rispetto agli ordini inferiori, nei quali

gli spettri sono più elongati. Nei reticoli con un numero medio basso di linee/mm si verifica il fenomeno della sovrapposizione degli ordini. In sintesi, accade che la parte rossa dell'ordine 1 si viene a sovrapporre parzialmente a quella UV dell'ordine 2, lo spettro rosso dell'ordine 2 viene a sovrapporsi a quello blu dell'ordine 3 e così via, "inquinando" l'immagine spettrale. A tale problema si ovvia, in genere, con l'uso di filtri che isolano la lunghezza d'onda che si desidera osservare, ovvero con l'uso di reticoli con un elevato numero di linee/mm (superiore a 1200) in modo da "distanziare" tra loro gli spettri dei vari ordini ed evitare o ridurre (entro certi limiti) il problema. Quanto detto in precedenza impone anche una considerazione; l'ordine zero, come si è visto, costituisce l'immagine reale dell'oggetto celeste di cui si vuole osservare lo spettro, sia esso stella, pianeta o sole, quindi occorre prestare la massima attenzione, specie con i sistemi di spettroscopi senza fenditura od a fenditura molto aperta, dotati di reticoli a trasmissione, a non osservare mai l'immagine diretta di ordine 0 del sole. I reticoli oggi più usati per gli strumenti professionali sono tuttavia quelli a riflessione, e ciò, oltre che per motivi progettuali anche per una semplice considerazione: nei reticoli a trasmissione il processo di blazing risulta più difficile e costoso e meno efficiente; nei reticoli commerciali a trasmissione in acetato la maggior parte dell'energia luminosa (circa il 60%) è convogliata verso l'ordine 0, ovvero l'immagine dell'oggetto, e la restante divisa tra i vari ordini, inoltre, e questo è l'aspetto fondamentale, i reticoli a trasmissione mantengono la loro efficienza solo per un ridotto numero di linee per mm. Nei reticoli a riflessione risulta invece molto più facile, effettuando le incisioni sul reticolo secondo un certo angolo, detto angolo di "blaze" convogliare il massimo dell'energia luminosa, sino anche al 90% su di un solo ordine (non necessariamente il primo), e, al suo interno, in una data lunghezza d'onda, con ovvie conseguenze positive sul flusso di intensità e sull'incisione dell'immagine spettrale. Si dirà quindi che il reticolo X è "blazed" per 500 nm nell'ordine 1 quando la maggior parte dell'energia luminosa diffratta verrà diretta verso tale ordine e, principalmente, verso la zona blu-verde dello spettro di ordine 1. Inoltre i reticoli a riflessione consentono alti numeri di linee per mm (sino a 1800 i "ruled" e 2400 gli olografici per il visibile).

Un esempio del funzionamento di un reticolo a riflessione semplice è quello riportato nella figura seguente, si può osservare la scomposizione dello spettro nei vari ordini, a destra e sinistra dell'ordine 0 (per comodità sono riportati solo i primi) ed il fatto che lo spettro di ordine 0 non è altro che la riflessione del raggio incidente.

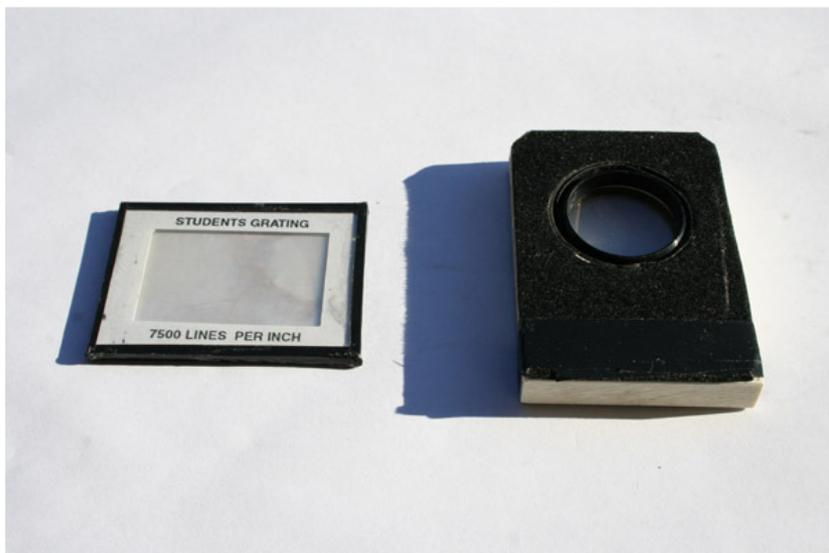
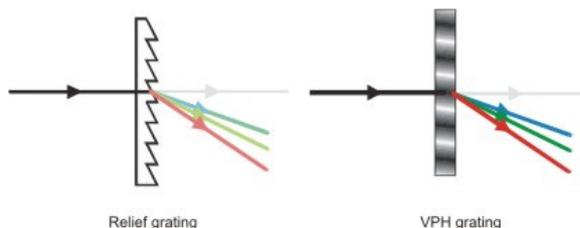




Particolare del blazings

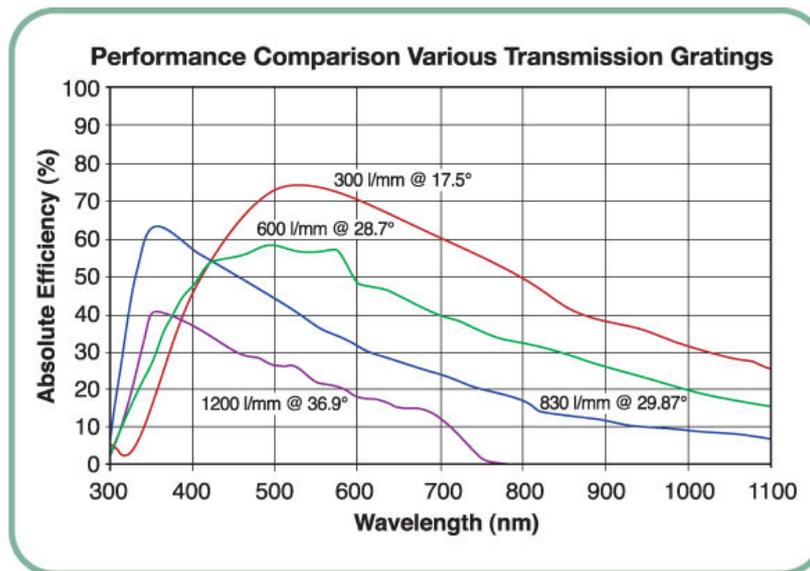
Reticoli a Trasmissione

Il reticolo di diffrazione a trasmissione è quello nel quale la luce passa attraverso un substrato in vetro ottico per subire poi in uscita una diffrazione nei vari ordini spettrali.



Esempi di reticoli a trasmissione

Come si è detto, i reticoli di diffrazione a trasmissione richiedono una densità di linee per mm relativamente bassa per mantenere intatta la loro efficienza. Ciò perché, aumentando gli angoli di diffrazione con l'aumentare del numero di righe, le proprietà rifrattive del materiale del substrato limita la trasmissione, specie alle lunghezze d'onda più elevate, e le prestazioni decadono. Nel seguente grafico (fonte Thorlabs Inc.) sono mostrati i differenti grafici prestazionali dei predetti reticoli, dal quale si desume che, aumentando il numero di righe per mm, l'efficienza diminuisce ed il picco di trasmissione è spostato verso le lunghezze d'onda minori.



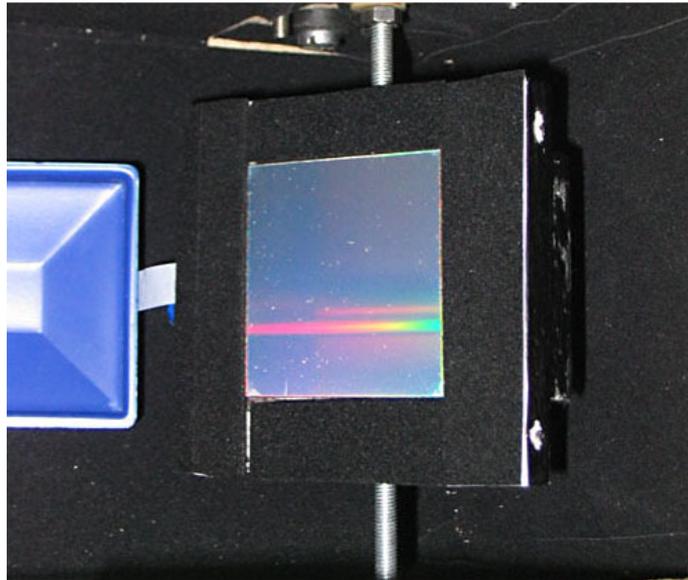
Reticoli a riflessione

Esistono due tipi fondamentali di reticoli a riflessione, uno denominato reticolo inciso (*"Ruled diffraction grating"*) che consiste di un substrato di vetro ottico alluminato sul quale vengono incise, con un apposito strumento a punta di diamante un gran numero di righe equidistanti : tali incisioni, angolate, vengono effettuate in modo tale da concentrare il massimo dell'energia luminosa in un dato angolo e quindi in una determinata lunghezza d'onda: in reticolo si dice allora "blazed" per quella data lunghezza d'onda. La lunghezza d'onda di "blaze" è quindi quella dove il reticolo ha la massima efficienza. Di tali reticoli vengono messe in vendita repliche dell'originale, di prezzo all'incirca 1/10 dell'originale stesso. A tale riguardo è necessaria una precisazione: aumentando il numero degli ordini, diminuisce dello stesso rapporto l'efficienza del reticolo nell'angolo di blaze per cui è stato prodotto: vale a dire che un reticolo che è stato "blazed" per 5000 Å nel 1° ordine sarà blazed, cioè avrà il picco di efficienza a 2500 Å nel 2° ordine. In parole povere, se voglio investigare, ad es. il tripletto del Magnesio a 5167 Å nel 2° ordine, per avvantaggiarmi di una maggiore dispersione, allora dovrò procurarmi un reticolo blazed per 10000 Å nel 1° ordine oppure per 5000 Å nel 2° ordine. Tale avvertenza è necessaria in quanto gli angoli di blaze pubblicizzati dalle case produttrici si riferiscono in genere al 1° ordine, in quanto considerati per sistemi Littrow autocollimanti. Occorre anche tener conto delle modalità costruttive dei reticoli e delle relative curve di efficienza, che spesso differiscono a seconda delle modalità costruttive e per i materiali usati. Per una migliore comprensione del processo di blazing nei reticoli a riflessione si può osservare la figura; in pratica il blazing è il processo in base al quale si angolano le incisioni di un reticolo, in modo da ottenere una nuova normale, non più perpendicolare al substrato, ma al piano angolato dell'incisione, in modo che la posizione di massima intensità, prima corrispondente al raggio riflesso di ordine $n = 0$, è spostata verso una nuova riflessione, nella direzione nella quale il raggio incidente avrebbe dovuto essere riflesso sulla base delle leggi dell'ottica geometrica. Ciò comporta una maggiore energia luminosa del segnale diffratto nella zona spettrale corrispondente a quella per la quale è stato calcolato l'angolo di blaze.

Il secondo tipo è denominato "olografico" (*"Holographic diffraction grating"*) nel quale le righe sono ottenute con tecniche olografiche, con l'uso di lasers, e nei quali le relative incisioni sono di apparenza smussata, sinusoidale. Possono essere "blazed" solo con speciali procedimenti, che ne fa lievitare notevolmente il costo, per contro possiedono meno luce diffusa dei reticoli "ruled".

Esistono anche reticoli di diffrazione concavi (*"Concave diffraction grating"*) essi sono ricavati su un substrato di vetro ottico concavo, che quindi ha una focale. In questo modo tali reticoli hanno una molteplice funzione, in quanto fungono sia da elemento dispersivo che da collimatore ed ottica di osservazione nello stesso tempo. La loro caratteristica è che mettono a fuoco su un cerchio, detto cerchio di Rowland, a seconda della lunghezza d'onda. Essi sono in genere ottenuti con procedimenti olografici. La controindicazione è il loro costo, che è elevato. Il sottoscritto è venuto fortunatamente in possesso di uno di essi, estratto da uno spettrometro di massa acquistato d'occasione in un mercatino, ed è rimasto stupito dalla versatilità di un simile reticolo, che da solo, con una fenditura ed un oculare, permette di osservare spettri solari di eccellente qualità (vedi lo spettroscopio COGOS nel link "spettroscopia solare"). Il loro costo è tuttavia molto elevato (un reticolo concavo da 25 mm costa circa 700 €).

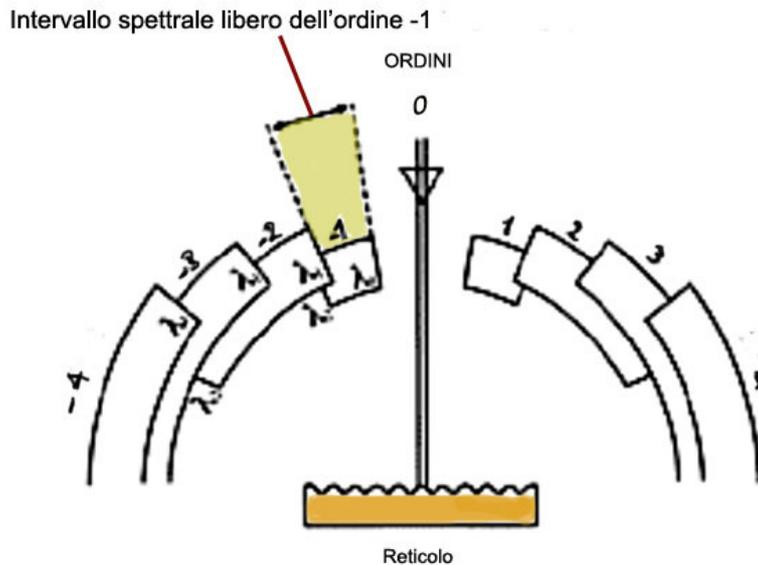
Oltre ai tipi suddetti esiste infine una categoria di reticoli detti "*Echelle Gratings*", di utilizzo sinora limitato all'ambito professionale, ma che cominciano ora ad essere disponibili anche in ambito amatoriale, seppur a costi piuttosto elevati, che permettono l'uso degli ordini di numero più alto, quelli a maggiore dispersione, che nei reticoli normali presentano un angolo troppo elevato per essere utilizzabili e che essendo sovrapposti l'uno all'altro vengono separati da un secondo elemento dispersore posto a croce col primo.



Esempio di un reticolo a riflessione "Ruled" da 1800 l/mm

I parametri fondamentali di un reticolo sono:

- 1) Gli Ordini di diffrazione, ovvero il numero di raggi diffratti dopo la trasmissione o riflessione, che si trovano a destra e a sinistra del raggio trasmesso o riflesso (ordine 0). I reticoli a basso numero di righe per mm possono generare un notevole numero di ordini. Gli ordini di numero più elevato offrono una dispersione spettrale maggiore.
- 2) La dispersione spettrale, che è data dalla variazione dell'angolo di diffrazione per la variazione della lunghezza d'onda, e che misura la separazione angolare tra i raggi di lunghezze d'onda adiacenti. Essa aumenta con l'aumentare del numero di linee per mm del reticolo e con l'aumentare dell'ordine spettrale. Essa si misura in Angstrom per mm o, nel caso di camere CCD, per pixel del sensore.
- 3) L'ampiezza spettrale libera, considerata come il maggiore intervallo di lunghezza d'onda di un dato ordine che non si sovrappone al medesimo intervallo di un ordine adiacente. Esso aumenta con l'aumentare delle righe per mm dei reticoli e diminuisce con l'aumentare del numero dell'ordine.



4- La Risoluzione: La risoluzione di un reticolo può essere definita come la separazione tra due righe spettrali che possono essere osservate come separate dallo strumento. Essa è funzione dell'ordine e del numero delle righe estese a tutta la superficie del reticolo (in pratica il n° per mm X le dimensioni del reticolo).

Si avrà $R = O \times R \times D$

dove O = ordine; R= n. righe per mm; D= dimensioni del reticolo in mm.

Quindi, un reticolo da 1800 l/mm di 50 mm di lato avrà, nell'ordine 1, una risoluzione di $1800 \times 50 \times 1 = 90.000$

Essa varia in funzione inversa della lunghezza d'onda, diminuendo al crescere di questa a parità delle altre condizioni e, quindi, nel caso precedente, il reticolo avrà, a 500 nm una risoluzione di $500/90.000 = 0.0055$ nm e, a 1000 nm, una di $1000/90.000 = 0,011$ nm.

Ovviamente tali condizioni sono teoriche, nell'ipotesi che il reticolo venga pienamente illuminato dal fascio di luce proveniente dal collimatore.

Gli Spettroscopi

Possiamo ora parlare degli strumenti per la spettroscopia ed in particolare della loro autocostruzione. Per comodità mi riferirò esclusivamente agli spettroscopi a reticolo, in conseguenza dell'elevato livello di efficienza raggiunto dai reticoli.

