

Perché la Spettroscopia

Relazione al 29° convegno del GAD - Lorenzo Franco (lor_franco@libero.it)

Premessa

La spettroscopia è un argomento del quale non sempre gli astrofili riescono a comprenderne fino in fondo l'importanza e la portata, pensando si tratti di un tema di nicchia, riservato solo agli specialisti. Alla domanda del "Perché la spettroscopia" si potrebbe rispondere in modo breve e conciso con la seguente frase.

Perché la spettroscopia rappresenta il più potente e completo strumento per comprendere la natura delle sorgenti astronomiche.

Cos'è la spettroscopia

I termini *spettroscopia*, *spettrografia*, *spettrometria* sono dei sinonimi che indicano rispettivamente: l'osservazione, la registrazione e la misura degli spettri. La spettroscopia astronomica si propone di registrare e misurare il flusso luminoso emesso dalle stelle nei vari colori che rappresentano le lunghezze d'onda e quindi l'energia dei fotoni emessi dalla sorgente. Possiamo considerare i fotoni come dei messaggeri. La spettroscopia rappresenta lo strumento che ci permette di estrarre dalla luce (fotoni) le informazioni fisiche sulle sorgenti che li hanno prodotti.

Cosa serve per ottenere uno spettro

Da un punto di vista didattico, possiamo seguire l'esperienza di Newton dotandoci di un prisma di vetro con il quale scomporre la luce visibile nelle sue componenti (colori). Per fini astronomici dobbiamo dotarci di un reticolo di diffrazione (StarAnalyser) attraverso il quale è possibile ottenere lo spettro di numerose stelle. Per raggiungere dei risultati ancora migliori dobbiamo ricorrere ad uno spettroscopio con uno schema ottico più complesso dotato di fenditura che ci permetterà di ottenere spettri con una risoluzione maggiore. In commercio ci sono spettroscopi di risoluzione e costo diversi che possono soddisfare le varie esigenze. Resta comunque sempre possibile la strada dell'autocostruzione, per coloro che ne hanno la capacità. Sul web sono reperibili alcuni progetti realizzabili anche con le stampanti 3D.

Come ottenere uno spettro

Il modo più semplice ed economico per ottenere lo spettro di una sorgente stellare è quello di montare il reticolo StarAnalyser direttamente sull'obiettivo di una camera fotografica digitale. Il campo inquadrato

riprenderà le stelle più luminose con al fianco il relativo spettro. Per ottenere spettri di stelle più deboli occorrerà necessariamente utilizzare un telescopio. Il reticolo StarAnalyser in questo caso andrà montato sul "naso" della camera di ripresa come un comune filtro, il tutto collocato al fuoco del telescopio. Si dovranno utilizzare dei tempi di esposizione sufficientemente lunghi con pose guidate, specialmente per le stelle più deboli. Per ottenere spettri a più alta risoluzione sarà indispensabile passare ad uno spettroscopio a fenditura montato al fuoco del telescopio e dotato di un'apposita camera di ripresa ed una camera di guida che avrà il compito di tenere bene in fenditura la stella durante le lunghe esposizioni, necessarie per registrare gli spettri delle sorgenti più deboli.

Come si presenta uno spettro

Lo spettro grezzo (2D), una volta acquisito, si presenta come una strisciata la cui intensità è direttamente correlata al flusso luminoso ricevuto. Sulla sinistra troviamo le lunghezze d'onda del violetto ed a destra quelle del rosso. Si possono notare anche delle tenui bande verticali causate dalle righe di assorbimento dell'idrogeno. Le intensità in ADU (Analog to Digital Unit) dei pixel dello spettro variano lungo l'asse delle ascisse. Il processo di riduzione in lambda consiste nel trasformare le coordinate dei pixel nelle corrispondenti lunghezze d'onda in Angstrom. Il profilo spettrale (1D) che si ottiene descrive le variazioni del flusso luminoso al variare delle lunghezze d'onda (colori) e rappresenta le caratteristiche della sorgente luminosa che lo ha emesso. Durante la fase di acquisizione sarà necessario riprendere anche degli spettri accessori di calibrazione che saranno utilizzati nella fase di riduzione, utilizzando software gratuiti disponibili sul web.

