

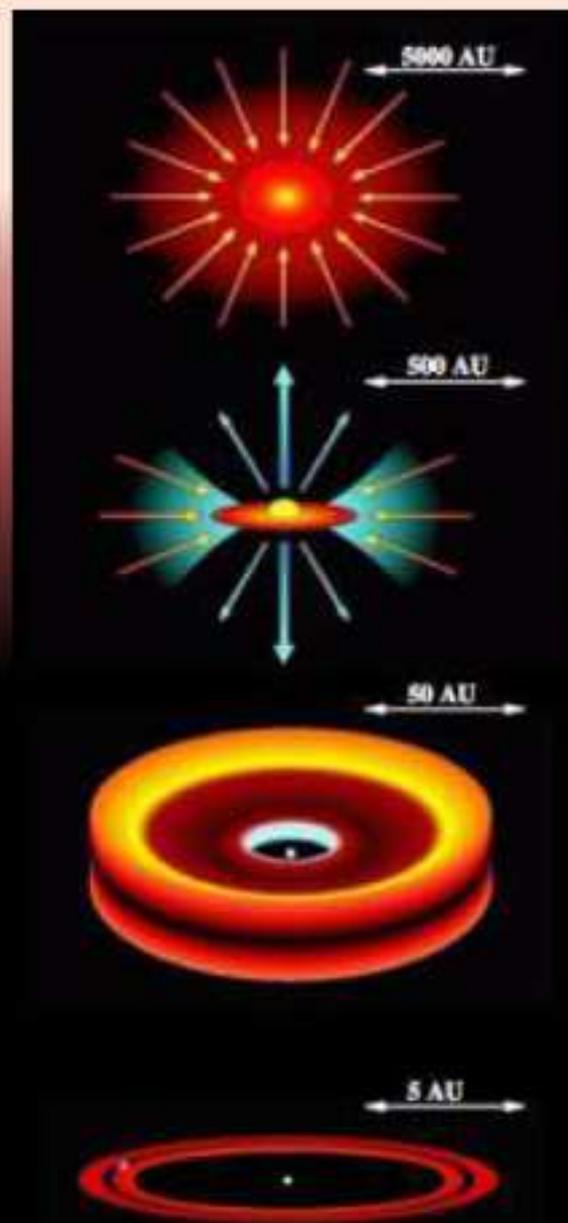
Introduzione ai principali tipi di oggetti astronomici osservati da ANS Collaboration

Oggetti di Pre-Sequenza Principale

Teresa Giannini, Simone Antonucci, Dario Lorenzetti

Istituto Nazionale di Astrofisica INAF

Osservatorio Astronomico di Roma, 00040 Monte Porzio, Italia



Introduzione ai principali tipi di oggetti astronomici osservati da ANS Collaboration

Oggetti di Pre-Sequenza Principale

(traduzione dall'originale in inglese di Gian Luigi Righetti)

Teresa Giannini, Simone Antonucci, Dario Lorenzetti

Istituto Nazionale di Astrofisica INAF

Osservatorio Astronomico di Roma, 00040 Monte Porzio, Italia

1 Introduzione: la formazione stellare in sintesi

I primi stadi della formazione stellare corrispondono alla frammentazione di una nube molecolare in nuclei legati gravitazionalmente (masse tipiche di $10^3 - 10^4 M_{\odot}$ e dimensioni di poche decine di parsec), che sono inizialmente sostenuti contro il collasso da una combinazione di pressione di origine termica, magnetica, e da moto turbolento del gas (si vedano i pannelli 1 e 2 della Fig. 1).

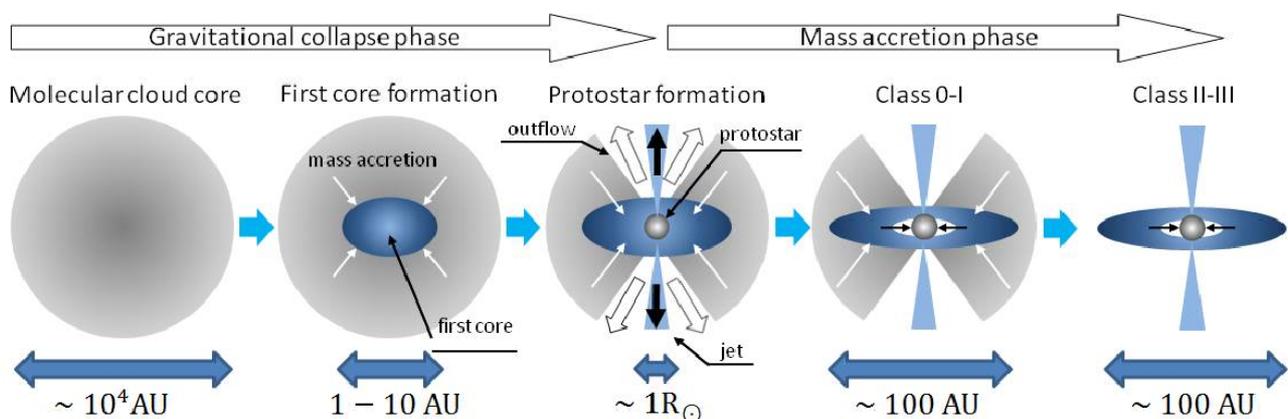


Figura 1: Visione schematica di un processo di formazione stellare (pannelli da 1 a 5 da sinistra verso destra)

Il collasso di una nube porta alla formazione di strutture a forma di disco (pannello 3 della Fig. 1), poiché il materiale con momento angolare elevato non può cadere direttamente sull'oggetto centrale ma si accumula in un disco in rotazione. Le osservazioni hanno mostrato come quest'ultimo processo sia spesso associato con la potente espulsione di una frazione del materiale accresciuto sotto forma di getti bipolari e flussi verso l'esterno allineati con l'asse di rotazione della protostella. Sebbene il meccanismo di fuoriuscita non sia ancora completamente compreso, è largamente accettato che questo sia un ulteriore modo di trasferire all'esterno momento angolare e, di conseguenza, consentire accrescimento di materia sull'oggetto centrale.