Gli elementi necessari per la costruzione di uno spettroscopio amatoriale tipo sono essenzialmente quattro: il reticolo, la fenditura, l'ottica collimatrice, l'ottica della camera o di osservazione. A questi quattro elementi fondamentali deve aggiungersi il box contenente il reticolo, col sistema meccanico di movimentazione del reticolo, ovvero il basculamento dello stesso sul proprio asse, in modo da poter esplorare tutto lo spettro di un dato ordine. Per immagini e riferimenti sugli strumenti completi vedere i link del presente sito sugli strumenti per la spettroscopia, la spettroscopia solare e stellare, e gli strumenti CLAUS, HIRSS e HIRSS2.

Del [reticolo](#) ho discusso in precedenza: preciso soltanto che intenderò riferirmi in seguito ai reticoli a riflessione, che sono quelli da me usati nei miei spettroscopi, passo ora a parlare della fenditura.

La [fenditura](#) assolve l'importante funzione di costituire l'apertura di entrata di uno spettroscopio e di garantire l'omogeneità della radiazione in ingresso che arriva al mezzo di dispersione (prisma o reticolo) per tramite del collimatore. Per assolvere in modo ottimale questa funzione è necessario che le lame della fenditura siano lavorate a tolleranze ottiche, siano perfettamente parallele, e la loro distanza reciproca sia regolabile, come un diaframma.

Una fenditura professionale che risponda a tutti questi requisiti avrebbe tuttavia il difetto, per un amatore, di costare

sicuramente di più dell'intero spettroscopio che egli conta di assemblare (mediamente tra i 300 ed i 1000 €). Occorre quindi fare di necessità virtù e scendere a qualche compromesso.

Il primo è l'autocostruzione, ma a tale proposito è bene dire che una fenditura regolabile, a meno di non avere la disponibilità di una officina meccanica, e di difficile autocostruzione, mentre una fenditura fissa è relativamente semplice da assemblare anche in casa. È bene, a tale riguardo, sgombrare il campo da un luogo comune che vuole che le lamette da barba costituiscano l'ideale: le lame affilate da entrambi i lati non funzionano, in quanto suscettibili di dare immagini impastate o doppie, è necessario che le lame abbiano un profilo triangolare con la parte piana rivolta verso la sorgente di luce; ed un oggetto di uso comune che possieda lame rispondenti a tale requisito è un temperamatite, anche se con l'inconveniente di essere generalmente di ferro anziché di acciaio, e di poter dare origine a ruggine. Si trovano, tuttavia, anche temperamatite con lame in acciaio, e sono i più adatti. Personalmente ho una vasta provvista di temperamatite, e spesso, quando vado ad acquistarli, sorrido nel vedere la faccia meravigliata ed incuriosita del venditore nel vedere che li osservo controllo per verificare la qualità delle lame: un modo di costruzione di una fenditura del genere è descritto al link: <http://www.lightfrominfinity.org/autocostruzione.htm>. Un'altra possibilità, per le fenditure regolabili, è quella di rivolgersi al mercato del surplus, dove un rivenditore americano, Surplused (<http://www.surplused.com>), ne vende alcune ad un prezzo assolutamente conveniente e con un eccellente rapporto qualità-prezzo. Ritengo queste ultime le più utili per la costruzione di uno strumento di una certa precisione. Per quanto riguarda il controllo della fenditura, sia essa autocostruita che acquistata, occorre dire che l'esame delle lame con un mirino loupe od altro sistema di ingrandimento può essere utile esclusivamente per verificare il parallelismo delle lame, e non anche la loro qualità, specie a fenditura molto chiusa; per ottenere ciò è consigliabile esaminare le frange d'interferenza prodotte dal passaggio attraverso le lame da un raggio di luce coerente, possibilmente quella di un laser, meglio se a luce verde. Più queste sono dritte, ben delineate e regolarmente spaziate, più la fenditura è adatta per l'uso cui è destinata.

L'Ottica di collimazione o collimatore è l'elemento di uno spettroscopio la cui funzione è di rendere parallelo il fascio ottico da inviare al reticolo, ossia di collimarlo. In pratica si tratta (se costituito da sistemi a lenti) di un cannocchiale sistemato all'incontrario, il cui obiettivo è rivolto verso il reticolo e sul cui foceggiatore è alloggiata la fenditura: in tal caso l'obiettivo, con la fenditura posta sul fuoco come un diaframma, si comporta da lente telecentrica ed invia un fascio di raggi paralleli al reticolo. In prima approssimazione, per verificare che la fenditura sia posta esattamente sul punto di fuoco si può controllare visualmente l'incisione delle lame traggiate attraverso l'obiettivo, ma per un posizionamento preciso è necessario poi, una volta assemblato lo spettroscopio, foceggiare l'immagine dello spettro prima grossolanamente con l'obiettivo della camera e poi *spostando solo la fenditura* sino a che le righe non risulteranno le più nette possibili. La lunghezza focale del collimatore è connessa a quella dell'ottica di osservazione della camera, nel senso che in genere si opta per rapporti 1:1 rapporti diversi a favore dell'ottica di osservazione (tipo 2 o 3 a 1) avrebbero l'effetto ingrandire eccessivamente l'immagine (ossia le righe) senza alcun guadagno nella risoluzione spettrale, che è invece dato dal numero di righe per mm del reticolo e dalle sue dimensioni: la scelta della focale del collimatore dipenderà quindi dalla finalità di utilizzo dello strumento, per il sole o per le stelle, per l'alta o la bassa risoluzione. Per il sole è in genere preferibile usare focali medie o lunghe, data l'enorme quantità di luce in arrivo ed il notevolissimo numero di righe (oltre 8700) osservabili, per le stelle e con telescopi commerciali è bene invece tenersi su focali basse, anche per ottenere una scala immagine che comprenda la maggior parte dello spettro da osservare. Il diametro del collimatore dovrà coprire e preferibilmente essere leggermente superiore alla diagonale del reticolo (che si ottiene moltiplicando il lato per 1,4, nel caso di reticolo quadrato). Se, quindi, come è probabile, acquisteremo un reticolo quadrato da 30 mm, sarà necessario avere un collimatore di $D > 42$ mm.

L'ottica di osservazione ha la funzione di ingrandire il fascio parallelo diffratto proveniente dal reticolo, ossia lo spettro, ed osservarlo tramite un oculare o riprenderlo con una camera CCD, webcam, digicam o quant'altro. Il diametro dovrebbe essere pari alla diagonale del reticolo, od anche poco inferiore, mentre la lunghezza focale sarebbe opportuno fosse pari o al massimo leggermente superiore a quella del collimatore.

È bene precisare che esistono spettroscopi che richiedono una sola ottica per funzionare, che agisce contemporaneamente come collimatore ed ottica da osservazione. Tale schema meccanico, **chiamato Littrow od autocollimante** presenta l'innegabile vantaggio della compattezza e facilità d'uso, mentre gli svantaggi sono quelli dei riflessi spuri creati (specie nell'uso solare) dal fascio in ingresso e quello di ritorno, e che, dato il ristretto angolo tra i due fasci ottici, può essere usato solo per l'ordine 1.

Inutile dire che gli obiettivi fotografici e quelli (ma non tutti) per fotocopia, facilmente rinvenibili questi ultimi, nei mercatini o rivenditori di surplus, costituiscono eccellenti ottiche, sia di collimazione che della camera, per il campo piano che forniscono. La focale dovrebbe aggirarsi, per spettroscopi a risoluzione bassa e media, tra i 50 e 150 mm.

Un discorso a parte merita il **BOX contenente il reticolo** la cui struttura è in funzione del progetto di spettroscopio, se solare, stellare o di uso universale, e dell'ordine spettrale che si intende osservare con quel tipo di reticolo. Cerco di spiegarvi: se si intendono osservare spettri stellari, o, ad esempio, lo spettro solare nell'IR od in una data riga a risoluzioni elevate, e quindi l'intensità della radiazione in ingresso nello spettroscopio gioca un ruolo fondamentale, allora è necessario utilizzare l'ordine +1 (quello più luminoso) e quindi prevedere un angolo di circa 38° tra collimatore ed ottica della camera. Nel caso di spettroscopi solari a medio- alta risoluzione ed in tutti i casi in cui si intenda avvalersi di una maggiore risoluzione spettrale (spettri più estesi) al prezzo di una minore luminosità degli stessi, allora può essere utilizzato l'ordine -1, od ordini superiori al 1° che hanno una minore luminosità, ma il vantaggio di una maggiore dispersione con un angolo elevato che rende pratico un box con attacchi a 90°. Un modo piuttosto semplice e valido di realizzare un box è quello di tagliare un quadrato di alluminio 6 x 6 cm o 8 x 8 cm da 2 o 3 mm di spessore facendo ricavare dei fori filettati del diametro necessario (o filettati 42 x 1) su due delle facce a 90° per applicarvi le ottiche di collimazione ed osservazione, realizzando poi dei tappi laterali di chiusura che possono anche essere di PVC. Personalmente ho utilizzato tale soluzione in parecchi dei miei spettroscopi.

Spettroscopi "Classici" e sistemi autocollimanti

Come si è accennato in precedenza, gli spettroscopi costruiti con reticoli di diffrazione a riflessione, che sono quelli più comuni, sono compresi in due grandi categorie, dal punto di vista dell'arrangiamento meccanico e del progetto: quelli che usano due ottiche distinte, per la collimazione e l'osservazione, e quelli cd. "autocollimanti" o di Littrow, nei quali viene impiegata un'unica ottica. Quanto alle ottiche, abbiamo spettroscopi che utilizzano quelle a rifrazione ed altri che usano specchi. Quest'ultima categoria è in genere quella più usata negli strumenti professionali, dato che l'uso di diottri richiede l'adeguamento quasi continuo della messa a fuoco al mutare della lunghezza d'onda.

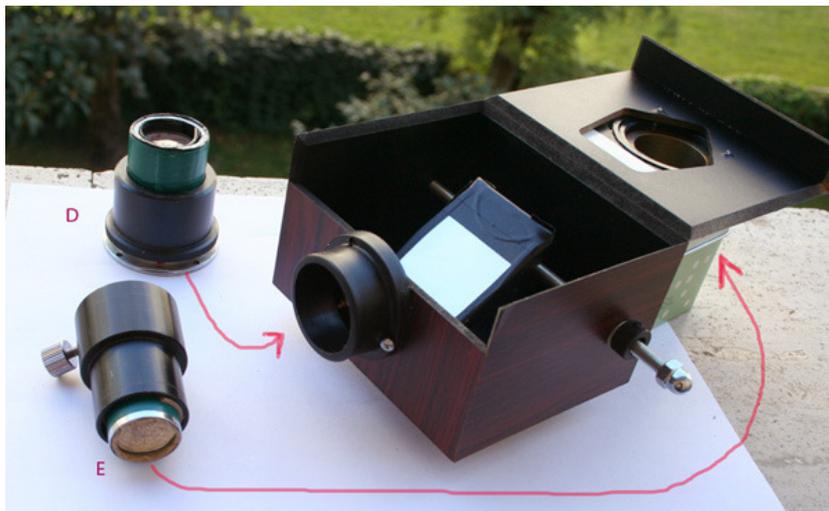
Alcuni dei principali spettroscopi a due (o più) ottiche.

Spettroscopio "classico"

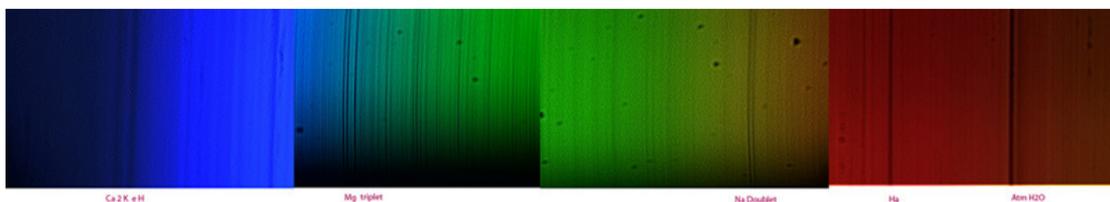
Come si può osservare nelle immagini che seguono, l'angolo tra le ottiche si aggira intorno ai 38-40°, e le ottiche stesse sono a rifrazione, piccoli rifrattori od obiettivi fotografici nei casi riportati, ma possono anche essere specchi. Questo schema di spettroscopio è senz'altro quello più usato dagli autocostruttori per la relativa facilità di costruzione e d'uso e per le prestazioni di tutto rispetto. E', tuttavia, indicato solo per focali ridotte, in quanto, col crescere di queste l'ingombro ed il peso diventano eccessive per qualsiasi strumento o montatura non professionale. Il progetto è piuttosto semplice: un cannocchiale montato all'incontrario, con la fenditura collocata dalla parte del foceggiatore, è posto a fuoco su quest'ultima, ed il fascio collimato uscente dall'obiettivo incontra il reticolo e viene indirizzato, sulla base dell'angolo di diffrazione per l'ordine 1 del reticolo, verso un secondo cannocchiale, posto con l'obiettivo rivolto anch'esso verso il reticolo, con il quale si può osservare lo spettro. Naturalmente i diametri degli obiettivi vanno scelti in misura tale da coprire il diametro o la diagonale del reticolo, per evitare vignettature, ossia di far lavorare lo stesso ad una risoluzione inferiore.

Dai più semplici ai più complessi:

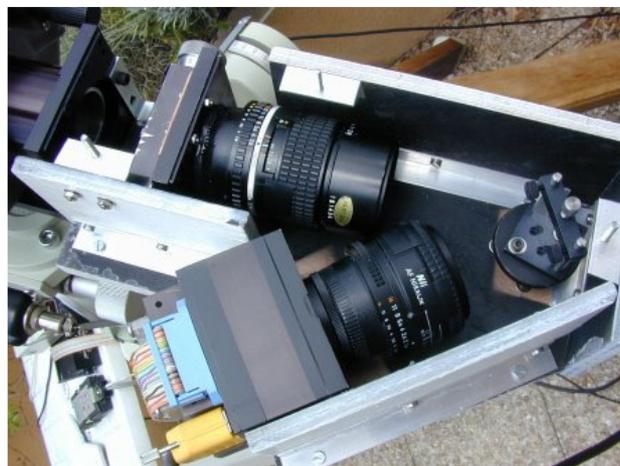




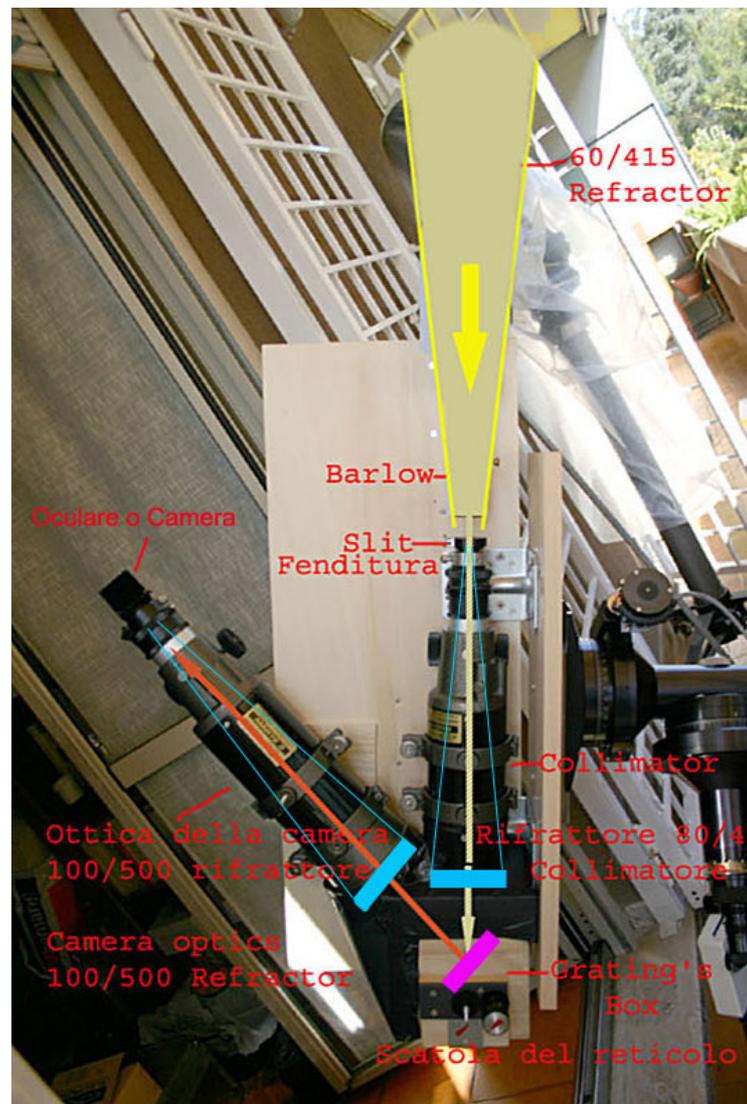
D: Barilotto con la fenditura e la lente di collimazione (visione posteriore)
 E: Barilotto portaoculari con la lente di osservazione



Nelle immagini che precedono è mostrato un semplicissimo spettroscopio autocostruito intorno ad un pezzo di CD Rom ed ad una scatola per cravatte, utilizzando una lente semplice come collimatore ed un doppietto come ottica di osservazione, entrambi di circa 60 mm di focale .Un esempio di spettro solare ottenibile con tale strumento fa capire come lo stesso sia utile esclusivamente per finalità didattiche o ludiche.