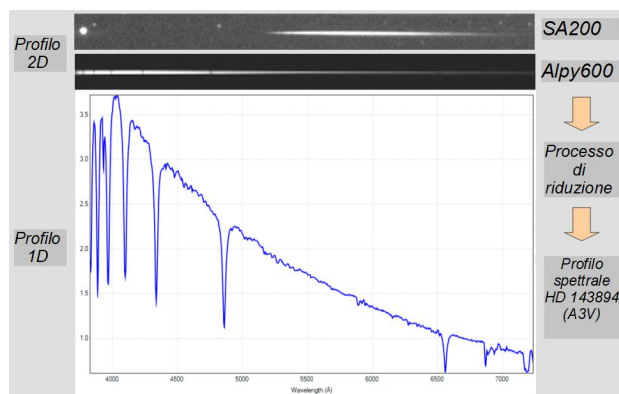


Figura 1: Spettro grezzo (2D) e profilo spettrale (1D) al termine del processo di riduzione.

Cosa ci racconta uno spettro

Lo spettro stellare è caratterizzato da tre fattori: *profilo spettrale*, *righe di assorbimento/emissione*, *aspetto delle righe*. L'andamento del profilo spettrale deriva direttamente dalla temperatura della sorgente stellare. Le stelle emettono principalmente radiazione elettromagnetica di tipo termico che si distribuisce secondo una curva caratteristica chiamata curva di Planck (emissione di corpo nero). Le righe di assorbimento/emissione sono il risultato di quanto avviene a livello atomico e permettono di risalire alla composizione chimica della sorgente. La forma caratteristica delle righe (aspetto) è legato invece alle caratteristiche fisiche della sorgente (temperatura, pressione e velocità).

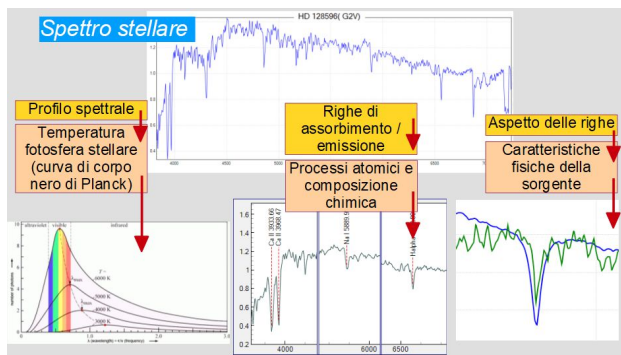


Figura 2: Lo spettro di una stella è caratterizzato dal suo profilo, dalle righe di assorbimento/emissione e dall'aspetto delle righe (forza e larghezza).

Queste caratteristiche dello spettro rappresentano la *chiave* che permette di comprendere la natura fisica delle sorgenti stellari, come vedremo di seguito con maggiore dettaglio.

Profilo spettrale e Temperatura

La forma del profilo spettrale varia enormemente sulla base della temperatura della stella che lo ha emesso. Ad esempio una stella bianca come Vega ha un picco di emissione nel violetto (9000 K°), mentre una stella rossa come Betelgeuse un picco nel rosso (4000 K°) ed una stella gialla come il Sole emette principalmente nella parte centrale dello spettro (5800 K°).

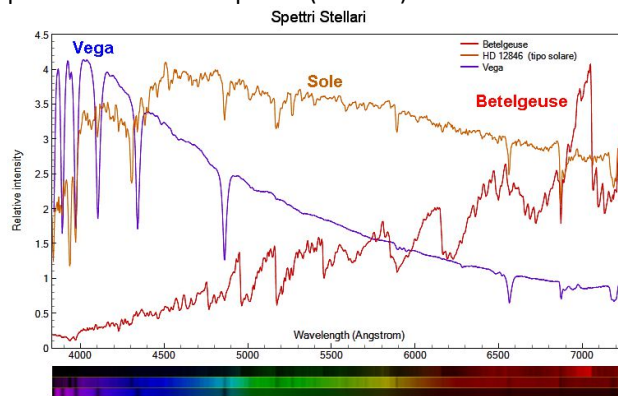


Figura 3: Spettri a confronto di tre stelle di colore diverso: Vega, Sole, Betelgeuse.