Queste prime fasi della formazione stellare costituiscono la cosiddetta *fase principale di accrescimento* (pannello 4 di Fig. 1) durante la quale viene accumulato più del 90% del valore

finale della massa della stella. In questo stadio la giovane protostella irraggia verso l'esterno la sua luminosità di accrescimento ($L_{acc} \approx GM_s \dot{M}_s / R_s$) e inizia la combustione del deuterio (se $M_s \geq 0.1 M_\odot$) o dell'idrogeno (se $M_s \geq 0.8 M_\odot$). Nella successiva fase di pre-sequenza principale (PMS) (pannello 5 di Fig. 1) la combustione nucleare diventerà progressivamente il supporto maggiore contro l'autogravitazione.

Da un punto di vista osservativo, gli stadi evolutivi del processo di formazione stellare sono attualmente divisi in modo empirico in quattro fasi distinte (Figura 2) corrispondenti agli oggetti di classe 0 e alle sorgenti di classe I, II, III. Banalizzando il discorso, esse corrispondono a: fase iniziale di accrescimento, fase finale di accrescimento, stelle PMS con dischi protoplanetari, stelle PMS con cintura asteroidale. Questi criteri di classificazione sono basati sulla forma e sulla posizione del picco della distribuzione spettrale di energia (SED) osservata, che è ricavata misurando la distribuzione del flusso F_ν nelle bande infrarossa estesa e submillimetrica.

Lo stadio primitivo è la fase di **Classe 0**. Essa corrisponde a sorgenti con tempi di vita tipicamente $\sim 1-3 \cdot 10^4$ anni che si pensa siano le prime condensazioni all'interno dei nuclei delle nebulose progenitrici riscaldati dal collasso gravitazionale. Le distribuzioni spettrali di energia delle sorgenti di Classe 0 hanno il massimo a lunghezze d'onda sub-millimetriche e in generale possono essere descritte da singole curve d'irraggiamento di corpo nero con temperature comprese tra 20 e 40 K. La luminosità integrata a lunghezze d'onda $\geq 350\mu\text{m}$ ($L_{\text{sub-mm}}$), proveniente dall'emissione della polvere nell'involuppo, risulta maggiore del 50% della luminosità bolometrica, circostanza che indica come l'involuppo e la massa della protostella siano confrontabili. Le evidenze osservative delle sorgenti di Classe 0 sono: *i*) rilevamento di sorgente radio a onde centimetriche; *ii*) presenza di una estesa emissione nel continuo delle onde sub-millimetriche con un picco definito (dove dovrebbe essere collocata la Classe 0); *iii*) scoperta di un flusso molecolare verso l'esterno e collimato. Finora sono state scoperte meno di un centinaio di sorgenti di Classe 0, concentrate principalmente in regioni nelle costellazioni Serpente, Orione e Perseo. Le luminosità bolometriche degli oggetti di Classe 0 variano tra 1 e $\sim 50 L_\odot$, mentre i tassi di accrescimento tipici sono dell'ordine di $10^{-4} M_\odot \text{ yr}^{-1}$. Da questi valori si possono dedurre masse delle protostelle accrescenti di poche decimi di M_\odot .

La Distribuzione Energetica Spettrale (SED) di oggetti che si trovano in fasi più evolute dipende fortemente dal grado di immersione della protostella all'interno dell'involuppo. Quando la dissipazione della polvere prosegue in stadi evolutivi differenti, la SED raggiunge progressivamente il suo massimo a lunghezze d'onda minori. Oggetti di **Classe I** sono interpretati come protostelle relativamente evolute con età $\sim 1-2 \cdot 10^5$ anni. In questa fase la sorgente centrale è ancora profondamente immersa nella nebulosa e generalmente non è visibile in ottico anche se, a differenze delle sorgenti di Classe 0, la massa del materiale circumstellare è quantitativamente più bassa di quella della protostella. Le SED delle sorgenti di Classe I salgono verso lunghezze d'onda maggiori e hanno ancora il massimo nella banda sub-millimetrica ma, comunque, una emissione apprezzabile viene osservata nell'infrarosso vicino. Le forme sono più larghe rispetto a quella di un corpo nero singolo e sono conformi a un modello composto da una sfera isoterma in rotazione circondata da un disco d'accrescimento otticamente spesso composto principalmente da polvere. I flussi verso l'esterno associati alle sorgenti di Classe I appaiono meno potenti e meno collimati rispetto a quelli supportati dagli oggetti di Classe 0, circostanza che riflette una diminuzione nel tasso di caduta verso l'interno ($\dot{M} \sim 5 \cdot 10^{-6} M_\odot \text{ yr}^{-1}$). A dispetto di questo, comunque, le luminosità di accrescimento delle sorgenti di Classe I risultano anche superiori di quelle misurate per gli oggetti di Classe 0, poiché questi ultimi hanno masse centrali minori e raggi maggiori.