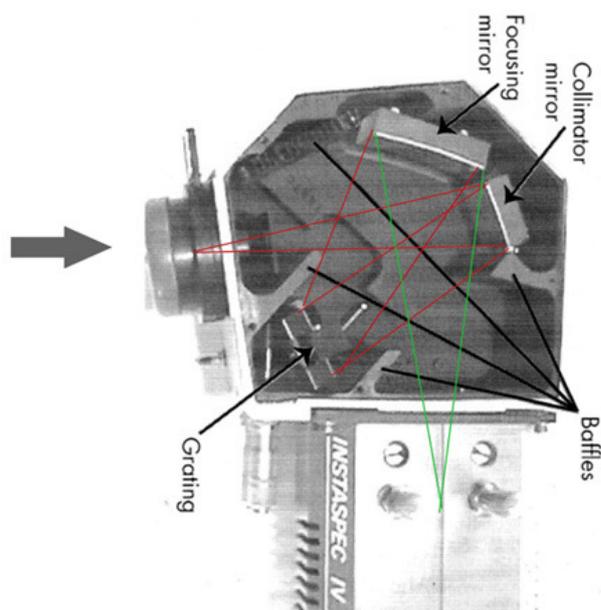


Spettroscopio "Meris" di C. Buil



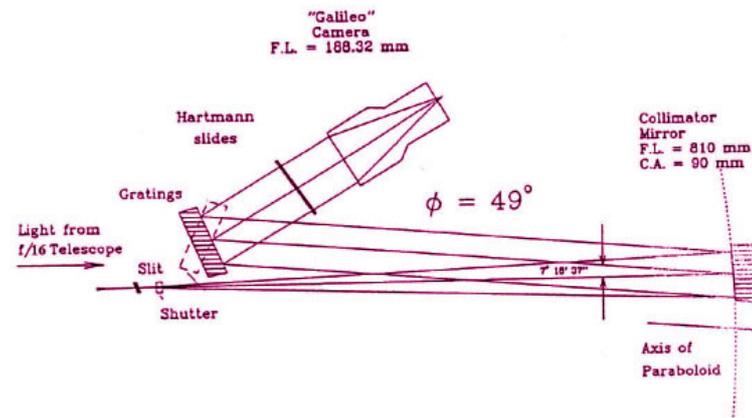
Spettroscopio "HIRSS2 di Fulvio Mete

Una variante di tale tipo di spettroscopi, ma a specchi, è lo schema Czerny-Turner a fasci incrociati, come quello dell'immagine che segue:



In questa classe di spettroscopi, ovviamente rapportata a strumentazioni d'ordine professionale, si può ritenere rientrare lo spettrografo "Boller e Chivens" costruito dalla Perkin Elmer americana ed in uso presso l'Osservatorio astrofisico di Asiago, al fuoco cassegrain del riflettore da 122 cm.



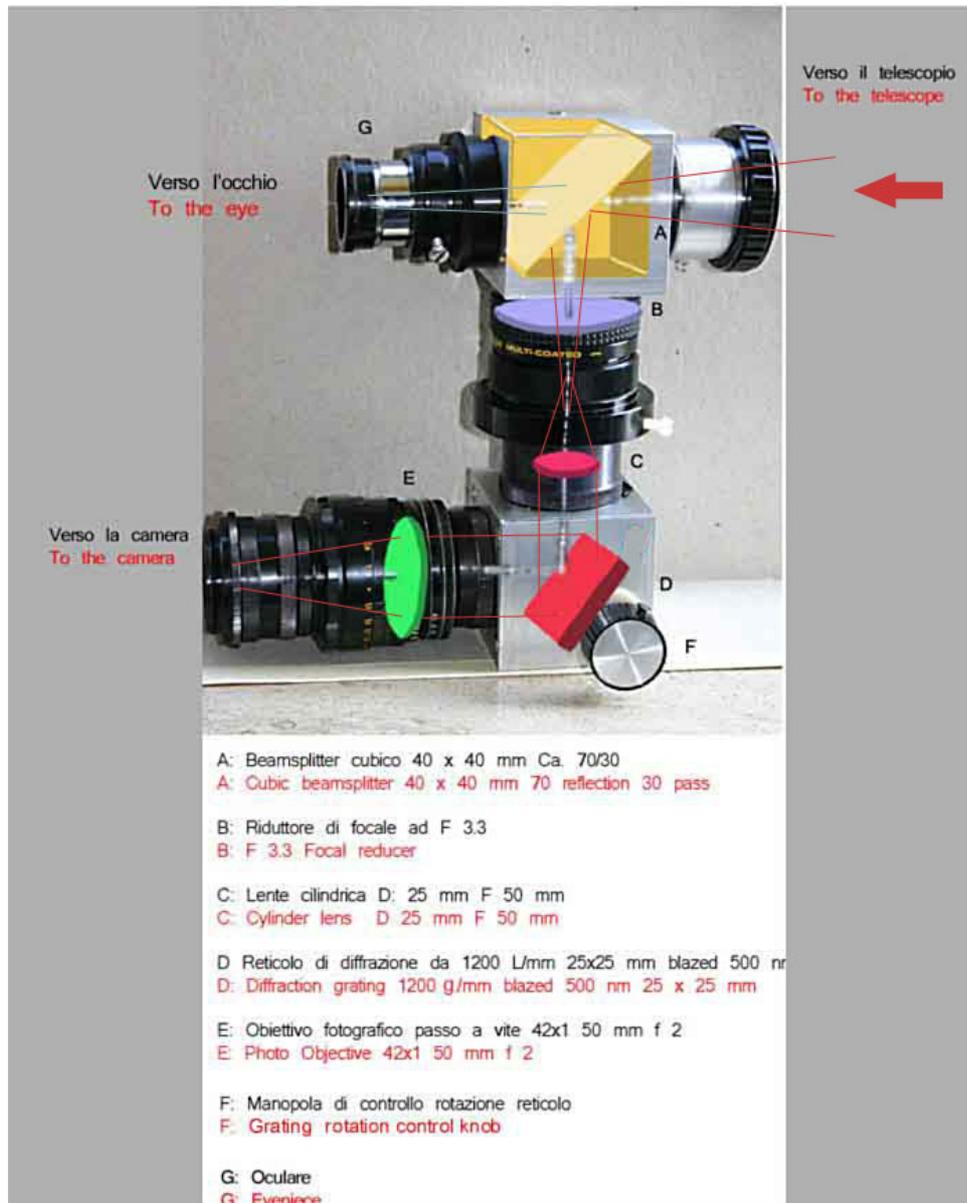


In questo caso abbiamo, come si può notare nello schema, uno specchio da 90 mm e 810 mm di focale, che agisce da collimatore ed una camera, la "Galileo", con una focale di 188 mm che svolge la funzione di ripresa dell'immagine spettrale.

Varianti del sistema classico a lente cilindrica

Gli spettroscopi cui si è fatto cenno usano una fenditura per selezionare la luce in arrivo ed incrementare la risoluzione del sistema; tuttavia tale scelta presenta, perlomeno in campo amatoriale, e per la spettroscopia stellare un inconveniente: per mantenere una stella su di una fenditura di pochi micron occorre una montatura di classe elevata e costosa, nonché uno stazionamento preciso e/o un sistema di guida affidabile; tutte complicazioni che vanno a rendere ancora più complessa la delicata fase di acquisizione degli spettri. Ebbi pertanto l'idea, qualche anno fa, idea poi certificata da una specifica richiesta di brevetto, di sostituire la fenditura reale con una virtuale, formata dall'immagine al fuoco di una lente cilindrica positiva. Il sistema funzionava sia per spettroscopia stellare che solare (con una piccola modifica). Il risultato di tale idea furono due spettroscopi, uno stellare ed uno sia stellare che solare. Il primo fu chiamato CLAUS (acronimo di Cylinder Lens Amateur Universal Spectroscope), il secondo TSA. Riporto sommariamente, qui di seguito, i relativi schemi costruttivi:

C.L.A.U.S. Project
 Cylinder lens amateur universal spectroscope
 by Fulvio Mete



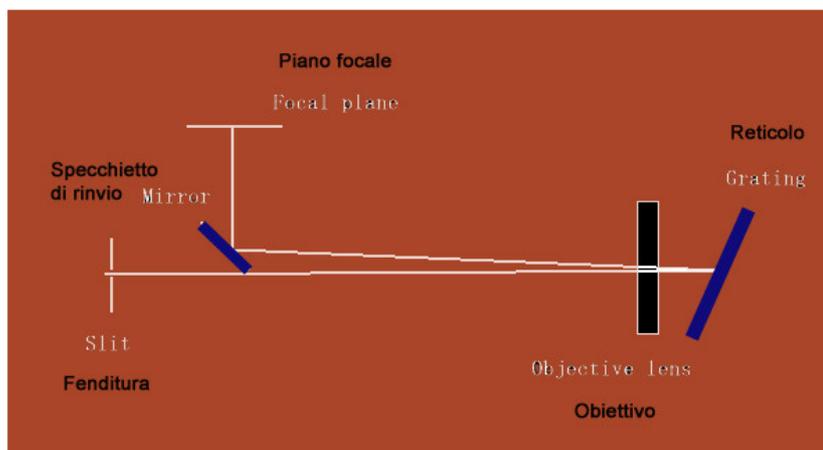
Come si vede, il progetto utilizza un divisore di fascio (beam splitter) 50-50 (ma andrebbe meglio un 60-40 o 70-30) che ripartisce la luce in arrivo in due parti, una che va ad un oculare per permettere la centratura fine della stella e/o la guida, ed un secondo che, per tramite di un riduttore di focale a f 3,3 (che incrementa la luminosità dell'immagine stellare), arriva ad una lente cilindrica positiva, che, agendo sia da collimatore che da fenditura, invia un fascio collimato al reticolo dal quale esce l'immagine diffratta della stella, osservata o ripresa con un normale teleobiettivo.

Un sistema ancora più semplice è dato dal TSA (Telescope Spectroscope Adapter), qui mostrato al fuoco di un Celestron 6, nel quale il fascio ottico non viene diviso, ma va direttamente alla lente cilindrica, al reticolo ed al cannocchiale di osservazione.

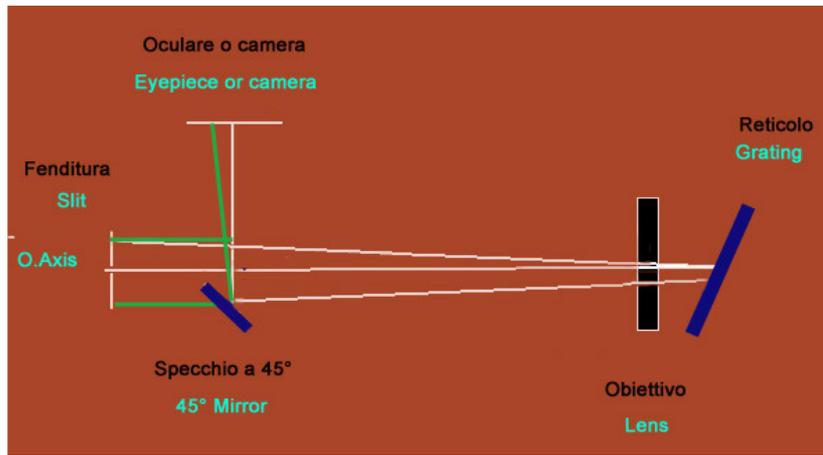


Spettroscopi con sistema Littrow autocollimante

Il principio fondamentale di tale tipo di spettroscopio è quello di usare una sola ottica, sia per la collimazione che per l'osservazione o la ripresa dello spettro. Ciò semplifica enormemente il progetto e riduce in modo drastico dimensioni e peso dello strumento. Il prezzo da pagare è, tuttavia, la luce diffusa, sempre presente anche con accurati sistemi di diaframmatura del fascio ottico in ingresso ed in uscita, che abbassa il contrasto; dato l'angolo ristretto esistente tra la luce in arrivo e quella in uscita dal reticolo, l'ordine spettrale che si osserva è quasi sempre l'ordine 1. Nel caso di costruzioni amatoriali appare inoltre delicata l'assialità del fascio in ingresso e di quello in uscita, dato che piccoli spostamenti delle fenditura in ingresso o del portaoculari in uscita porta a disallineamenti dello spettro osservato. Lo schema classico di tale strumento è il seguente: in tale schema lo specchio di rinvio al piano focale è posto al lato della fenditura, situata all'incirca sull'asse ottico.

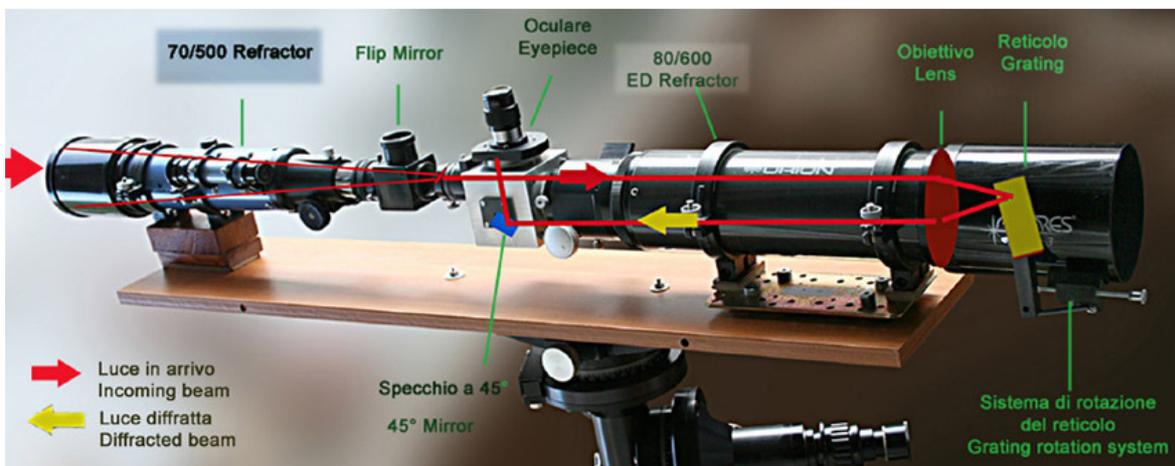


Una variante, che pone lo specchio di rinvio del fascio ottico diffratto proveniente dal reticolo in posizione specularmente opposta a quella della fenditura rispetto all'asse ottico (cd. "fasci incrociati") è la seguente:



Essa ha, a mio avviso, il pregio di permettere una migliore centratura dello spettro nel campo inquadrato ed un soddisfacente controllo delle riflessioni interne e della luce spuria.

a) Littrow solari

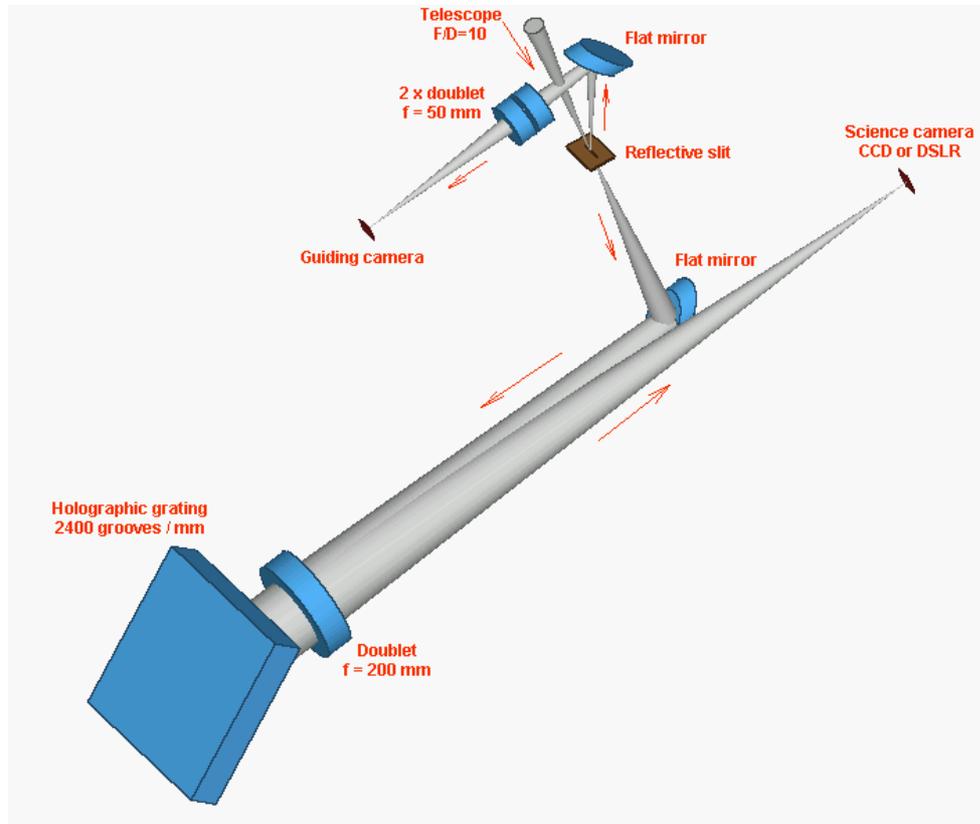


Nell'immagine che precede è riportato lo schema del mio spettroscopio- spettroelioscopio solare ad alta risoluzione VHIRSS. Esso prevede, tra l'altro, un sistema di decentramento sia della fenditura che del portaoculare in modo da ottenere la centratura dello spettro nel campo osservato contenendo al minimo i riflessi, senza l'uso di diaframmi interni, piuttosto difficili a realizzare e collocare.