Sulla base della temperatura è quindi possibile trovare una prima classificazione spettrale. Il diagramma H-R colore-luminosità mette in relazione la temperatura (colore) delle stelle con la loro luminosità intrinseca (magnitudine assoluta). La grande maggioranza delle stelle si distribuisce lungo una fascia centrale (sequenza principale) la cui luminosità e colore viene determinata solo dalla massa stellare.

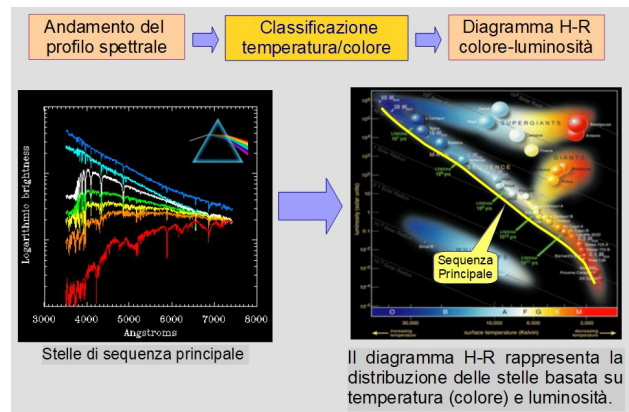


Figura 4: Diagramma H-R temperatura/colore-luminosità.

Dalla classe spettrale possiamo risalire alla magnitudine assoluta M attraverso il diagramma H-R per ottenere il modulo di distanza $(m-M)$ con il metodo della parallasse spettristica.

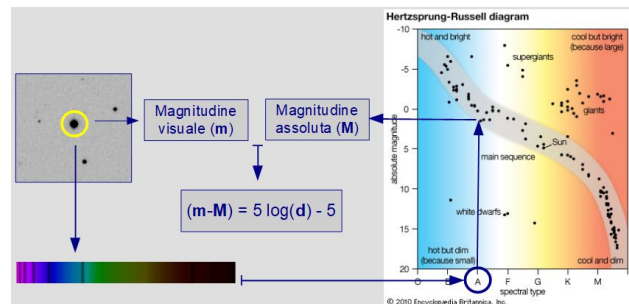


Figura 5: Parallasse spettristica di una stella.

Processi atomici e composizione chimica

Gli spettri nascondono un significato profondo che va ricercato al livello atomico (salti quantici). I livelli energetici di un atomo infatti variano in modo discreto. Le transizioni tra livelli energetici permettono agli atomi di assorbire o emettere dei pacchetti di energia (fotoni) di una determinata lunghezza d'onda ($E = h\nu = hc/\lambda$). Quando un fotone viene assorbito, l'elettrone salta ad un livello energetico superiore. Quando un elettrone ritorna al livello energetico inferiore, viene riemesso un fotone (es: $4 \rightarrow 2$ H β). La differenza di energia tra i due livelli viene assorbita/emessa formando le righe di assorbimento/emissione nello spettro. Es.: $\lambda = 12403.3 / 1.89 \text{ eV} = 6563 \text{ \AA}$ (riga H α).

Le righe di assorbimento/emissione degli spettri contengono quindi delle informazioni sui processi atomici che le hanno generate.