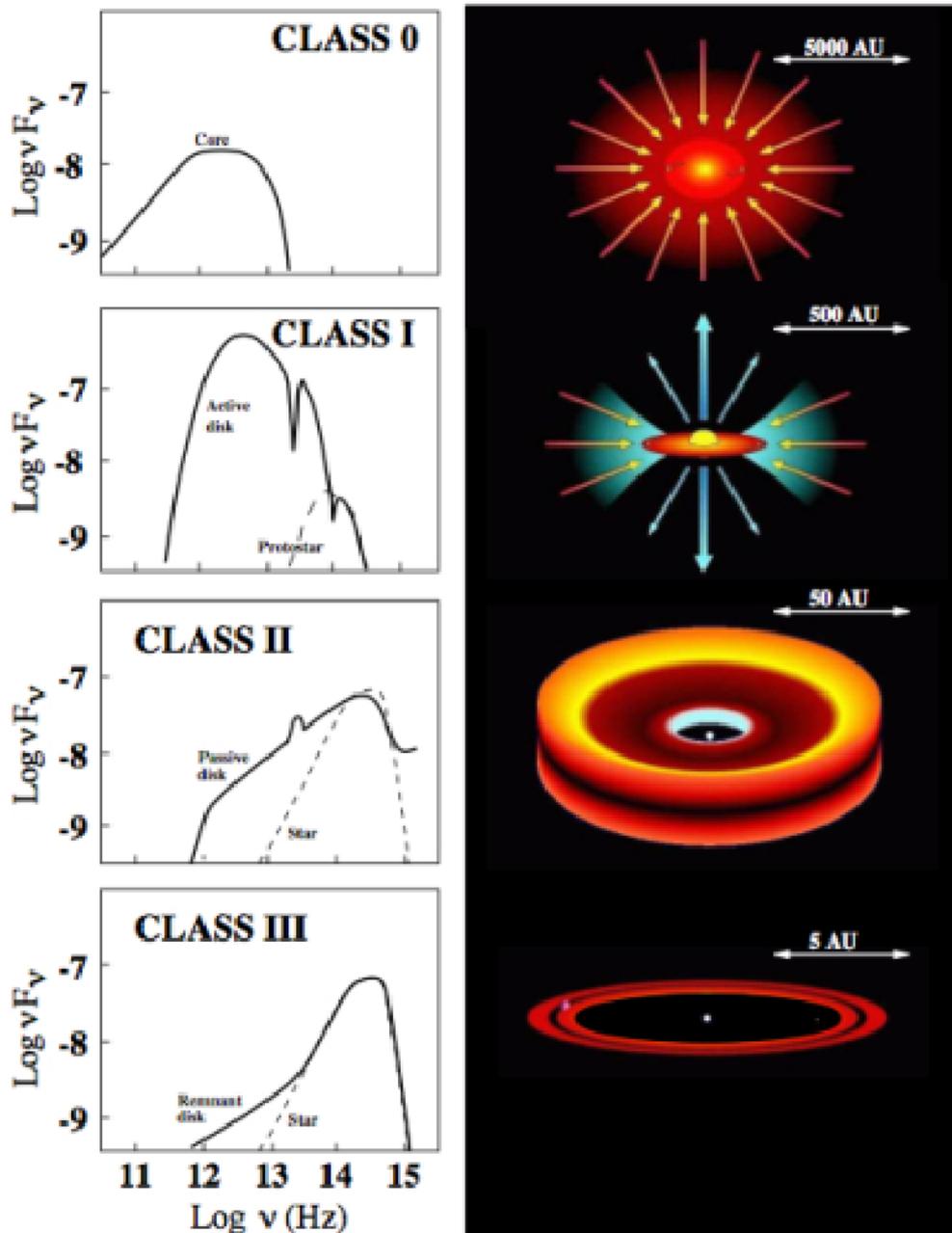


Figura 2: Sequenze evolutive della Distribuzione Spettrale di Energia (SED) di Oggetti Stellari Giovani di piccola massa (YSOs)

Le SED delle sorgenti di **Classe II** (età $\sim 10^6$ anni) presentano ancora un forte eccesso ultravioletto, ma con una pendenza decrescente a lunghezze d'onda maggiori di $2 \mu\text{m}$, e sono solitamente visibili anche in ottico. Le sorgenti di Classe II di piccola massa sono anche classicamente denominate stelle T Tauri (cTTs). Le stelle di Herbig Ae/Be (HAEBE, tipo spettrale A o B) sono le controparti di massa elevata delle stelle T Tauri ($2 \leq M/M_{\odot} \leq 10$). Sebbene le cTTs siano intrinsecamente molto differenti l'una dall'altra, sono tutte mancanti di involucri densi e sono circondate da da dischi di accrescimento luminosi (otticamente spessi a $\lambda \leq 10 \mu\text{m}$), più piccoli di quelli di Classe I. In accordo con uno schema largamente accettato, il materiale in accrescimento si sposta dalle parti più esterne del disco circumstellare verso il bordo interno e lì, seguendo le linee

di campo magnetico, sulla stella al centro (Figura 3). La caduta sulla superficie stellare produce uno shock (macchia luminosa sulla superficie stellare) che si raffredda sia mediante irraggiamento ad alta temperatura nel continuo sia mediante intensa emissione nell'ottico di idrogeno, calcio e ferro. Le SED osservate soddisfano efficacemente un modello originato da una stella di tipo spettrale avanzato che accresce massa attraverso il disco che la circonda, con tassi tipici di $10^{-8} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$.

Gli oggetti di **Classe III** (età $\sim 10^7$ anni) sono stelle visibili otticamente. Essi includono sia stelle post fase di T Tauri sia stelle di sequenza principale giovani. Come caratteristica comune essi sono circondati da dischi otticamente sottili, nei quali è verosimile stia avvenendo la frammentazione con la formazione di planetesimi e protopianeti.

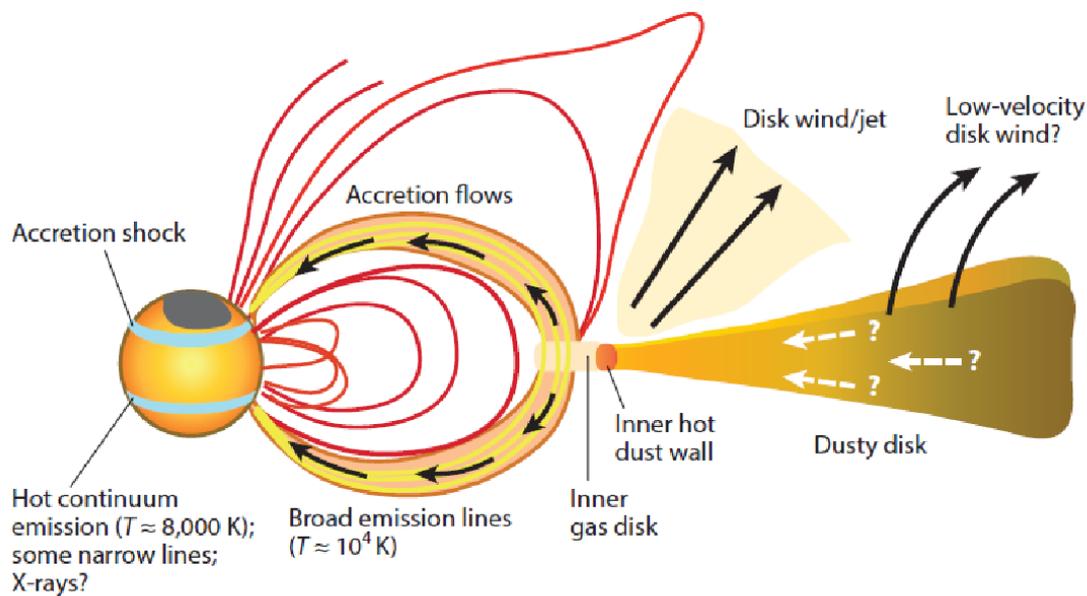


Figura 3: Vista schematica di una giovane stella che si accresce da un disco attraverso la magnetosfera. L'intenso campo magnetico produce larghe macchie luminose e limita la dimensione del disco a pochi raggi stellari. Il disco interno produce un flusso verso l'esterno sotto forma di getti bipolari guidati dall'energia di accrescimento.