Un altro schema praticamente identico al precedente, soltanto molto più portatile (4 Kg x 95 cm di lunghezza, equivalente per dimensioni e peso ad un rifrattore da 10 cm) realizzato da chi scrive col nome di POSS (PORTABLE Solar Spectrohelioscope) Lo strumento sarà prevalentemente usato come spettroelioscopio portatile

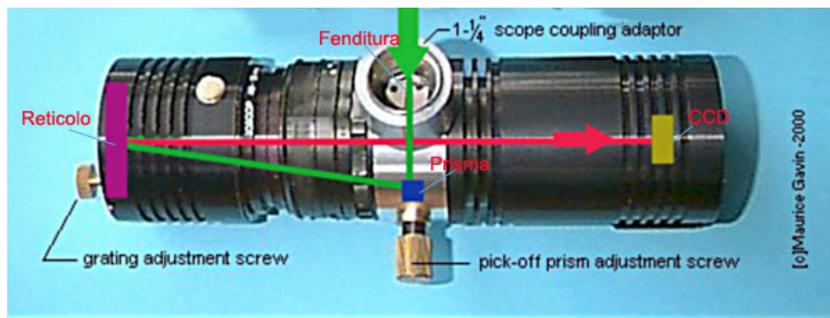
b) Littrow stellari e solari



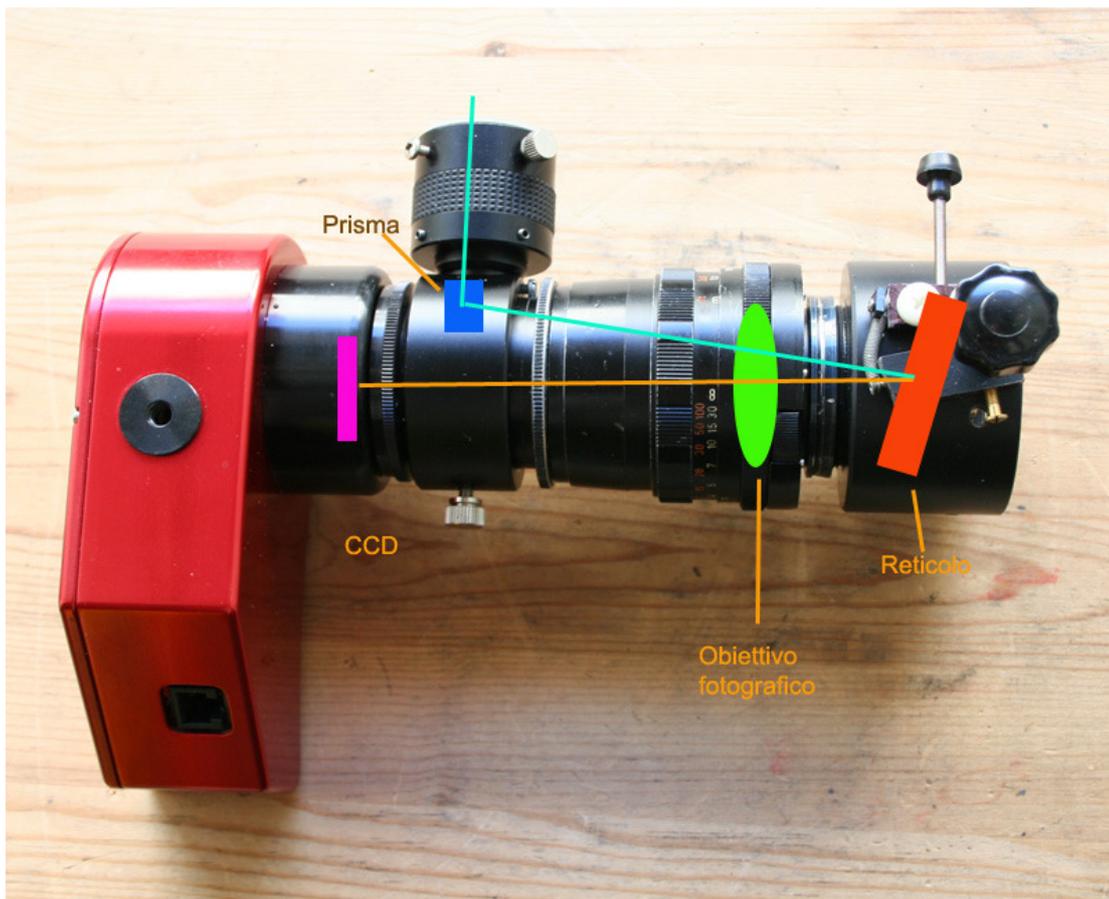
Questo è lo schema ottico del primo prototipo dello spettroscopio universale "LHires 3" di C. Buil, che successivamente ha trovato una collocazione commerciale. La costruzione amatoriale di uno strumento simile è alquanto complessa e richiede necessariamente un'officina meccanica di precisione. Il punto di forza del sistema è la fenditura con le lamine riflettenti, in modo che il fascio ottico in arrivo dal telescopio è in parte trasmesso passando attraverso le lame, in parte riflesso. La parte riflessa alimenta, tramite un doppietto acromatico da 50 mm di focale, la camera di guida, mentre quella trasmessa va ad alimentare, passando attraverso un doppietto acro da 200 mm di F, un reticolo da 2400 l/mm, e, subendo un doppio passaggio, una camera CCD posta al fuoco del doppietto stesso. Pur essendo uno spettroscopio "tuttofare", lo strumento comincia a presentare un ingombro notevole, ma le prestazioni sono elevate.

3) Littrow per solo uso stellare

Qui di seguito è mostrato un esempio di un semplice spettroscopio autocollimante per esclusivo uso stellare, realizzato dall'astrofilo inglese Maurice Gavin con un obiettivo fotografico da 50 mm ed una camera CCD Starlight Xpress. Il pezzo che funge da accoppiatore, simile ad una guida fuori asse, va necessariamente realizzato da un'officina meccanica, tenendo conto del tiraggio dell'obiettivo:

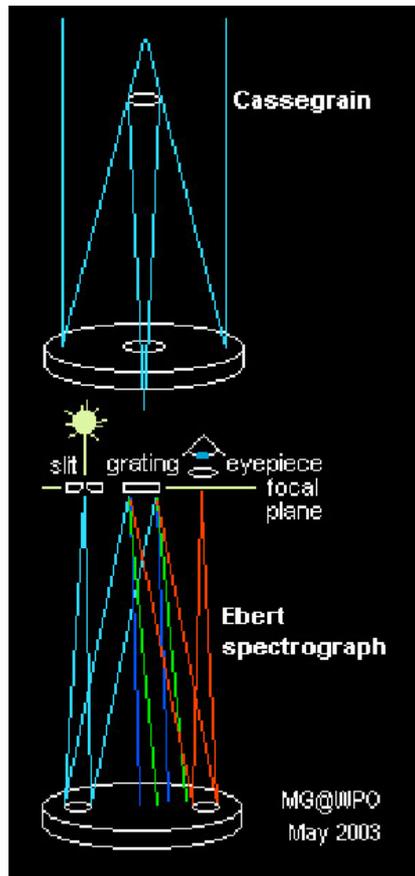


Uno schema simile al precedente, ma che utilizza come elemento di accoppiamento una normale guida fuori asse commerciale modificata, un obiettivo fotografico Pentacon da 100mm e non usa fenditura è il seguente, realizzato da chi scrive, ed attualmente sotto test:



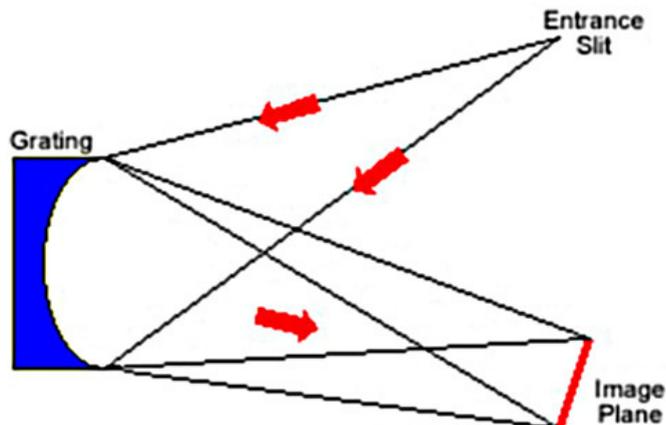
[Sistema autocollimante Ebert a specchio](#)

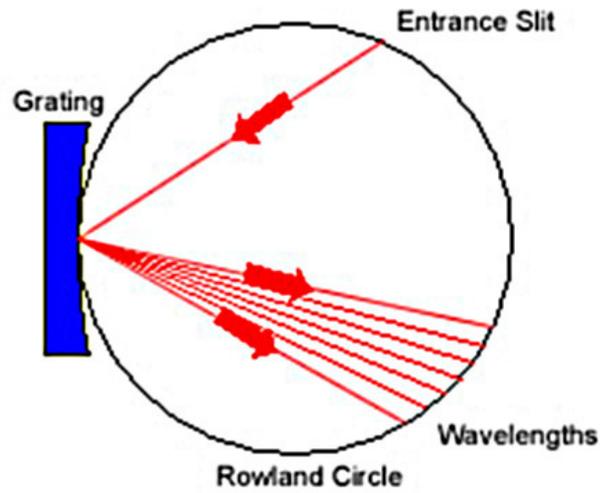
Una variante del tipo autocollimante è il sistema Ebert, che utilizza uno specchio: in pratica si ha una doppia riflessione su di uno specchio, dopo aver collocato il reticolo assialmente, al posto del secondario e la fenditura ed il portaoculare con l'oculare o la camera ai lati del reticolo stesso, in posizione opposta.



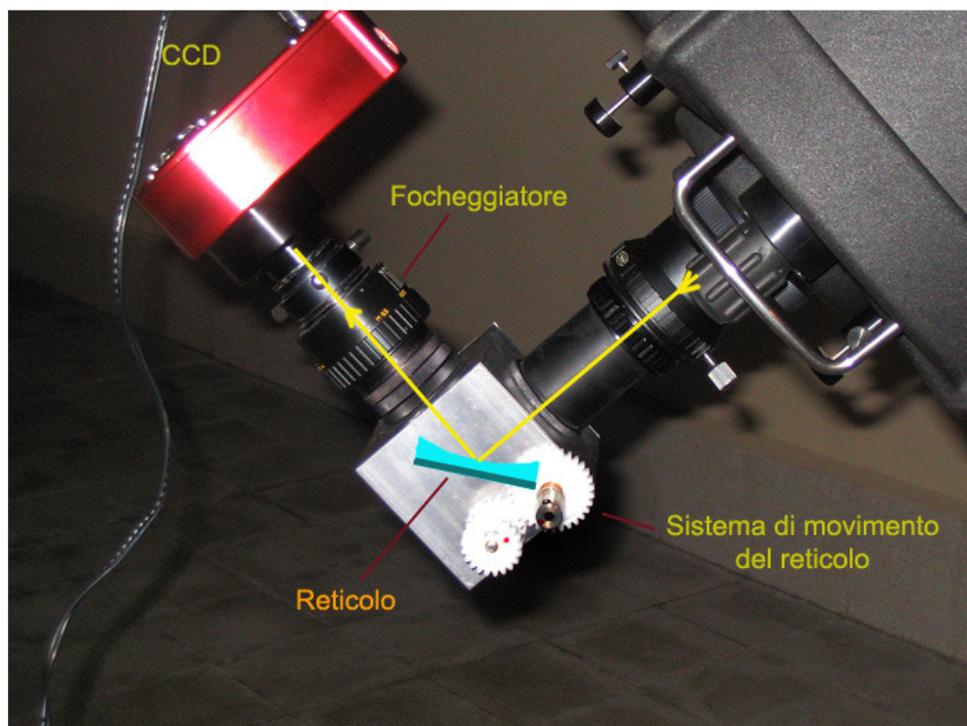
Sistema autocollimante a reticolo concavo

Una ulteriore variante del sistema autocollimante a specchi può essere considerata quella che utilizza un reticolo concavo. Questo schema costituisce veramente l'ideale per l'autocostruzione di uno spettroscopio stellare, in quanto non necessita di ottiche aggiuntive, e, data la ridotta lunghezza focale del reticolo, ha un ingombro ed un peso veramente modesti, inoltre, i reticoli concavi di Rowlands sono di forma toroidale e quindi mettono a fuoco con una linea, rendendo di fatto non necessaria anche la fenditura. Ma, di fronte a tali notevoli vantaggi, quali sono le controindicazioni? I punti negativi sono che i reticoli cd. "tipo Rowland", che sono poi quelli relativamente meno costosi e più facili da reperire hanno righe dritte ed equidistanti, e mettono a fuoco su un cerchio, detto appunto "cerchio di Rowlands", di diametro pari al raggio di curvatura del reticolo. Essi soffrono di astigmatismo, danno un'immagine spettrale non piana, e, mettendo a fuoco le varie lunghezze d'onda diffratte su un cerchio, richiedono distinte operazioni di foceggiatura per le diverse zone spettrali. Esistono comunque anche reticoli concavi corretti per l'astigmatismo, che hanno righe non equidistanti e che danno un'immagine spettrale piana, a fuoco su un punto, ma il loro costo è ancora più elevato. Il vero punto negativo di tali reticoli è quindi il prezzo, veramente eccessivo per usi amatoriali. Qui di seguito è mostrato lo schema di un reticolo di Rowland.

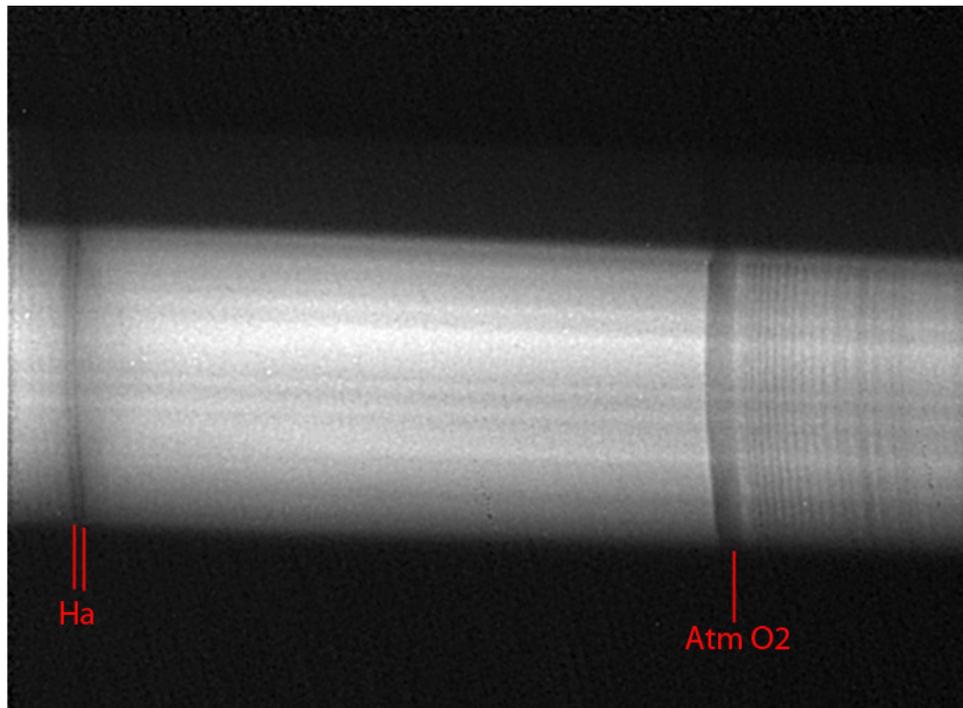




Nell'immagine seguente è visibile il mio spettroscopio a reticolo concavo "COGOS" (COncave Grating Opticless Spectroscope), delle dimensioni e peso di un diagonale da 50 mm, al fuoco di un telescopio da 14". Il reticolo toroidale 40 x 40 mm da 600 l/mm e 120 mm di focale fu ricavato da un monocromatore di surplus pagato l'equivalente di 40 Euro odierni; reticoli analoghi nuovi costano da 700 a 1000 euro.



Un esempio dello spettro ottenibile con reticoli del genere; nel caso specifico la riga Ha di B Aurigae. Le aberrazioni sono notevoli, e si nota curvatura dell'immagine spettrale, astigmatismo e forse sferica, ma lo spettro è comunque discretamente leggibile.