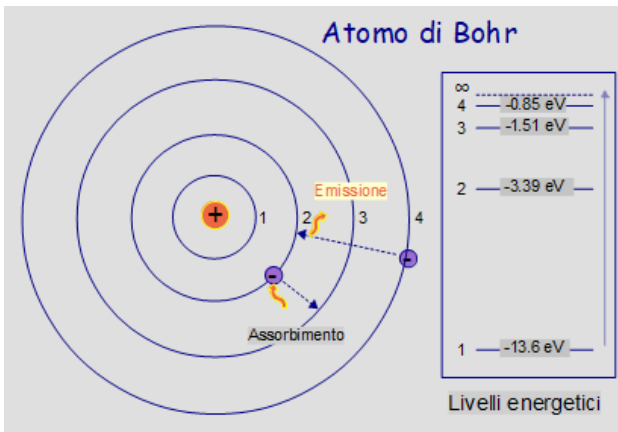


Figura 6: Atomo di Bohr e livelli energetici. I salti degli elettroni tra un livello energetico e l'altro determinano i fenomeni di assorbimento / emissione di fotoni.

Gli spettri sono caratterizzati da tre tipologie collegate alle caratteristiche fisiche della sorgente. Negli spettri stellari queste tre tipologie spesso si combinano tra di loro.

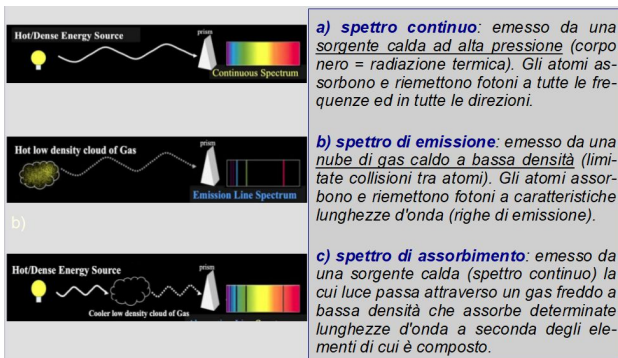


Figura 7: Tre tipologie di spettri che si combinano tra di loro nelle sorgenti stellari. Gli spettri di emissione denotano la presenza di nubi di gas (dischi circumstellari e regioni nebulari), eccitate da stelle calde vicine che emettono principalmente nell'ultravioletto.

Le righe di assorbimento/emissione rappresentano una sorta di "codice a barre" che ci permette di identificare gli elementi chimici che costituiscono la sorgente luminosa. Ad esempio nello spettro della stella di tipo solare HD 128596 troviamo le righe di assorbimento dell'idrogeno, del calcio, del ferro, del magnesio e del sodio.

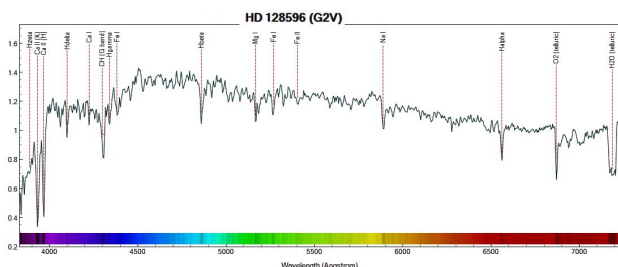


Figura 8: Spettro caratteristico di una stella di tipo solare.

Aspetto delle righe e caratteristiche fisiche

La temperatura e la densità sulla superficie stellare influisce sull'aspetto delle righe spettrali (forza e larghezza). Queste caratteristiche permettono di derivare la classe di luminosità della stella e quindi il suo raggio (stella di sequenza principale, gigante, supergigante).

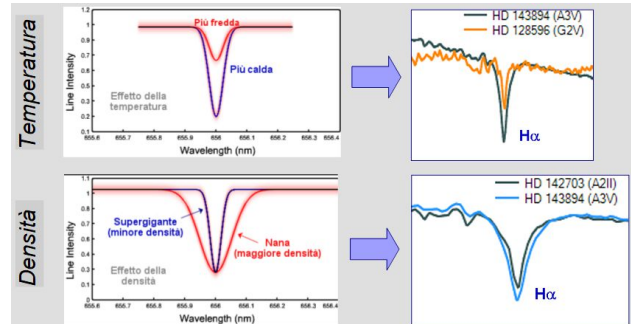


Figura 9: La profondità e l'ampiezza delle righe spettrali varia in base alla temperatura ed alla densità sulla superficie stellare.