2 Variabilità nelle stelle di pre-sequenza principale

In accordo con lo scenario di formazione stellare descritto nella sezione precedente, la formazione stellare appare come un fenomeno quasi-stazionario, con una decrescita progressiva nel tempo del tasso di accrescimento di massa. Questo schema teorico, comunque, non è confermato dalle osservazioni, poiché prevede luminosità stellari (o tassi di accrescimento di massa) molto maggiori di quanto osservato. È possibile che la discrepanza osservata possa essere spiegata da un accrescimento altamente variabile, nel quale una grande frazione di massa viene accresciuta in brevi e intensi episodi.

Ad ogni modo, la variabilità appare essere un proprietà diffusa degli Oggetti Stellari Giovani (YSOs) ed è osservata a differenti lunghezze d'onda, dall'ultravioletto al lontano infrarosso. Nell'ottico, i tempi scala osservati della variabilità si estendono da frazioni di giorno a settimane, mesi e anni. Queste variazioni riflettono un certo numero di cause, come la geometria del sistema,

processi intrinseci di tipo fisico/dinamico e lo stadio evolutivo della sorgente. Mentre le curve di luce degli YSOs evoluti (Classe III) mostrano tipicamente un profilo regolare e periodico, con ampiezze che vanno da 0.1 a 0.5 mag in ottico, si osserva un quadro più complesso e differente nelle cTTS, le cui dinamiche sono dominate dall'interazione della stella con un disco di accrescimento attivo. In un quadro schematico, è possibile distinguere tre tipi principali di variabilità delle cTTs. Il primo tipo è dovuto a macchie sulla superficie della stella durante la rotazione e produce una modulazione di pochi decimi di magnitudine. Il secondo tipo (UXor) viene osservato in sorgenti le cui variazioni di luminosità sono collegate alla polvere che sta ruotando dentro la parte più interna del disco che occulta parte della fotosfera. Le curve di luce tipiche delle UXor presentano diminuzioni regolari su scale di tempo dell'ordine di mesi o anni (Figura 4). Il terzo tipo di variabilità è mostrato da poche sorgenti giovani che subiscono rapide e intense fasi di accrescimento con ampie variazioni di luminosità (fino a 4-5 mag., si vedano per esempio le Figg. 5 e 6). Dal punto di vista osservativo, comunque, finora sono note solo due dozzine di queste protostelle eruttive, la maggior parte delle quali scoperte in modo fortuito durante campagne osservative dedicate ad altre indagini.

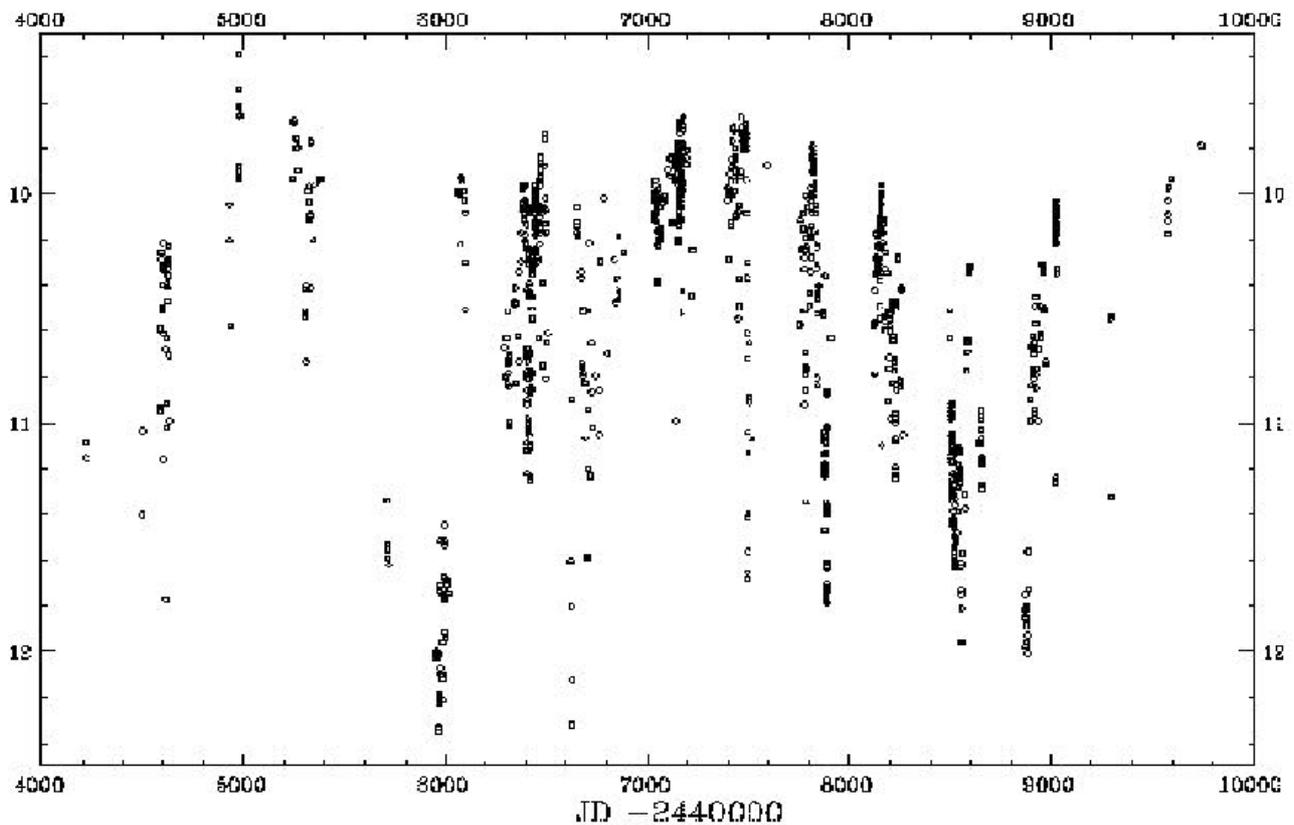


Figura 4: Curva di luce dal 1979 al 1995 di UX Ori nella banda V

Questi oggetti sono normalmente classificati in due classi principali: (1) **FUors** caratterizzati da fasi di attività di lunga durata (decine di anni) con tassi di accrescimento dell'ordine di $10^{-4} - 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ e spettri dominati da righe di assorbimento; (2) **EXors** con fasi di attività più brevi (mesi - un anno) con tempi di ricorrenza di anni, che mostrano tassi di accrescimento dell'ordine di $10^{-6} - 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, e caratterizzati da spettri con righe di emissione. A causa del loro numero molto piccolo, le variabili FUors/EXors sono state considerate finora come oggetti peculiari, e l'accrescimento episodico molto lontano dall'essere il modo comune attraverso il quale le giovani stelle accumulano massa.