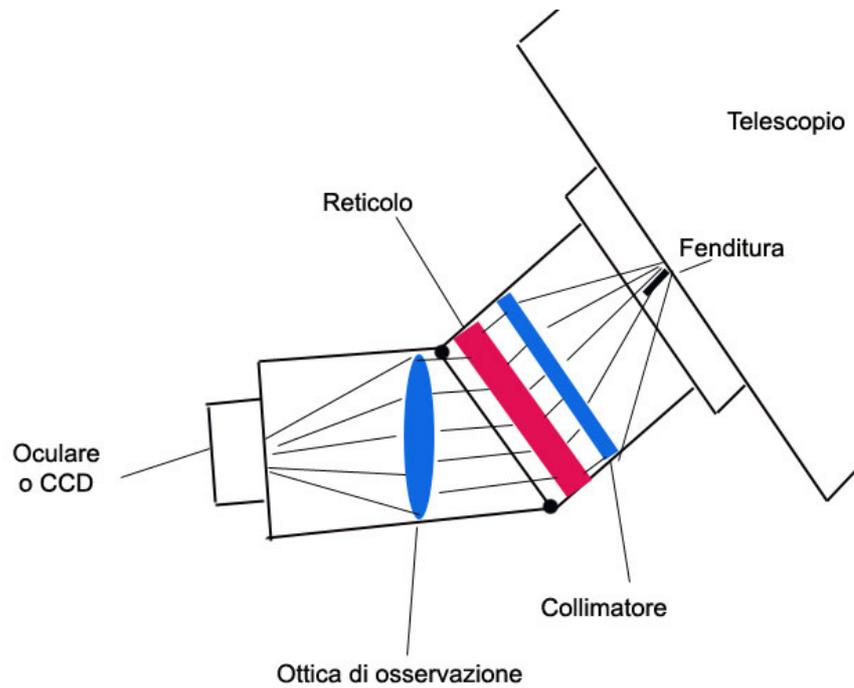


[Spettroscopi con reticolo a trasmissione](#)

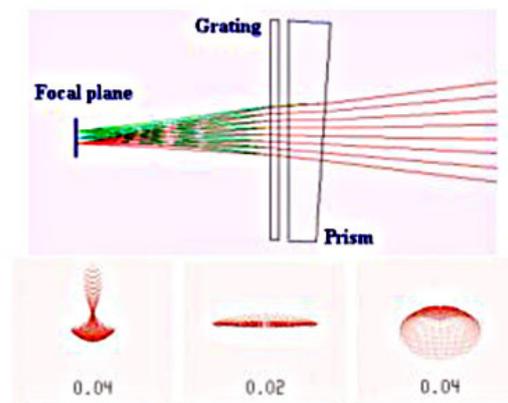
Come si è detto poc'anzi, i reticoli a trasmissione per uso spettroscopico necessitano di un basso numero di righe per mm per essere efficienti nella zona della radiazione visibile, mentre quelli ad alto numero di righe presentano un picco nella zona dell'UV. Sono quindi adatti per tale uso, ovviamente in campo amatoriale, i reticoli da 300 ml/mm in giù. Tali reticoli presentano, come è ovvio, una bassa risoluzione, ma hanno anche alcuni lati, a mio avviso positivi. Premesso che la costruzione di uno spettroscopio vero e proprio con tali reticoli è meccanicamente complesso in quanto, specie con i reticoli a numero di righe più elevato occorre prevedere un sistema di basculamento del sistema ottico di osservazione-portaoculare rispetto a quello ottico di collimazione-reticolo, per permettere l'osservazione ai diversi angoli delle diverse lunghezze d'onda, come nella figura sottostante, e dal punto di vista dell'efficienza risulterebbe inferiore a quello con reticoli a riflessione, l'uso dei reticoli "stand alone", da soli, ovvero accoppiati a prismi o a lenti cilindriche, è il migliore possibile in campo amatoriale.

Infatti i reticoli a basso numero di linee per mm (100/200) da applicare ad una camera CCD permettono:

- 1)- di riprendere nello stesso campo, anche a focali elevate, l'immagine di ordine 0 di una stella ed il suo spettro di ordine 1, con la possibilità, specie con le camere a doppio sensore, di inseguire direttamente sulla stella.
- 2) - di raggiungere magnitudini più elevate rispetto ad uno spettroscopio vero e proprio, a parità di setup e condizioni.
- 3) - costituiscono un valido aiuto per l'individuazione della classe spettrale di una stella e delle sue caratteristiche principali, che potranno poi essere eventualmente approfondite con uno strumento a risoluzione più elevata.

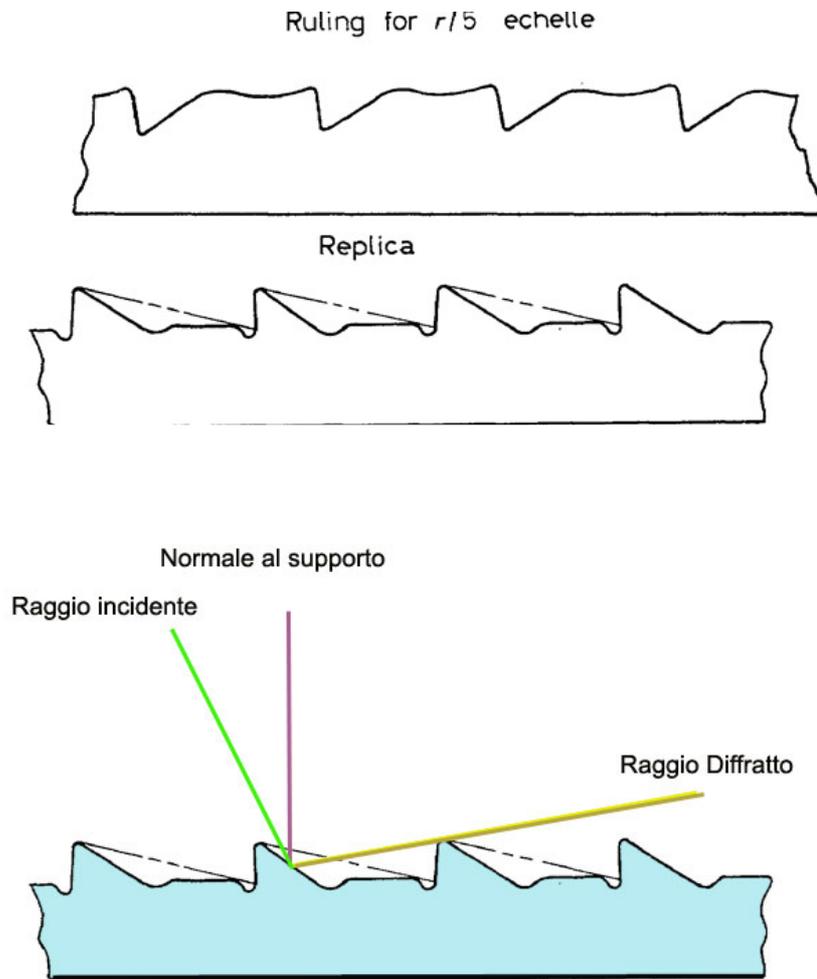


Una combinazione dei reticoli a trasmissione con prismi a modesto angolo (cd. "grism") permette di limitare le aberrazioni indotte da tale sistema.

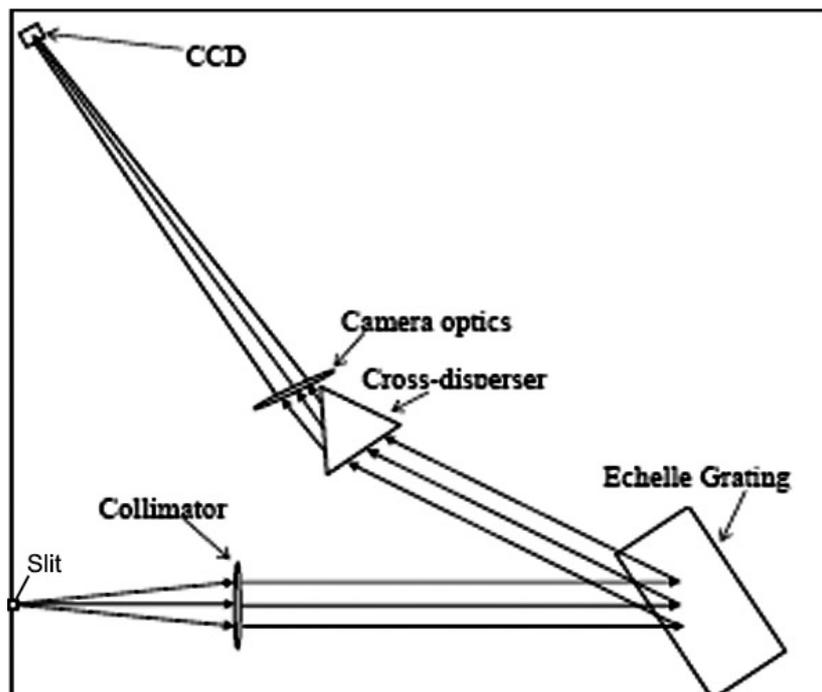


[L'ultima frontiera della spettroscopia: gli spettroscopi con "Echelle Grating"](#)

Come so è visto in precedenza, la risoluzione spettrale dipende sia dal numero di linee per mm di un reticolo, sia dall'ordine spettrale osservato: più elevato è l'ordine, più aumenta la risoluzione, a parità di l/mm . Una alternativa possibile all'aumento del numero di righe per mm, per il quale, peraltro non si può superare un certo numero imposto dalle condizioni fisiche e dagli strumenti di incisione (2400-3200 per i reticoli olografici), è quindi quella di creare reticoli che rendano possibile l'osservazione e la ripresa di ordini con numero più elevato possibile. In un reticolo a riflessione normale, gli ordini di numero più elevato vengono a trovarsi ad angoli così elevati rispetto alla direzione normale allo stesso che subiscono un oscuramento pressoché totale. Nei reticoli echelle la spaziatura tra le righe e la forma del blaze, con un angolo a 90° , simile appunto ai gradini di una scala, permette di osservare ordini dalle decine a centinaia. Qui sotto è mostrata una caratteristica del procedimento di ruling delle righe ad echelle, con l'incremento della spaziatura tra le righe stesse e con un angolo di blaze di 90° . All'aumento della spaziatura consegue un ridotto numero per mm dei reticoli, ma anche la possibilità di investigare angoli elevati ed alti ordini, come si vede dall'alto angolo di diffrazione possibile.



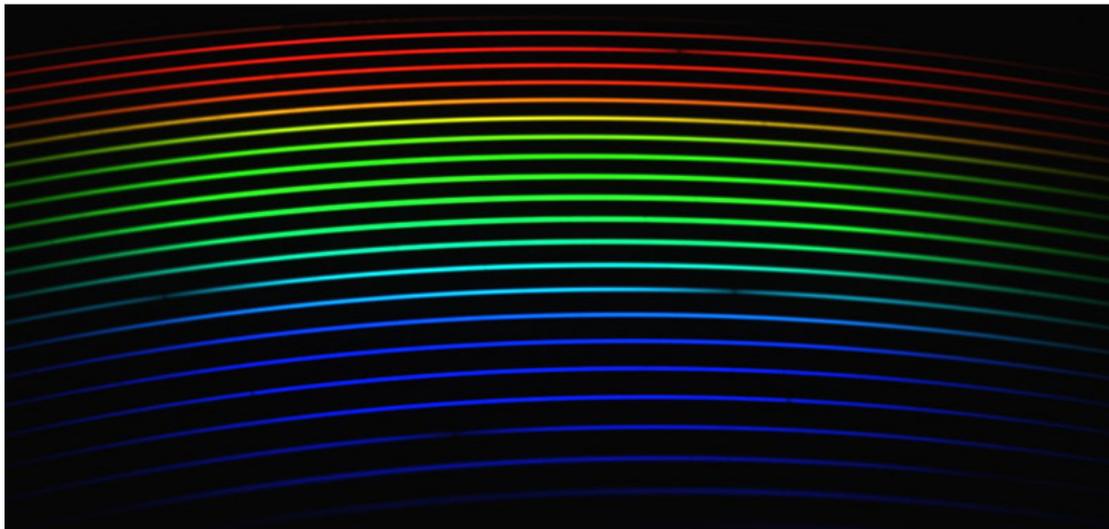
Il range spettrale libero, come si può facilmente immaginare, risulta minimo ad ordini elevati, che pertanto si sovrappongono l'uno all'altro, in modo che l'immagine finale fornita dal reticolo consiste di numerosi spettri sovrapposti l'uno all'altro. Per rendere utilizzabile l'immagine spettrale occorre quindi un elemento separatore, prisma o reticolo, posto perpendicolarmente all'echelle, chiamato "cross disperser" che dovrebbe avere una dispersione inferiore all'echelle. L'immagine finale si presenta quindi come una sequenza di brevi spettri separati posti nella direzione di dispersione del cross disperser. Lo schema di un tale spettroscopio è il seguente:



Nell'immagine seguente è mostrato un prototipo di spettroscopio a echelle realizzato da Cristian Buil, notare come l'immagine spettrale sia ripresa da una fotocamera digitale. la fenditura è alimentata da una fibra ottica.



Echellogramma della stella Vega realizzato da C:Buil col predetto setup e con un obiettivo Canon 85 mmf 1,8. In questa figura è evidente il vantaggio degli spettroscopi a echelle: quello di poter coniugare l'alta risoluzione e dispersione dello spettro con una immagine spettrale che entra in un singolo fotogramma, dal blu al rosso. (fonte: C. Buil)



Prototipo di spettroscopio a echelle realizzato da Fulvio Mete, tuttora in via di sperimentazione, con un reticolo echelle da 25 mm e 79 l/mm. Il prisma equilatero funge da cross disperser. Il montaggio e la collimazione degli elementi appare piuttosto complessa.

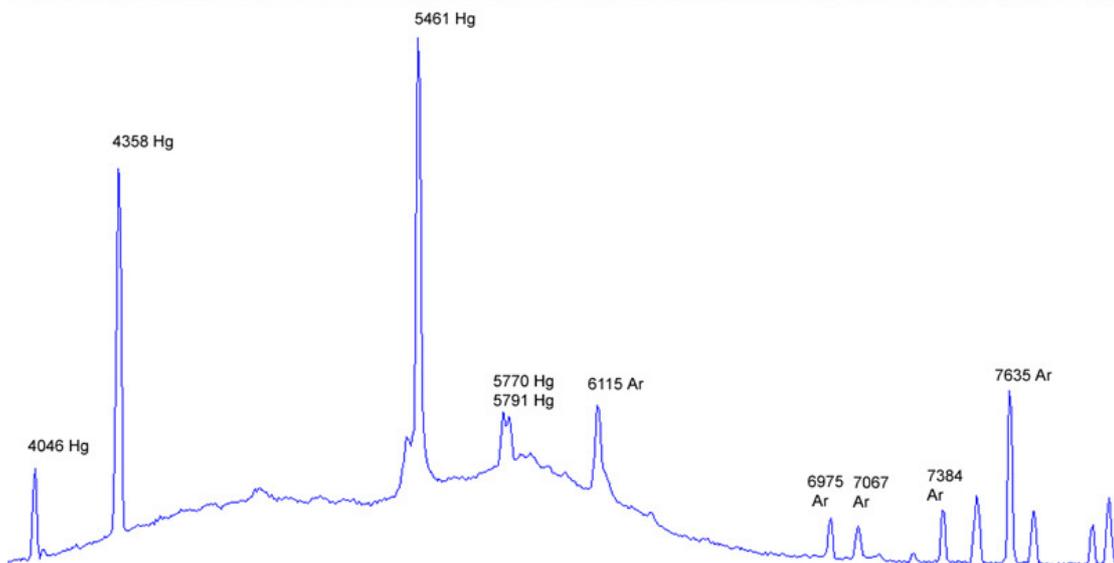
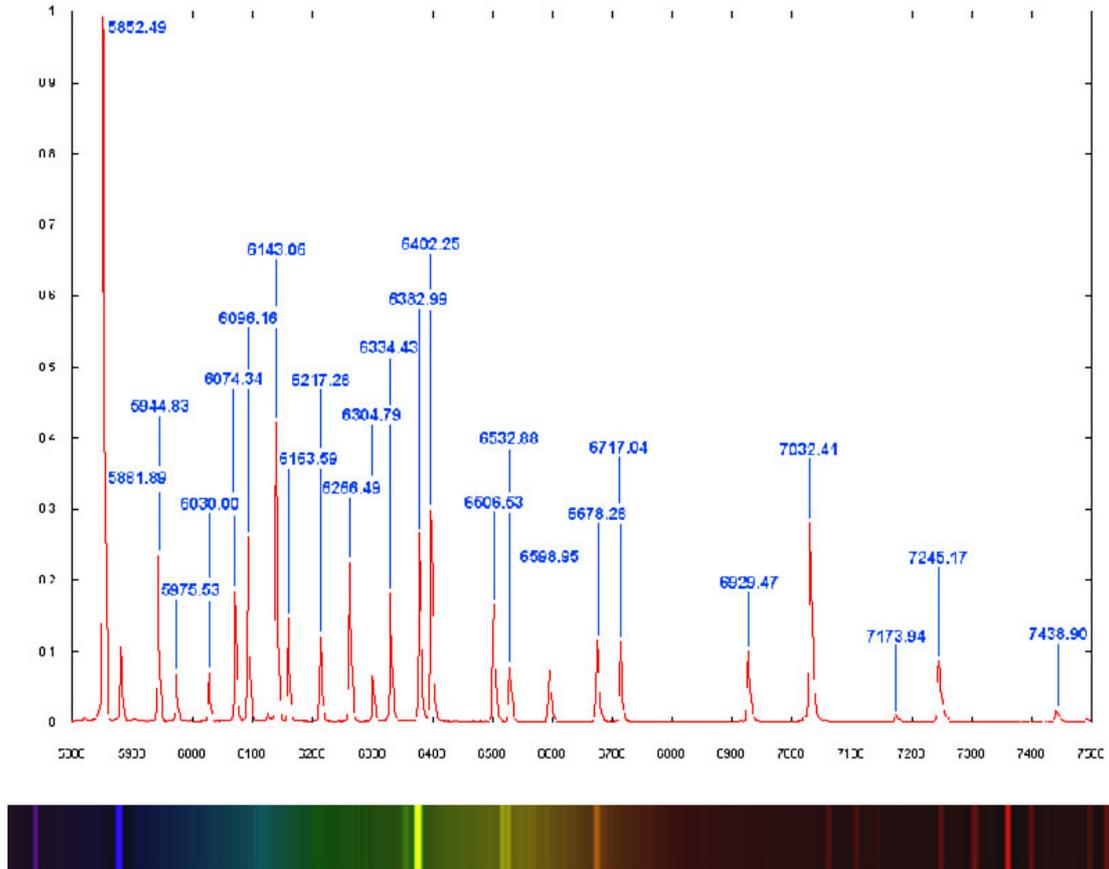