L'effetto Doppler influisce sullo spostamento e sull'allargamento delle righe spettrali. Una sorgente che si avvicina/allontana mostra uno spostamento verso il blu/rosso attraverso il quale è possibile determinare la sua velocità radiale: $(V_r \text{ (km/s)} = \Delta\lambda * c / \lambda_0)$. Il guscio in espansione di una stella esplosa produce un allargamento delle righe: $(V_r \text{ (km/s)} = \text{FWHM} * c / \lambda_0)$.

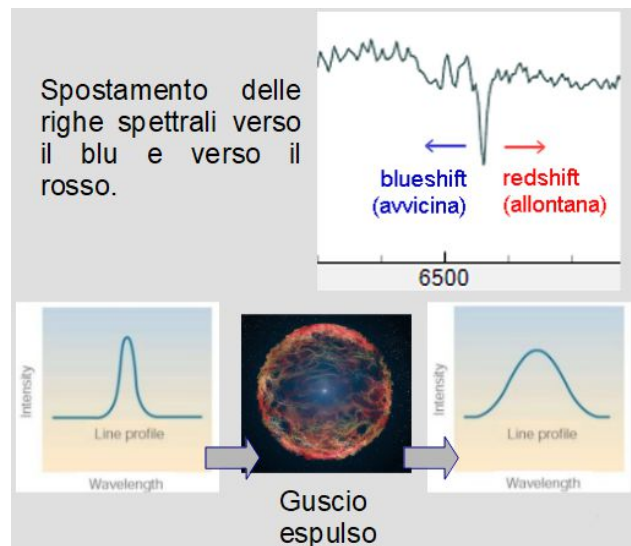


Figura 10: (sopra) Spostamento delle righe. (sotto) allargamento delle righe causato dall'espansione del guscio di una stella.

Anche la rotazione stellare produce un allargamento delle righe spettrali con cui si può stimare la velocità di rotazione (fattore $[v \sin i]$). Nei sistemi binari si osservano degli spostamenti periodici delle righe verso il rosso e verso il blu da cui è possibile determinare la massa stellare delle componenti.

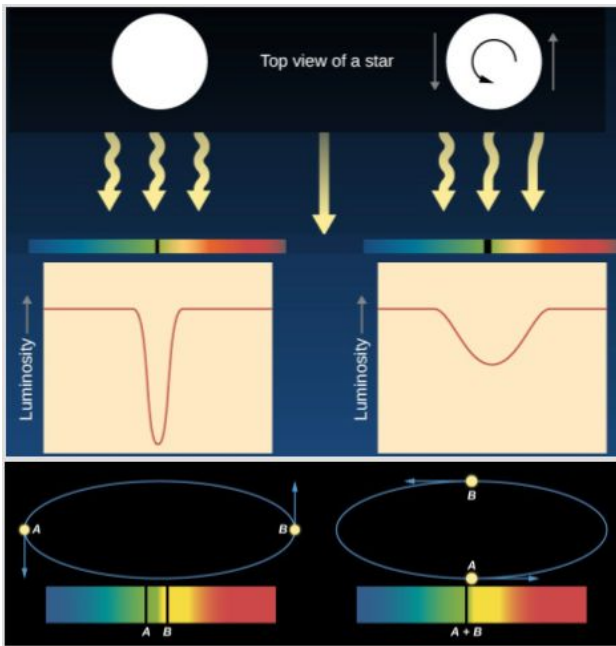


Figura 11: (sopra) allargamento delle righe causato dalla rotazione stellare. (sotto) variazione periodica della lunghezza d'onda delle righe spettrali in un sistema binario.

Il ruolo degli astrofili

Gli astrofili possono monitorare i fenomeni transienti registrando le evoluzioni di sistemi astrofisici complessi come: novae, variabili simbiotiche, cataclismiche, stelle Be e molto altro ancora ... comete comprese. Gli spettri raccolti si possono mettere a disposizione della comunità scientifica attraverso i database: ARAS, AAVSO, BeSS. La magnitudine limite osservabile dipende dall'apertura del telescopio e dalla risoluzione dello spettroscopio. Seguono alcuni esempi di osservazione e monitoraggio di novae e stelle simbiotiche ottenuti da Roma con un telescopio da 20 cm ed uno spettroscopio a fenditura Alpy600.