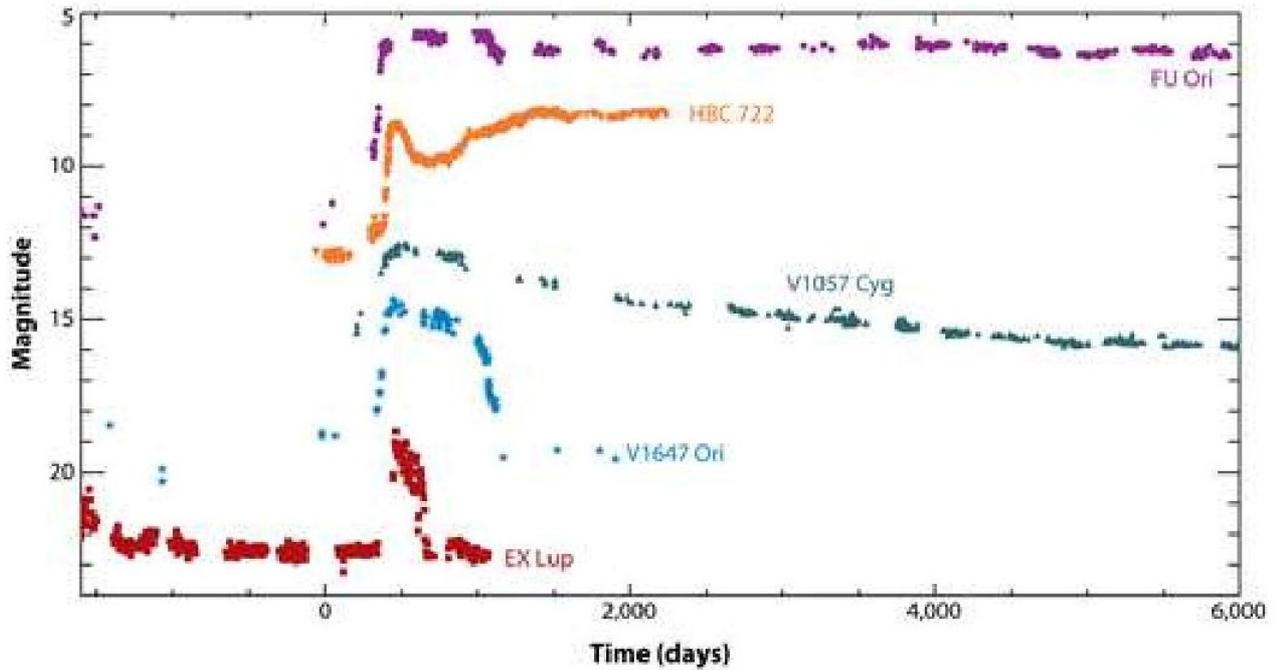


Figura 5: Curve di luce degli outbursts di tipo FUor di FU Ori e HBC722 (V2493 Cyg), outbursts di tipo Exor di EX Lup e V1647 Ori, e outburst di tipo intermedio di V1057 Cyg