In molti degli schemi precedenti non si è accennato alle lampade di calibrazione, normalmente presenti in gran parte degli strumenti professionali per agevolare la calibrazione degli spettri ottenuti. Premesso che le lampade professionali hanno un costo elevato, la soluzione più utile è quella di utilizzare approcci più immediati e di facile reperibilità, come le lampade in uso dnella vita di tutti i giorni, quelle al neon, al mercurio ed al sodio a alta pressione. Sul sito di C Buil , al link: <http://astrosurf.com/buil/us/spe2/hresol4.htm> è presente una vasta casistica di spettri di lampade simili, nonché di lampade decorative commerciali a basso prezzo che presentano righe di emissione utili per la calibrazione degli spettri. Si riporta qui di seguito, a puro titolo informativo, un elenco delle principali righe presenti nelle lampade al neon ed uno spettro di emissione di una lampada al neon domestica (fonte: sito web di Cristian Buil).

3417.9035	Nel	5944.8342	Nel	8300.3263	Nel
3472.5711	Nel	5975.534	Nel	8377.6065	Nel
3515.1900	Nel	6029.9971	Nel	8495.3598	Nel
3593.5263	Nel	6074.3377	Nel	8591.2583	Nel
3600.1691	Nel	6096.1631	Nel	8634.647	Nel
4488.0926	Nel	6128.4499	Nel	8654.3831	Nel
4636.125	Nel	6143.0626	Nel	8655.522	Nel
4837.3139	Nel	6163.5939	Nel	8679.493	Nel
5005.1587	Nel	6217.2812	Nel	8681.921	Nel
5031.3504	Nel	6266.495	Nel	8704.111	Nel
5104.7011	Nel	6304.789	Nel	8771.656	Nel
5113.6724	Nel	6334.4278	Nel	8780.621	Nel
5144.9384	Nel	6382.9917	Nel	8783.75	Nel
5188.6122	Nel	6402.246	Nel	8830.907	Nel
5330.7775	Nel	6506.5281	Nel	8853.867	Nel
5341.0938	Nel	6532.8822	Nel	8919.5007	Nel
		6598.9529	Nel		

5360.0121	Nel	6678.2764	Nel	9148.672	Nel
5400.5617	Nel	6717.043	Nel	9201.759	Nel
5562.7662	Nel	6929.4673	Nel	9300.853	Nel
5656.5664	Nel	7024.0504	Nel	9326.507	Nel
5689.8163	Nel	7032.4131	Nel	9425.379	Nel
5719.2248	Nel	7173.9381	Nel	9486.68	Nel
5748.2985	Nel	7245.1666	Nel	9534.163	Nel
5764.4188	Nel	7438.899	Nel	9665.424	Nel
5804.4496	Nel	7488.8712	Nel	10798.12	Nel
5820.1558	Nel	7535.7739	Nel	10844.54	Nel
5852.4878	Nel	8136.4057	Nel	11143.02	Nel
5881.895	Nel				

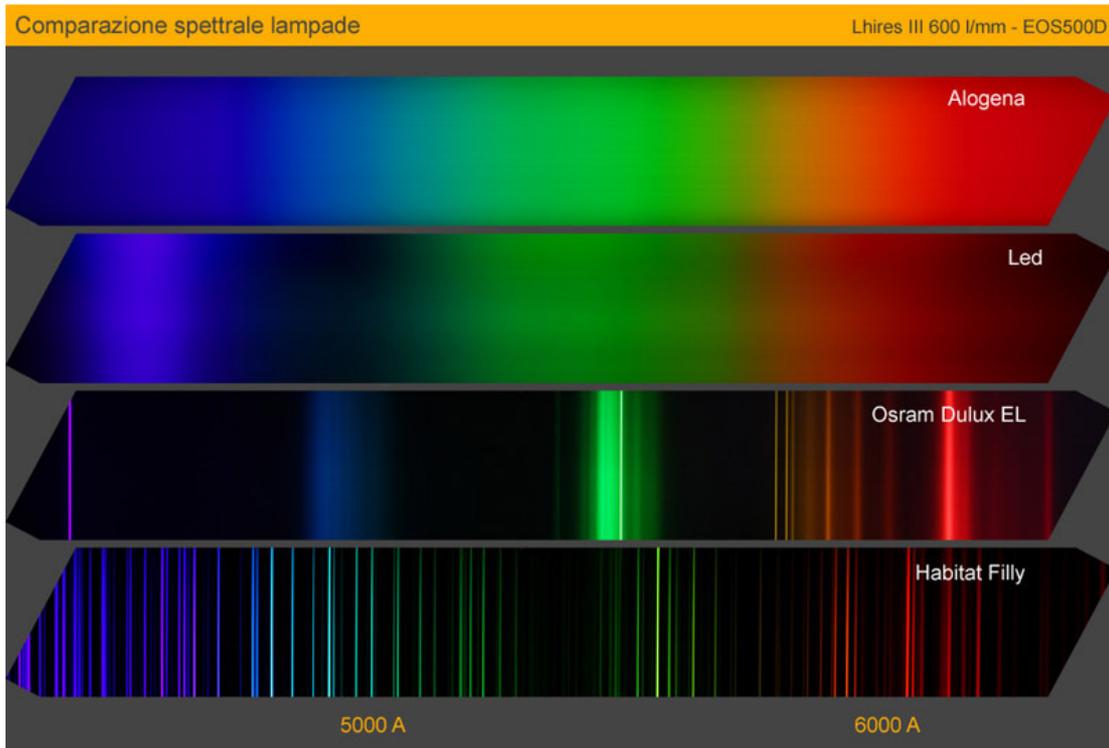
Neon Spectral Line List



lo spettro sovrastante è invece quello di una lampada a fluorescenza a basso consumo che, anche se con righe non

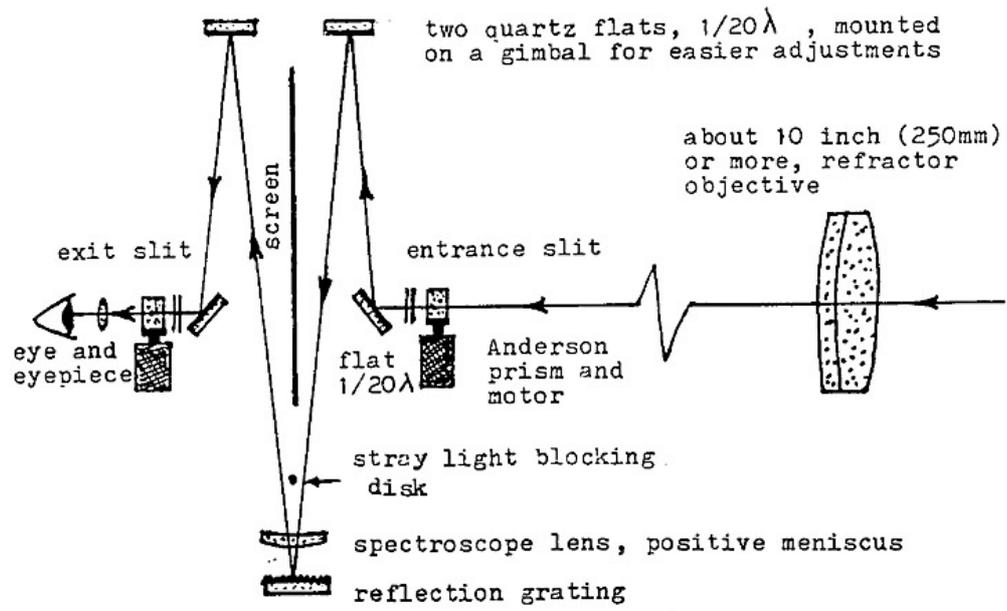
così nette come quelle professionali, va bene lo stesso per usi amatoriali. (Fonte Osservatorio Astronomico del Monte Baldo)

Si riporta, infine, qui di seguito, un confronto, operato da Paolo Berardi, tra gli spettri di alcune lampade di uso comune tra le quali la lampada decorativa "Habitat Filly", che mostra una quantità notevolissima di righe sottili in tutto lo spettro e quindi si propone come una valida ed economicissima alternativa alle costose lampade di calibrazione all'Argon professionali.

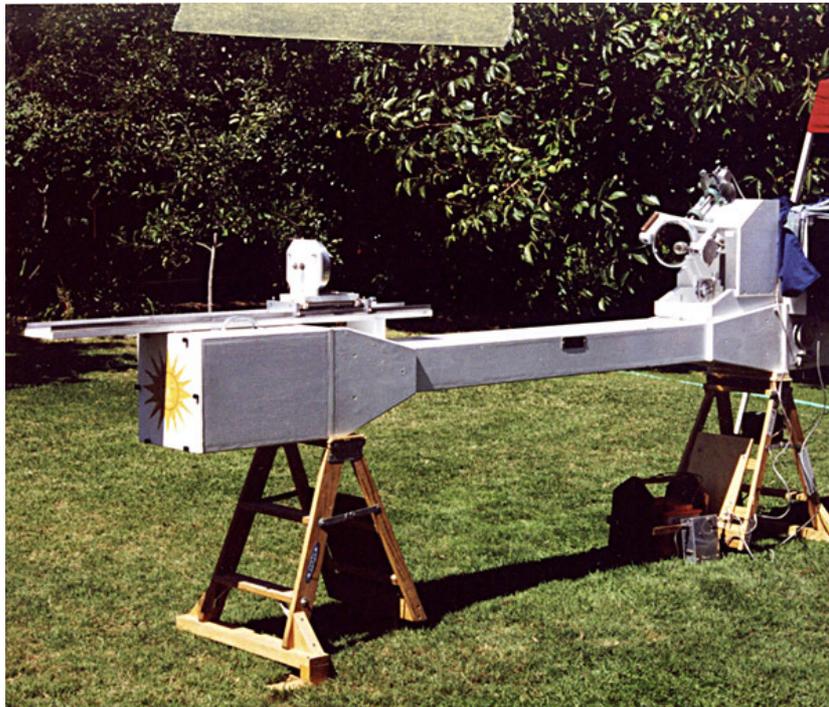


[Gli Spettroelioscopi](#)

Non potevo concludere questa breve carrellata sugli spettroscopi senza accennare ad una particolare categoria di spettroscopio, lo spettroelioscopio, inventato da G.E. Hale nel 1924, per l'osservazione del sole in varie lunghezze d'onda. 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 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. Qui di seguito è riportato uno schema di spettroelioscopio del noto autocostruttore Frederick Veio. 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.

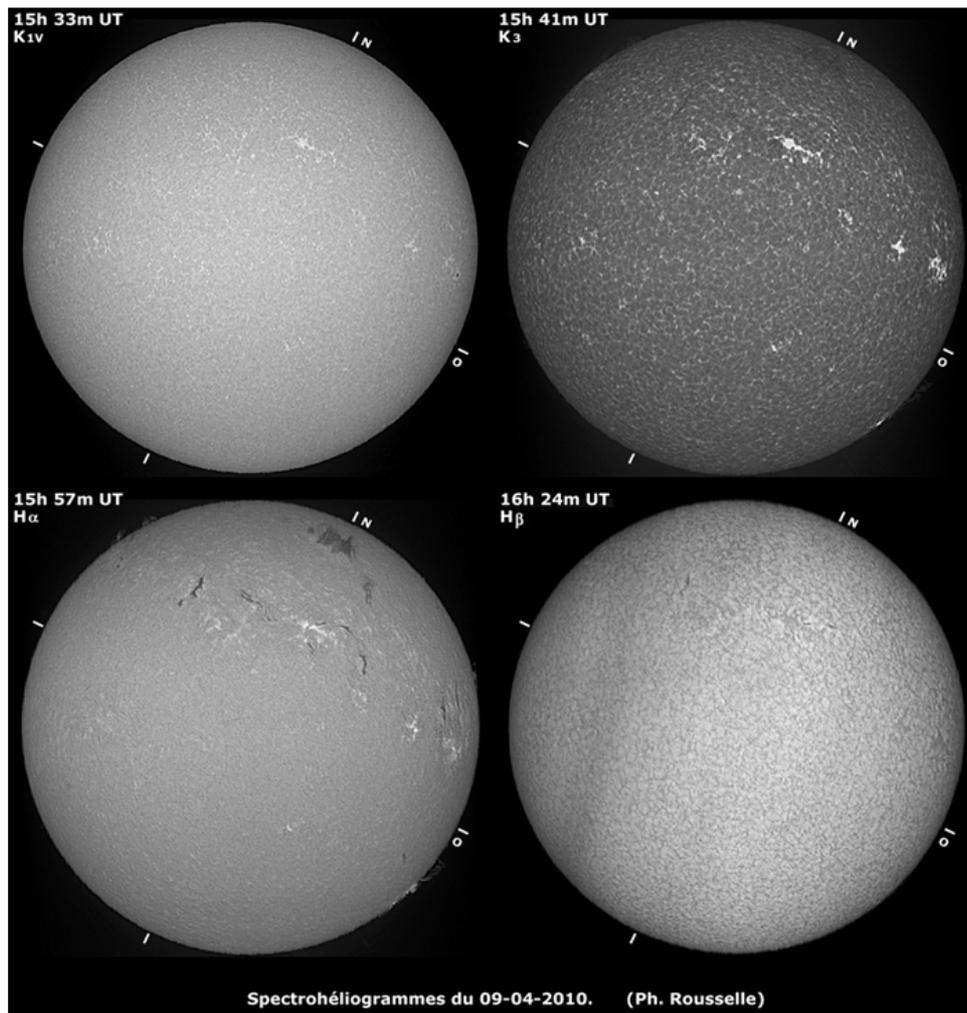


Prismi di Anderson



Spettroelioscopio autocostruito da F. Veio. Notare le cospicue dimensioni dello strumento, che è alimentato da un celostata. (Fonte: F: Veio)

Per terminare questa breve carrellata sugli spettroelioscopi classici è opportuno mostrare le splendide immagini solari recentemente ottenute dall'astrofilo francese Phil Roussele con un spettroelioscopio autocostruito sia nell'ottica che nell'elettronica:



E' bene dire che l'autocostruzione di strumenti del genere, piuttosto sofisticati, non è alla portata di tutti, tant'è che si contano sulle dita di una mano, o quasi, a livello planetario, gli autocostruttori che si sono cimentati con successo nella costruzione di tali strumenti. Il dilagare, poi, negli ultimi tempi di eccellenti filtri a banda stretta centrati sulle righe H alfa e Ca K, alcuni dei quali anche a costo molto contenuto, ha tolto smalto e motivazione alla costruzione di questo complesso strumento. C'è stato, tuttavia, negli ultimi anni, con la diffusione di programmi informatici per astronomia, alcuni dei quali freeware come il celebre IRIS di C. Buil e delle camere di ripresa CCD, la possibilità di effettuare via software il compito oneroso e meccanicamente complesso svolto dai sintetizzatori: l'allineamento di singole colonne di 1 pixel centrate su una riga spettrale di interesse sino a formare un'immagine del disco solare nell'elemento corrispondente alla riga stessa. La procedura è quanto mai semplice, e presuppone soltanto il possesso di uno spettroscopio di risoluzione adeguata ed un cannocchiale (od uno specchio) che invia un'immagine del disco solare sulla fenditura d'ingresso dello strumento, il tutto su una montatura equatoriale non necessariamente motorizzata, e l'utilizzo di una semplice telecamera di ripresa. Si porta quindi detta immagine sul bordo superiore della fenditura, si ferma il moto orario, se c'è, e si lascia scorrere il disco sulla fenditura stessa azionando nel contempo la telecamera ottenendo così un filmato AVI con una scansione del sole nella riga d'interesse. Poi il software IRIS, (ma ne esistono anche altri) con una apposita routine trasformerà il filmato in un certo numero di frames formato Fits, in ciascuno dei quali è presente la riga spettrale. Un'altro comando permetterà poi di allineare, per tutti i frames, la colonna di 1 pixel al centro della riga, ottenendo un'immagine (fits, bmp o altro) del disco solare di formato pari a quello di ripresa della camera sull'asse Y, e, sull'asse X, al numero di frames ottenuti dalla scansione (mediamente 1700-1800 alla velocità di 10 fps). Nell'ipotesi, quindi, di una camera che riprenda filmati al formato 640 x 480, si otterrà un'immagine 1800 x 480 che andrà opportunamente riscalata ed elaborata per essere utilizzata. E' bene precisare, che, ameno di non utilizzare telescopi di focale molto corta o teleobiettivi per inviare l'immagine solare sulla fenditura, l'immagine del sole ottenuta sarà parziale, e saranno necessarie due o tre scansioni almeno per realizzare una composizione di tutto il disco. L'utilizzo di focali molto corte, come quelle di teleobiettivi (100 -200 mm) del resto, pur facendo ottenere un'immagine completa del disco solare, provoca un drastico calo di risoluzione, anche spingendo la chiusura della fenditura al limite consentito, e l'immagine risulta impastata e priva di dettaglio.