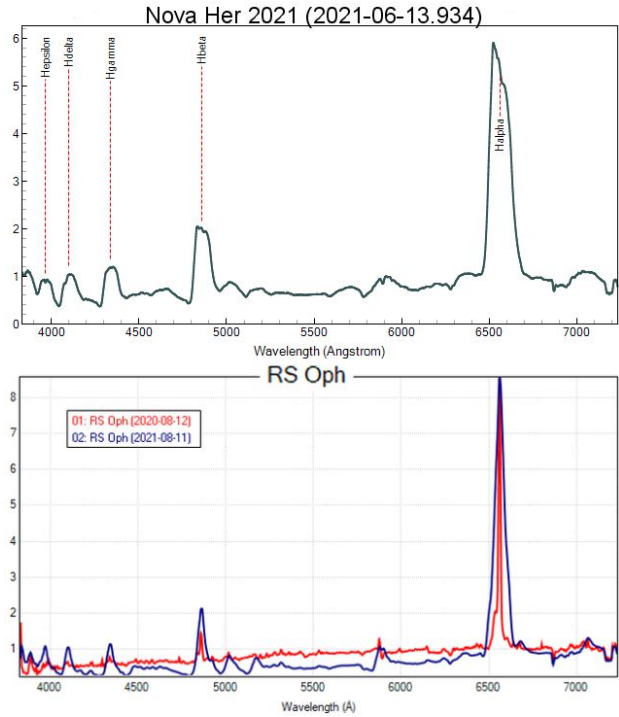


Figura 12: (sopra) La Nova Herculis 2021, osservata il 13-giu-2021, mostra le righe di emissione molto allargate, compatibili con una velocità di espansione del guscio di circa 5000 km/s. Magnitudine 8.3 V. (sotto) La Nova Ricorrente RS Ophiuchi in fase di outburst, osservata l' 11-ago-2021, mostra righe di emissione molto allargate rispetto alla fase di quiescenza. L'allargamento è compatibile con una espansione del guscio di circa 2500 km/s. Magnitudine 5.5 V e 10.8 V.

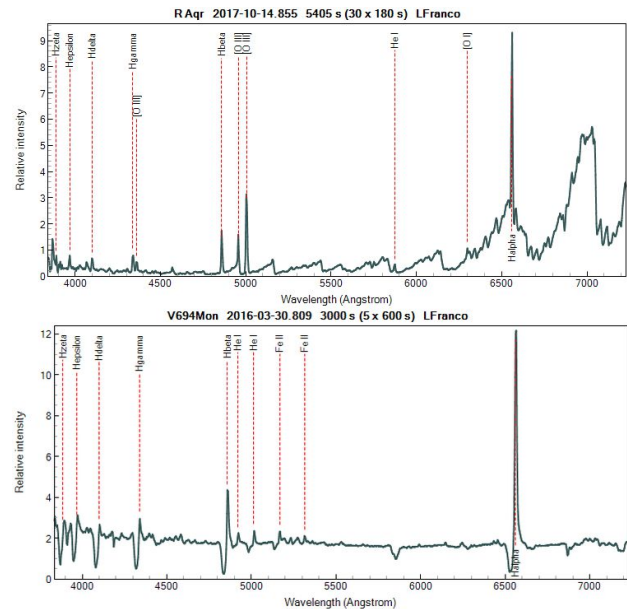


Figura 13: (sopra) R Aquarii osservata durante la campagna a supporto dei telescopi Chandra e Hubble (ottobre 2017). Magnitudine 10.1 V. (sotto) V694 Monoceros osservata nel corso di un outburst (marzo 2016) con il caratteristico profilo delle righe (P-Cygni). Magnitudine 9.1 V.