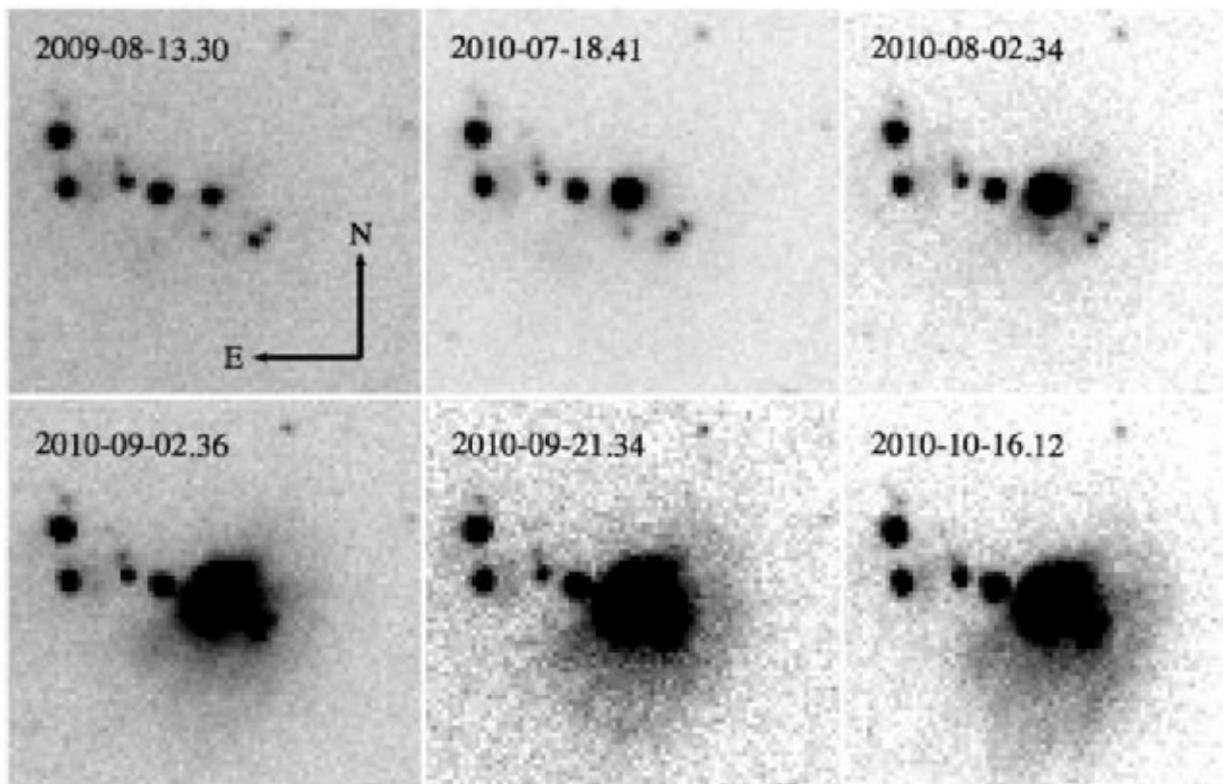


Figura 6: l'outburst della sorgente HBC 722 (=V2493 Cyg) nella banda R

L'interesse per le variabili eruttive della comunità che studia la formazione stellare si è decisamente amplificato negli ultimi dieci anni, quando le surveys condotte su più lunghezze d'onda (2MASS, VISTA, Spitzer, WISE) hanno permesso di incrementare il numero di candidate variabili eruttive per almeno un ordine di grandezza. Questa scoperta ha aperto una finestra nuova e inesplorata per gli studi sulla formazione stellare, che ha un ruolo fondamentale sia per la comprensione del meccanismo stesso di formazione stellare, sia per le implicazioni che l'accrescimento episodico può avere sul "problema della luminosità" descritto in precedenza. Di conseguenza, è fondamentale sia la ricerca di nuove variabili eruttive, sia il monitoraggio sistematico degli oggetti noti. Sotto questo aspetto, gli oggetti EXor sono perfettamente adatti perché, avendo una scala di tempi per la variabilità di mesi/anni, possono essere facilmente studiati sia in quiescenza sia nella fase di outburst su tempi ben confrontabili con quelli della vita di un uomo. Per questo motivo ci concentreremo nel seguito sulle variabili eruttive di tipo EXor.

3 Interrogativi principali sulle EXor

I principali interrogativi sulle EXor sono:

- 1) Qual è il meccanismo fisico che innesca l'outburst? Sono stati proposti due scenari principali per spiegare l'inizio di un outburst nelle EXor. Questi implicano: (1) instabilità nel disco di tipo gravitazionale, termico o nella magnetosfera e (2) perturbazione del disco da parte di un corpo esterno (un pianeta massiccio o incontri ravvicinati in un sistema binario).
- 2) Le EXor sono oggetti molto peculiari o piuttosto rappresentano uno stadio che viene attraversato da *tutte* le stelle di pre-sequenza principale durante la loro evoluzione? In questo caso le EXor potrebbero anche rappresentare uno stadio evolutivo avanzato rispetto alle FUor, essendo le loro fasi attive meno intense (Figura 7).

Una risposta a queste domande può essere trovata solo se: 1) la statistica degli oggetti noti viene decisamente incrementata; 2) gli oggetti noti sono sistematicamente monitorati mediante osservazioni a lungo termine sia fotometriche che spettroscopiche su più lunghezze d'onda; 3) le fasi di quiescenza e quelle di outburst sono osservate ripetutamente, in modo da ricostruire in dettaglio la curva di luce (si veda la prossima sezione) e derivare i parametri fisici (per esempio il tasso di accrescimento di massa) nelle due fasi.

4 EXORCISM: Un programma di monitoraggio

Per le ragioni descritte nelle precedenti sezioni, il nostro gruppo ha iniziato un programma osservativo denominato EXORCISM (EXOR optiCal and Infrared Systematic Monitoring) il cui scopo è intraprendere un monitoraggio fotometrico e spettroscopico nell'intervallo 0.4-2.5 μm di circa 30 oggetti identificati come variabili eruttive note o candidati. Di recente **ANS Collaboration** si è unita al nostro progetto, fornendo importanti contributi che riguardano il monitoraggio ottico di un certo numero di EXor. Nel seguito riassumiamo quali informazioni possono essere dedotte dalle osservazioni fotometriche e spettroscopiche.

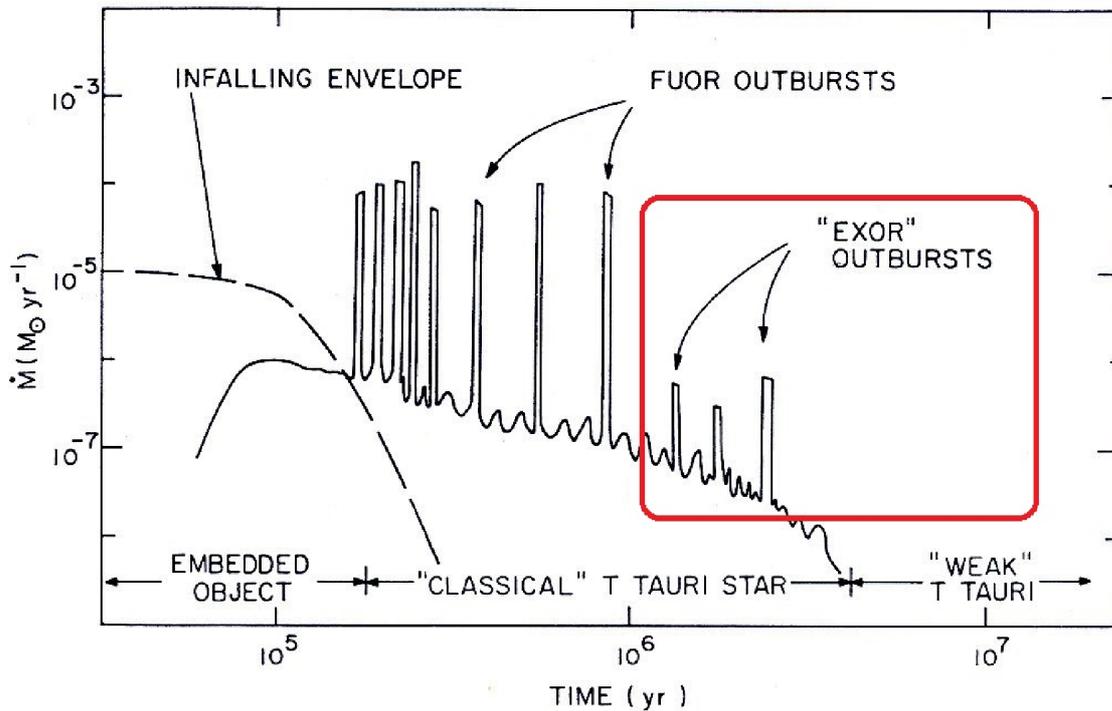


Figura 7: Illustrazione schematica della variazione del tasso di accrescimento nel corso del tempo per una stella giovane. Gli eventi EXor sono inquadri in rosso.