Tale sistema permette di ottenere immagini solari con strumenti di moderata lunghezza focale e dimensioni contenute, come l'LHires III di C. Buil e strumenti di chi scrive, come VHIRSS e POSS.

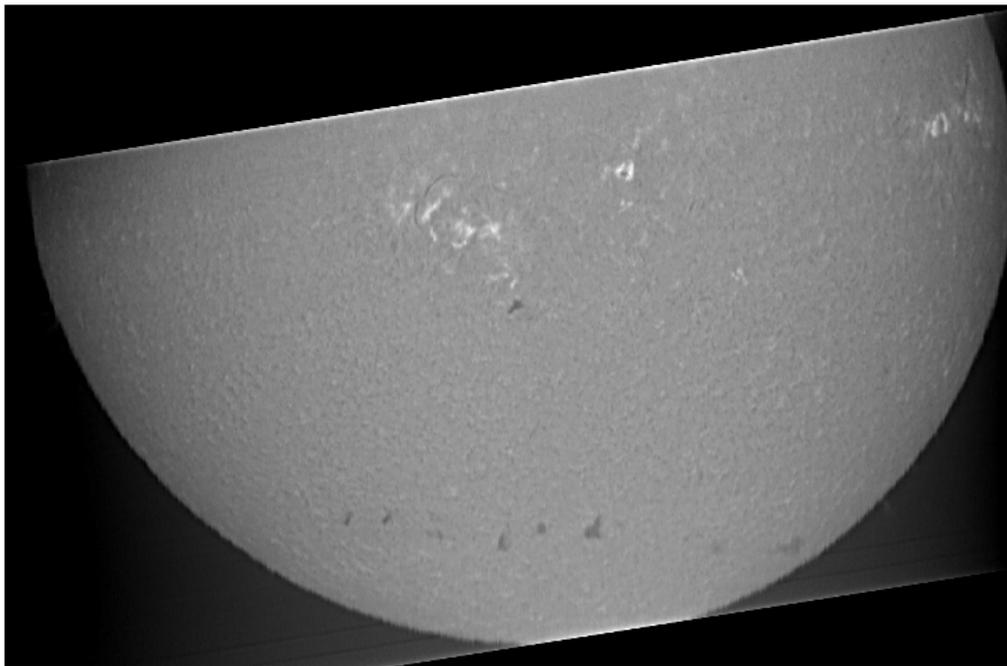


Immagine solare in luce H alfa di C. Buil con l'LHiresIII

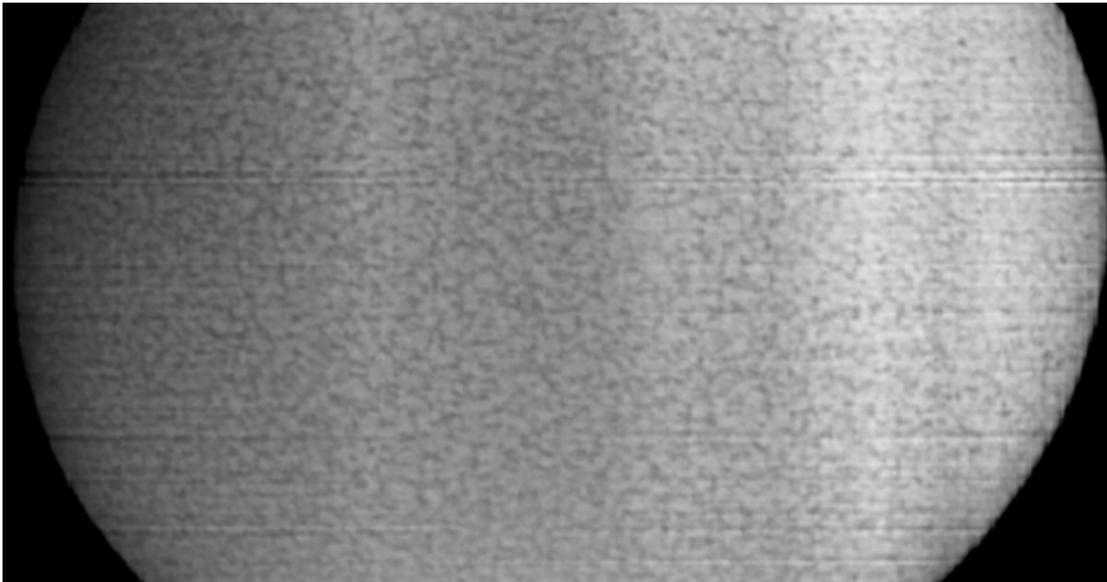


Immagine solare in luce H Beta di Fulvio Mete con VHIRSS



Un esempio di utilizzo di uno spettroscopio in modalità spettroelioscopio qui descritta è quello dello strumento POSS (POrtable Solar Spectrohelioscope).

Ci si potrebbe chiedere dell'utilità di un simile strumento solare in un periodo in cui sono offerti sul mercato a prezzi molto competitivi filtri e telescopi solari in luce Ha e Cak che forniscono ottime immagini.

La risposta è immediata: i filtri, peraltro comunque costosi, forniscono immagini del sole nell'elemento corrispondente ad una sola riga: *gli spettroelioscopi in qualsiasi riga*. In pratica è come se si possedessero decine, forse centinaia, di filtri interferenziali a banda stretta, cioè senza contare il livello di risoluzione ottenibile, che, nel caso di strumenti a lunga focale e reticoli ad elevato numero di linee/mm, è molto elevato.

Spettroscopi astronomici commerciali

Si è discusso poc'anzi dei vari tipi di spettroscopi e delle possibilità offerte all'amatore che intende autocostruirsi uno strumento, ma molti di noi non hanno la capacità, la volontà, il tempo libero sufficienti per un lavoro, che, seppur in alcuni casi concettualmente semplice è comunque impegnativo e richiede almeno una certa abilità manuale e la disponibilità e l'uso di un certo numero di attrezzi. L'unica strada percorribile in tal caso è l'acquisto di prodotti già presenti sul mercato, che, è meglio precisare, non abbondano, e comunque in alcuni casi presuppongono una certa conoscenza della spettroscopia per essere utilizzati al meglio.

Cercherò quindi di illustrare in modo sintetico le possibilità offerte da tali prodotti, non senza far presente di non averne mai posseduti alcuno, e quindi di parlare sulla scorta non di impressioni derivanti dalla pratica, ma dalle notizie, in alcuni casi sintetiche, rinvenibili nei manuali e nel materiale pubblicitario. L'unico prodotto commerciale da me posseduto, anche se non si tratta di uno spettroscopio vero e proprio, è dato dal reticolo a trasmissione "Star Analyser", che tuttora uso con buoni risultati e soddisfazione. In questa breve carrellata cercherò quindi di passare dagli strumenti più semplici a quelli più complessi e, ovviamente più costosi.

Comincerò quindi proprio dai *reticoli a trasmissione* attualmente sul mercato, e nei due principali prodotti di tale tipo, Lo "Star Analyser" e il "Rainbow Optics"

1) [Lo "Star Analyser 100"](#)

Lo "Star Analyser 100" è un reticolo a trasmissione da 100 l/mm "blazed" nell'ordine 1, il che vuol dire che convoglia gran parte dell'energia luminosa nel predetto ordine. La casa produttrice è la Paton Hawksley inglese, ed il reticolo, di circa 26 mm di diametro, è montato in una cella filettata maschio analoga a quella dei normali filtri per astronomia, in modo da poter essere inserito nelle filettature femmine degli oculari da 31,8 mm e degli adattatori delle camere CCD e delle webcam. Esso in pratica, si comporta come un filtro, fornendo in uscita l'immagine di ordine zero delle stelle presenti nel campo inquadrato e, ai due lati, le immagini degli spettri dei vari ordini, positivi e negativi, con l'ordine +1, che, come si è detto, risulta il più brillante.



La dispersione spettrale varia a seconda la distanza tra il reticolo ed il sensore CCD, nel caso di riprese CCD, e può essere calcolata con la seguente formula (fonte: manuale di Istruzioni dello S.A 100):

Dispersione (A/pixel) = 10000 * dimensioni pixel (um) / [n° linee-mm * distanza (mm) tra reticolo e CCD]

quindi, nel caso di una webcam da pixel da 5,6 micron ed uno S.A. posto a 35 mm di distanza dal ccd è:

$$10000 * 5.6 / [100 * 35] = 16 \text{ A/pixel}$$

Come si vede, si tratta di risoluzioni piuttosto basse, che potrebbero indurre a snobbare tale modesto strumento, ritenendolo non idoneo ad un uso serio, ma sarebbe un errore. Ciò per i motivi dianzi accennati, che qui riassumo:

- 1)- possibilità di riprendere nello stesso campo, anche a focali elevate, l'immagine di ordine 0 di una stella ed il suo spettro di ordine 1, inseguendo direttamente sulla stella, specie con le camere a doppio sensore.
- 2) - capacità di raggiungere magnitudini più elevate rispetto ad uno spettroscopio vero e proprio, a parità di setup e condizioni. Io stesso sono riuscito ad acquisire spettri di stelle molto deboli, in condizioni non ottimali e cieli ad elevato inquinamento luminoso quali quelli di Roma città, sino alla 13^a mag circa, seppure con strumenti della classe del C14. In ogni caso la registrazione di stelle deboli è funzione dell'apertura del telescopio e della sensibilità della camera, a parità di altre condizioni.
- 3) - costituiscono un valido aiuto per l'individuazione della classe spettrale di una stella e delle sue caratteristiche principali, che potranno poi essere eventualmente approfondite con uno strumento a risoluzione più elevata.

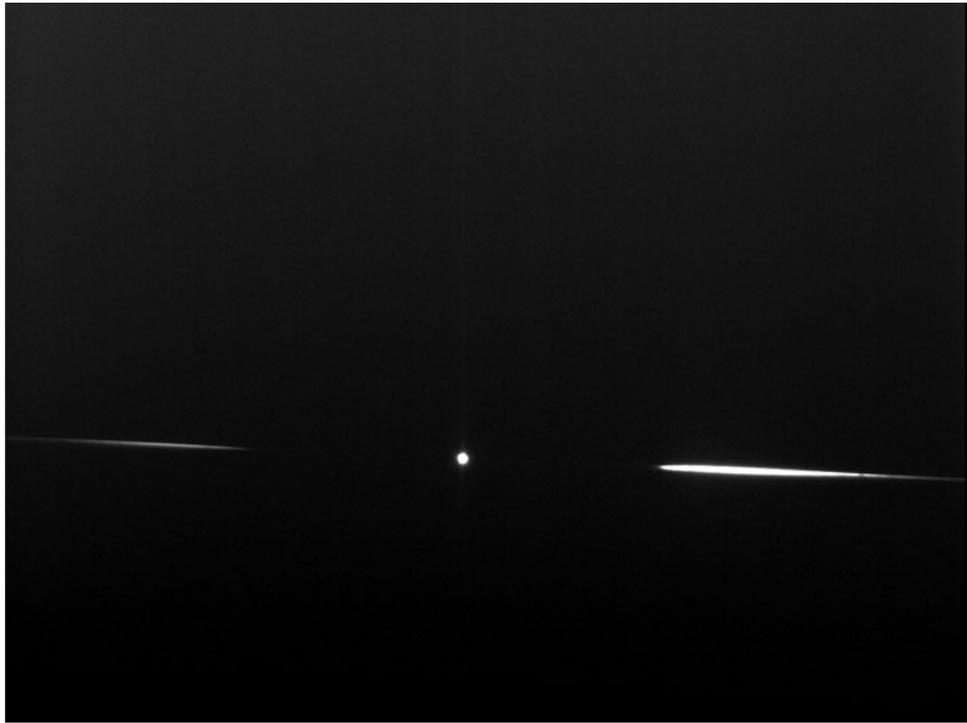


Immagine della stella Vega come si presenta al fuoco di un Celestron 14 a f 11, con la stella al centro e gli spettri dell'ordine 1 e -1 a destra e sinistra. La camera usata è stata una Atik 16 HR in binning 1 x1.

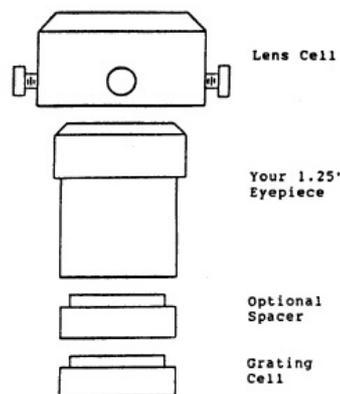


Lo spettro predetto elaborato con l'operazione di binning e correttamente orientato per la calibrazione

Il prezzo attuale dello SA dal listino del produttore è di 84 £.

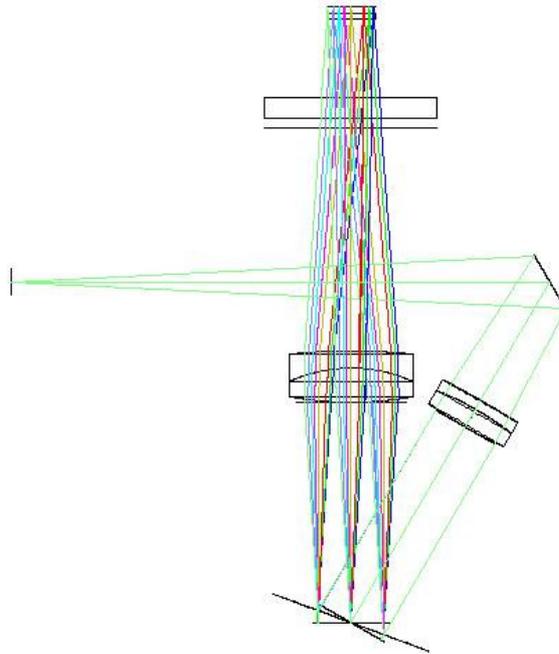
[Lo spettroscopio "Rainbow Optics"](#)

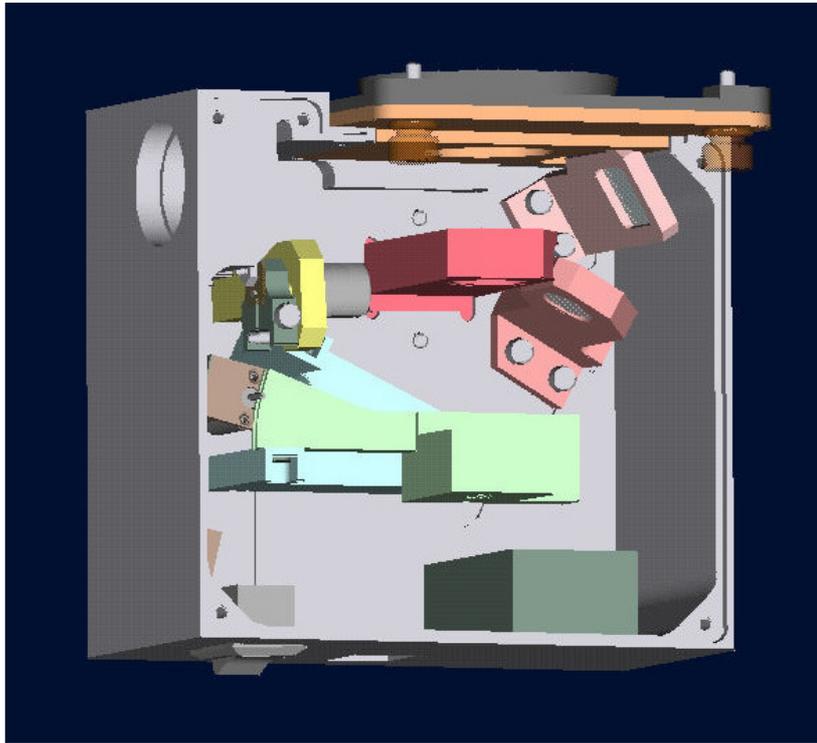
Nonostante che la pubblicità lo chiami spettroscopio stellare, il Rainbow optics è poco di più dello Star Analyser quanto a sofisticazione. La sostanziale differenza è che si tratta di un reticolo, anch'esso blazed per l'ordine 1, da 200 l/mm anzichè 100. Si tratta di un dispositivo più che altro pensato per l'osservazione visuale, anche se si può benissimo usare per riprese CCD. Un'altra differenza con lo S.A. è data da un "cappello" con una lente cilindrica che andrebbe posto sulla sommità dell'oculare allo scopo di allargare lo spettro osservato, mentre il reticolo vero e proprio andrebbe avvitato sotto l'oculare come lo "Star Analyser" usufruendo eventualmente di alcuni spaziatori per aumentare la risoluzione. Il prezzo attuale dal listino del produttore è di 249 \$.