Da non dimenticare le osservazioni fotometriche che continuano ad avere un ruolo fondamentale per la ricerca, specialmente per gli oggetti di debole luminosità. Possiamo considerare la fotometria come una sorta di spettroscopia a bassissima risoluzione. Con i filtri fotometrici B, V, R si misurano solo tre punti dello spettro visibile. Gli indici di colore (B-V), (V-R) ci forniscono un'indicazione approssimata del colore e quindi del tipo spettrale.

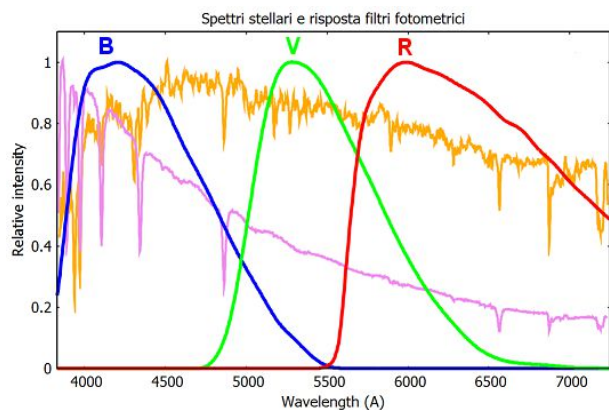


Figura 14: La fotometria multi-banda rappresenta una sorta di spettroscopia a bassissima risoluzione. I filtri B, V, R misurano solo il flusso emesso in tre punti dello spettro visibile.

Conclusioni

Come abbiamo avuto modo di vedere la spettroscopia rappresenta la *chiave* per la comprensione delle caratteristiche fisiche delle sorgenti astronomiche. Anche gli astrofili possono fornire con le loro osservazioni un importante e valido contributo per monitorare e registrare le continue variazioni di sorgenti in fase di veloce evoluzione come accade nei fenomeni transienti.

L'invito rivolto a tutti gli astrofili, in particolare a coloro che hanno già una certa esperienza nell'astrografia e nella fotometria, è quello di prendere in seria considerazione la possibilità di sperimentare la spettroscopia, iniziando magari con un semplice reticolo di diffrazione per poi passare a strumenti più sofisticati e complessi.

Collegamenti utili

ARAS: <http://www.astrosurf.com/aras/>

AAVSO: <https://www.aavso.org/spectroscopy-observing-section>

BeSS: <http://basebe.obspm.fr/basebe/>

Schede di approfondimento

Le **Novae** sono originate dalle Variabili Cataclismiche (sistemi binari interagenti molto stretti, composti da una nana bianca e da una stella nana di sequenza principale da cui fuoriesce l'idrogeno che cade sulla nana bianca). L'idrogeno si deposita e si accumula sulla nana bianca e, in condizioni di pressione e temperatura adeguate, va soggetto all'innesco di forti esplosioni nucleari che producono il rapido aumento di luminosità del sistema.

Le **Stelle Be** sono delle brillanti stelle che presentano delle righe di emissione nello spettro. Tali righe originate da dischi gassosi che si sono formati dal materiale espulso dalla stella. Es. *Gamma Cassiopeiae* osservata da Angelo Secchi nel 1866.

Le **Variabili Simbiotiche** sono dei sistemi binari interagenti, costituiti da una gigante rossa ed una nana bianca intorno alla quale si è sviluppato un disco di accrescimento alimentato dal vento stellare emesso dalla gigante rossa. Es. *Z Andromedae*.

Profilo P-Cygni, prende il nome dalla stella su cui venne osservato per la prima volta. Si tratta di un particolare profilo spettrale che combina una componente di assorbimento con una di emissione. Il fenomeno è causato da un guscio di gas caldo e rarefatto espulso dalla stella. In questo scenario, il materiale espulso lungo la linea di vista dell'osservatore viene assorbito dalla fotosfera stellare producendo la componente di assorbimento, spostata verso il blu per effetto Doppler, mentre quello espulso perpendicolarmente alla linea di vista produce la componente di emissione della riga. La differenza della lunghezza d'onda delle due componenti del profilo spettrale permette di valutare la velocità di espansione del guscio.