4.1 Fotometria

I dati fotometrici nell'ottico (UBVRI) e nel vicino infrarosso (JHK) sono largamente usati per costruire:

- **Curve di luce di sorgenti singole EXor.** Questi grafici illustrano le differenti fasi del processo di outburst: *i)* durata e ricorrenza degli eventi, evidenziando talvolta come l'aumento del flusso è tipicamente più rapido della successiva diminuzione; *ii)* l'apparizione di picchi, attribuibili a macchie calde/fredde sulla superficie della stella; *iii)* la forma delle variazioni di flusso che permettono di distinguere tra EXor autentiche e UXor; *iv)* indizi di qualche ritardo temporale tra curve di luce in differenti bande mostrato da due EXor che, se confermato da future osservazioni, indica che la risposta della materia emittente è regolata da una proprietà comune (ad es. capacità termica dei grani); *v)* variabilità su piccola scala collegata a qualche periodicità, come un oscuramento intermittente dovuto a effetti geometrici.
- **Distribuzioni Spettrali di Energia (SEDs).** Data la natura intrinseca di un sistema EXor (composto tipicamente da una stella visibile e dal suo disco di accrescimento), la fotometria ottica e nel vicino infrarosso forma una parte importante delle loro SED. Molto spesso, le SED in quiescenza e in outburst sono presentate assieme per valutare le differenze tra i due stati: L_{bol} cresce tipicamente da 1-2 (o anche valori frazionari) a decine di L_{\odot} (ad es. il caso di V2493 Cyg in Figura 8). Anche la forma della SED cambia, diventando più blu quando la sorgente aumenta la sua luminosità. La SED differenziale tra l'outburst e la quiescenza può

essere efficacemente descritta da una singola componente di corpo nero con temperature che variano da 1000 K a 4500 K e raggi di emissione da 0.01 a 0.1 AU, come se, durante la fase di outburst, appaia una componente termica addizionale.

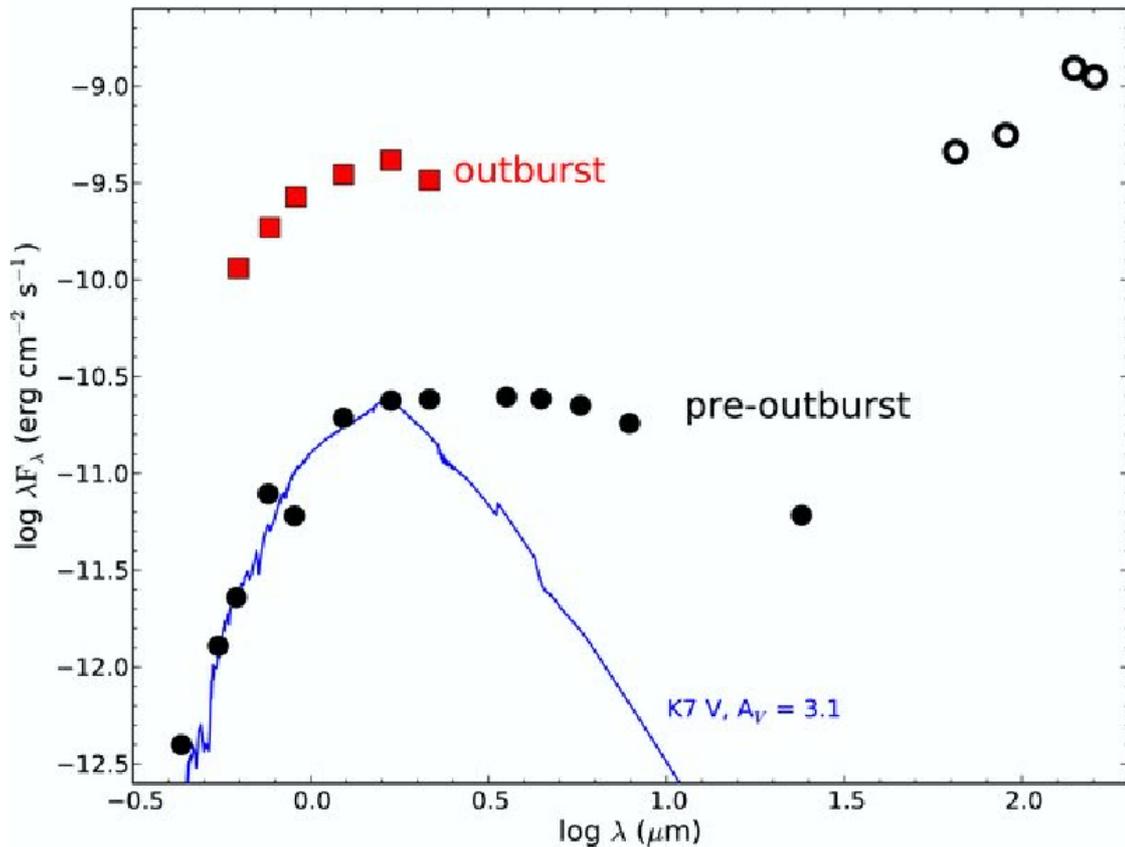


Figura 8: SED di HBC 722 (=V2493 Cyg) prima e durante l'outburst

- **Diagrammi colore-colore e colore-magnitudine** sono strumenti attendibili e largamente utilizzati per valutare il(i) meccanismo(i) responsabile(i) dell'evoluzione della SED. I diagrammi nell'ottico e nel vicino infrarosso mostrano entrambi che tutte le EXor (classiche e candidate tali) sono più blu quando sono più luminose, indicando verosimilmente che prevale durante le fasi attive una componente stellare più calda, mentre il disco più freddo domina la fase quiescente (Figura 9).