[Lo spettroscopio SBIG DSS](#)

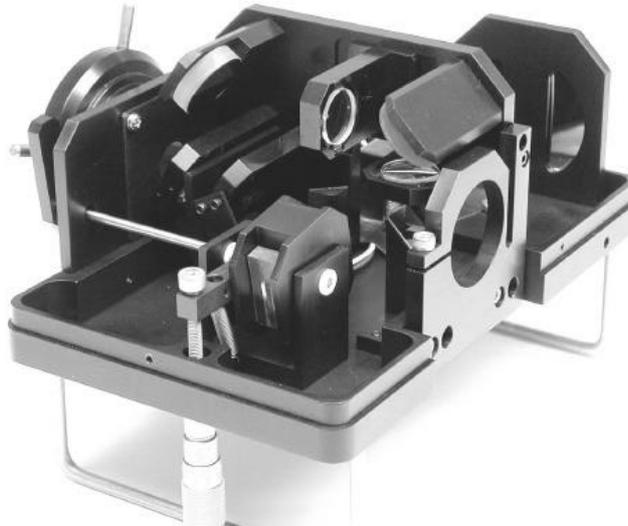
Come si evince dagli schemi del manuale d'istruzioni, il DSS (Deep Space Spectroscop) della Sbig ha uno schema classico, nel quale un collimatore focalizzato per tramite di uno specchio a 45° sulla fenditura invia un fascio parallelo al reticolo e da questo il fascio diffratto con lo spettro è poi inviato alla camera. Lo strumento offre fenditure di 4 misure, 50, 100, 200 e 400 μ . Nel DSS sia il movimento del reticolo che il cambio delle fenditure è motorizzato. Il sistema di messa a fuoco del collimatore sulla fenditura è tuttavia abbastanza grezzo, in quanto effettuabile con lo spostamento manuale della piastrina che sostiene il collimatore stesso. A detta di alcuni utilizzatori, conviene, per una buona messa a fuoco dello strumento sulle stelle, puntare lo strumento sul cielo diurno (ovviamente non sul sole direttamente) e mettere a fuoco sulle righe dello spettro solare. Tale pratica, peraltro, è piuttosto comoda ed è da me spesso effettuata con diversi spettroscopi stellari. Nel manuale della Sbig sullo strumento è riportata una dispersione spettrale di 5,4 $\text{\AA}/\text{pixel}$ con i pixel da 9 micron della ST 7 e la risoluzione è di 16 \AA . Non è data notizia sul n. di linee/mm del reticolo ma solo che questo è blazed per 500 nm. Il prezzo di listino attuale dello strumento è di 1595 \$.





[Lo spettroscopio SBIG SGS](#)

Come il suo fratello minore DSS, l'SGS è stato progettato per l'uso con le camere SBIG della serie ST a doppio sensore. L'oggetto da analizzare appare infatti contemporaneamente visibile sul sensore di tracking insieme al profilo della fenditura, che viene illuminata posteriormente da un led perchè ciò sia possibile. L'oggetto viene quindi portato sulla fenditura usando i controlli manuali del telescopio e mantenuto sopra la stessa col sistema selfguide della Sbig. Lo spettro viene poi registrato dal sensore di imaging. Lo strumento è corredato di due reticoli, uno a bassa risoluzione, da 150 l/mm, che dà una dispersione da 4,3 Å/pixel, ed uno da 600 l/mm che da una dispersione di 1,0 Å/pixel, e da due fenditure, di 100 e 25 µ. Il range di lunghezza d'onda va da 3800 Å a 7500 Å, rendendo così possibile la registrazione sia delle righe del Calcio che quelle dell'Ossigeno e H₂O atmosferico nel vicino IR. Le dimensioni, di 10 x 12 x 20 cm sono piuttosto contenute, mentre il peso è di 2,4 Kg. Da quanto si deduce dall'immagine del manuale, la meccanica dello strumento appare piuttosto complessa, con un sistema di cambio del reticolo a leva piuttosto semplice e ben fatto, come anche il comando micrometrico del reticolo stesso. Il cambio della fenditura appare più complesso, in quanto richiede lo smontaggio della copertura e del supporto della fenditura stessa. Lo strumento prevede anche la possibilità di riprendere uno spettro da una lampada di calibrazione o da una lampada di diverso tipo da porre vicino al vetro opalino posto sul fondo, per facilitare le operazioni di calibrazione. In ultimo, l'analisi spettrale può essere effettuata con un software dedicato venduto in bundle con lo spettroscopio. Un punto negativo del sistema, appare la mancanza di un sistema di filtri per evitare il problema della sovrapposizione degli ordini, dato il ridotto numero di linee per mm dei due reticoli in dotazione. Tuttavia, lavorando lo spettroscopio nel 1° ordine, tale problema appare tutto sommato non rilevante, data la estrema debolezza dello spettro di ordine 2. Il prezzo attuale di vendita del listino Sbig è di 4995 \$.

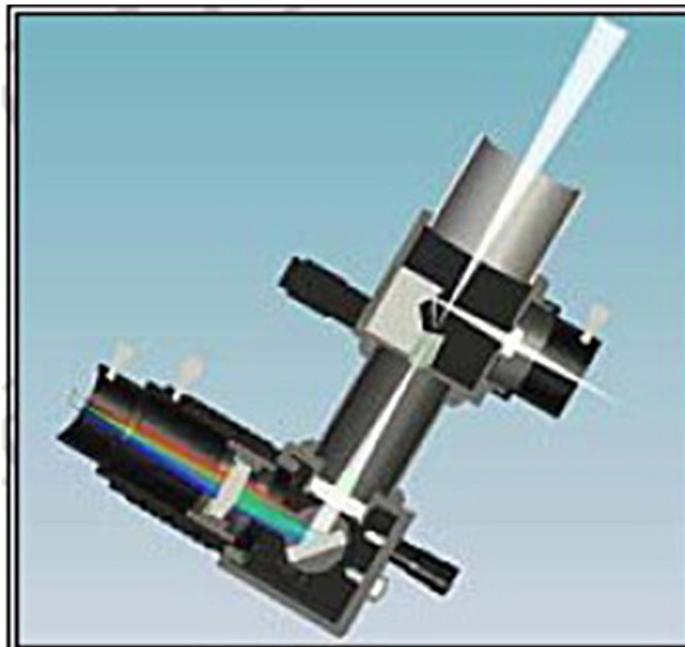


[Spettroscopio Baader DADOS](#)

Dal sito del rivenditore italiano dello strumento, si evince che il DADOS è uno spettroscopio leggero e compatto (solo 0,85 Kg per 80x 150 x 205 mm), che impiega due differenti reticoli a riflessione, uno standard da 200 l/mm, ed uno opzionale da 900 l/mm che forniscono una dispersione di 39,7 nm/mm e 10,6 nm/mm. Le fenditure disponibili sono di 25, 35 e 50 micron, affiancate. Gli obiettivi, collimatore e di osservazione, di 80 e 96 mm di focale rispettivamente, sono doppietti acromatici di qualità ottimale. L'obiettivo della camera può essere foceggiato con un movimento elicoidale non rotante di 50 mm di corsa, che è sufficiente per quasi tutti i tipi di CCD, DSLR ed oculari in commercio. La fenditura è retroilluminata da un led rosso per facilitare la regolazione di una camera di guida, mentre la movimentazione fine del reticolo per selezionare la lunghezza d'onda è garantita da un micrometro. L'intera regione spettrale dal vicino UV al visibile ed all'infrarosso vicino (350nm - 950nm) può essere coperta con una camera con un sensore CCD da 1/3 di pollice. Lo spettrografo forma tre immagini spettrali simultanee (25/35/50Fm), disposte una di fianco all'altra sul fuoco.



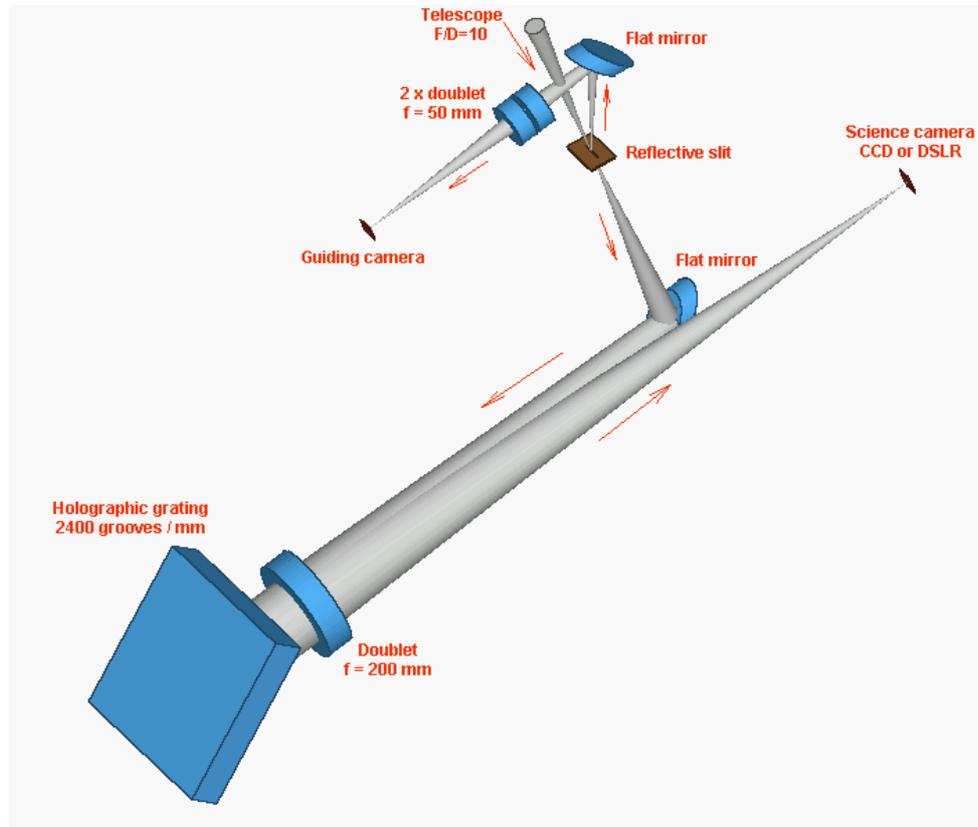
Dallo schema dello strumento si osserva che la luce in arrivo dal telescopio sulla fenditura viene parzialmente deviata da un prisma verso un portaoculare dove può essere alloggiato un oculare per la centratura dell'oggetto sulla fenditura stessa e la eventuale guida. Il collimatore, foccheggiato sulla fenditura, invia il fascio ottico al reticolo, dal quale l'immagine spettrale diffratta viene poi inviata all'ottica di osservazione.



Il prezzo di listino Unitron del DADOS, con entrambi i reticoli di 200 e 900 l/mm, è di 1.980 €.

[Spettroscopio Shelyiak LHIRES III](#)

Il progetto LHires III fu sviluppato da C. Buil ed i responsabili della Shelyak instruments nell'ambito dell'associazione AUDE nel 2003, nell'intento di creare uno strumento universale ad alta risoluzione, sia per spettroscopia solare che stellare. Lo schema dello strumento, di tipo Littrow autocollimante, è stato già illustrato in precedenza, e si ripete qui di seguito:



Lo strumento è progettato per un fascio ottico di $f = 10$, come quello dei comuni SC. Come si è detto, la luce in arrivo dal telescopio è in parte trasmessa passando attraverso le lame della fenditura, in parte riflessa dalla superficie riflettente di questa. La parte riflessa alimenta, tramite UNO SPECCHIO A 45° ed un doppietto acromatico da 50 mm di focale, la camera di guida, mentre quella trasmessa va ad alimentare, passando attraverso un doppietto acro da 200 mm di F, un reticolo da 2400 l/mm, (od altro che lo sostituisce) e, subendo un doppio passaggio, una camera CCD posta al fuoco del doppietto stesso. È installato quindi un sistema di guida fuori asse molto interessante: la fenditura viene montata su supporto e, con procedimento proprietario appositamente messo a punto, viene lucidata su macchina tipo Blanchard: i fianchi della stessa, in acciaio lucidato, diventano così lo specchio di rinvio della guida fuori asse; lo spettroscopio nell'allestimento base permette così di guidare direttamente sul campo di ripresa, tenendo l'oggetto in analisi dentro la fenditura che resta visibile nel centro del campo stesso. Lo strumento è accreditato di prestazioni di tutto rispetto. I reticoli applicabili e facilmente intercambiabili vanno da 150 l/mm a 2400 l/mm, permettendo una vasta gamma di applicazioni. Fenditura e reticoli sono intercambiabili senza utensili, senza smontare altre parti e senza disinstallare lo spettroscopio dal telescopio. La dispersione spettrale è notevole e così anche la risoluzione. Lo strumento prevede l'uso di lampade di calibrazione intercambiabili. Il peso è di 1700 grammi e le dimensioni sostenute, ma non eccessive. Il prezzo dello strumento pronto all'uso col solo reticolo da 2400 l/mm è di 2570 € nel listino Aleph che però risale al 2007.



La Shelyak Instruments produce anche uno spettroscopio con vocazione solare, di nome Lhires Lite, del quale non è mostrato lo schema di funzionamento. Il reticolo viene mosso grazie ad una leva, e lo spettro osservato attraverso un oculare montato su un foceggiatore elicoidale. Alla base c'è un foro filettato per il montaggio su un normale treppiede. Lo strumento si configura come ausilio didattico, e consente l'osservazione e la ripresa dello spettro solare. Il suo prezzo di vendita (listino Aleph) è di 990 €.



Dopo questa carrellata di spettroscopi autocostruiti e commerciali, si pone immediata la domanda quale dei due tipi sia la più adatta e possibile per l'astrofilo evoluto, che intenda dare una svolta scientifica alla sua passione. La risposta a questa domanda è meno immediata di quello che possa sembrare, in quanto dipende da due fattori cruciali: la possibilità (e la volontà) di spesa e la capacità progettuale e manuale, nonché la disponibilità di tempo per portare avanti progetti di autocostruzione.

Chi ha possibilità di spesa non avrà remore all'acquisto dei modelli più sofisticati dianzi mostrati, il cui prezzo va dai 2000 ai 3000 €, chi non ce l'ha, o semplicemente non intende spendere tale cifra, è bene che tenti l'autocostruzione. Questa, come si è mostrato, non implica necessariamente, se non per pochi pezzi, la disponibilità di un' officina meccanica, e può essere agevolmente intrapresa con mezzi casalinghi. Il sottoscritto si è costruito con mezzi simili ben 10 spettroscopi, che usa con soddisfazione. E' tuttavia, necessario fare un distinguo tra spettroscopi solari e stellari. Uno strumento solare è, a mio avviso, di molto più agevole autocostruzione, specie per finalità didattiche; uno stellare, per vari motivi implica un livello di sofisticazione maggiore e necessita, per usi seri, di un progetto più complesso e non semplice da attuare in ambito autocostruttivo (si pensi all'implementazione di una lampada di calibrazione; all'apparato meccanico di sostituzione dei reticoli; ai rinvii per l'autoguida); nel caso quindi che tale tipo di spettroscopia costituisca il principale interesse, e si abbia una certa capacità di spesa, è consigliabile l'acquisto di uno strumento commerciale ben fatto.

Un' altro approccio è necessario per chi è alle prime armi nel settore della spettroscopia e/o dell'astrofilia in genere. In tal caso l'uso di uno strumento complesso rischierebbe di vanificare le aspettative e produrre l'effetto dell'abbandono dell'interesse. In tali casi, consiglieri, per la spettroscopia solare, l'autocostruzione di un semplice modello di

spettroscopio economico, anche quelli con CD al posto di un reticolo, perlomeno all'inizio, per prendere pratica e conoscere le principali righe di assorbimento dello spettro solare. Per la spettroscopia stellare, consiglieri di iniziare con un semplice reticolo a trasmissione commerciale tipo "Star Analyser", "Rainbow Optics" e simili, che rendono molto più semplice ed amichevole il primo impatto con la spettroscopia, per il quale l'alta risoluzione in questa fase non è necessaria.