–

4.2 Spettroscopia

Durante il nostro programma di monitoraggio abbiamo raccolto un grande database di spettri a bassa ($R \leq 2000$) e alta ($R \geq 10000$) risoluzione (sia nell'ottico che nel vicino infrarosso) che ha permesso un pieno confronto tra le fasi pre-outburst, outburst, post-outburst. Ecco una descrizione più dettagliata dell'informazione che può essere ottenuta dagli spettri ottico e nel vicino infrarosso:

- **Spettroscopia ottica.** Gli spettri delle EXor sono ricchi di righe di atomi e ioni di materiale gassoso che sta cadendo sulla stella centrale lungo le linee del campo magnetico. Durante

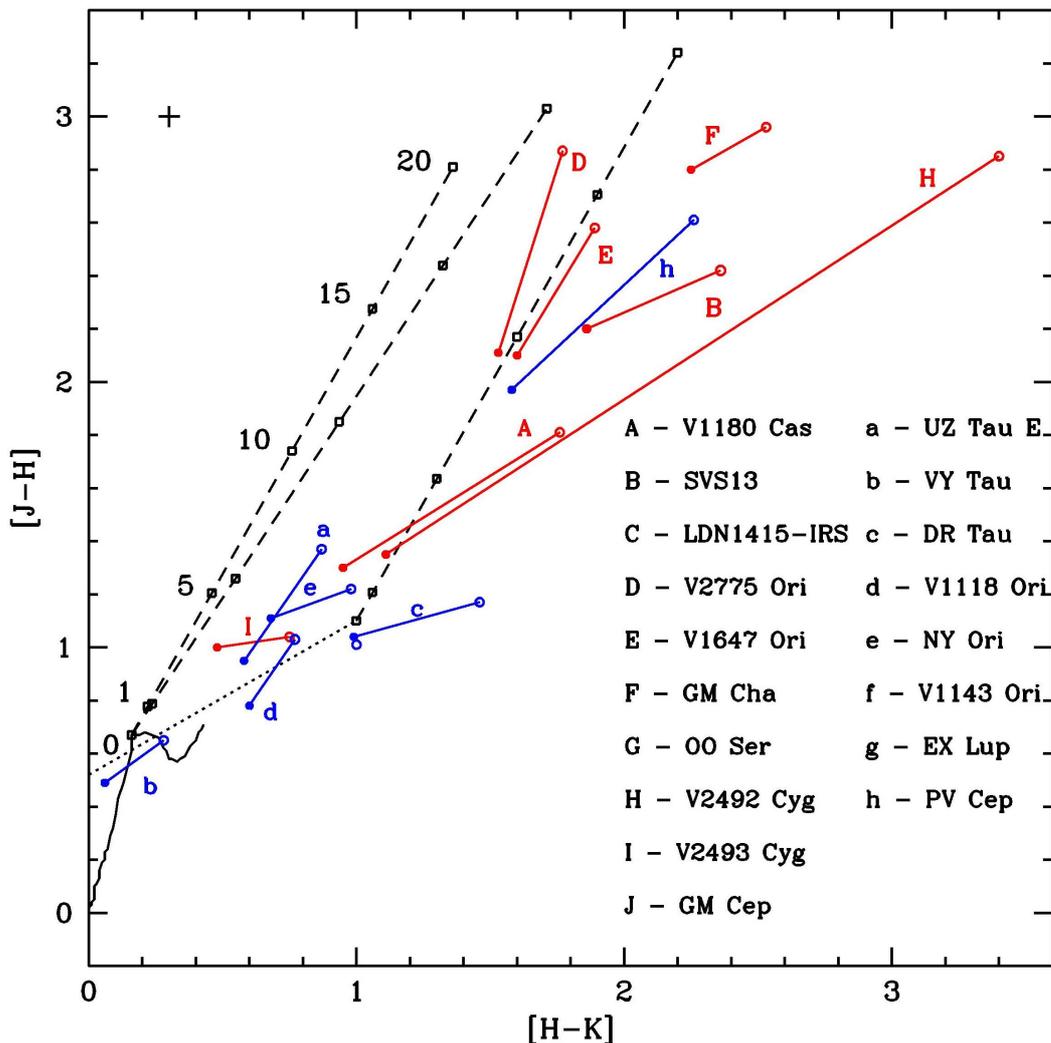


Figura 9: Diagramma a due colori nel vicino infrarosso di una EXor classica (blu) e nuove candidate (rosso) in due epoche differenti. La linea nera continua (angolo in basso a sinistra) indica la sequenza principale non arrossata, mentre la linea nera punteggiata è il luogo delle stelle T Tauri. Le linee tratteggiate rappresentano due leggi di arrossamento. I cerchi chiusi (aperti) identificano i colori in outburst (quiescenza).

l'outburst, il numero di righe di emissione aumenta decisamente (per lo più FeI, FeII, CaI, righe della serie di Balmer di HI) come pure temperatura e densità. Di conseguenza, l'intensità delle righe aumenta rispetto alla fase di quiescenza e può essere utilizzata come un tramite per stimare il tasso di accrescimento di massa (Figura 10). Quest'ultimo parametro varia da 10^{-10} - $10^{-8} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ in quiescenza a 10^{-8} - $10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ in outburst. Mentre durante l'outburst queste righe presentano profili larghi, che suggeriscono che il gas si muove a velocità dell'ordine di 100 km/s, durante la quiescenza esse hanno profili stretti, suggerendo una loro origine nella cromosfera stellare.

I profili delle righe indicano la presenza di flussi di espulsione e accrescimento (profili P-Cyg) a velocità fino a centinaia di km/s. Correlazioni accurate fra segni distintivi di accrescimento ed espulsione, investigati a risoluzione spettrale elevata, sono fondamentali per accertare relazioni quantitative tra entrambi i fenomeni. L'emissione di righe proibite (come [OI], [SII], [FeII]) viene spesso rivelata in corrispondenza alla posizione del continuo della sorgente e in alcuni casi anche in posizione spostata da essa. Queste righe mostrano profili spostati verso il blu e localizzano le

zone d'urto del gas accelerato dal vento della protostella e i getti, i quali sono normalmente dei prodotti collaterali al processo di accrescimento.

- **Spettroscopia nel vicino infrarosso.** In questa banda spettrale si trovano le righe di ricombinazione delle serie di Paschen e Brackett dell'HI, le quali rappresentano un metodo di indagine complementare a quelle delle serie di Balmer per investigare la variabilità del tasso di accrescimento di massa, specialmente per sorgenti EXor molto oscurate. La riga dell'HeI a $1.08 \mu\text{m}$ fornisce evidenza per un vento associato all'outburst, mostrando un forte assorbimento spostato verso il blu fino a circa 300 km/s . Per quanto riguarda le righe molecolari, sono caratteristiche spesso ricorrenti la transizione dell' H_2 a $2.12 \mu\text{m}$ e quella del CO a 2.29 e $2.32 \mu\text{m}$ rispettivamente. La prima riga (in emissione) traccia le regioni con onde d'urto vicino alla stella ed emesse come conseguenza di un evento di accrescimento. Il CO è presente negli spettri EXor sia in assorbimento che in emissione: si pensa sia originata nella parte più interna del disco di gas,

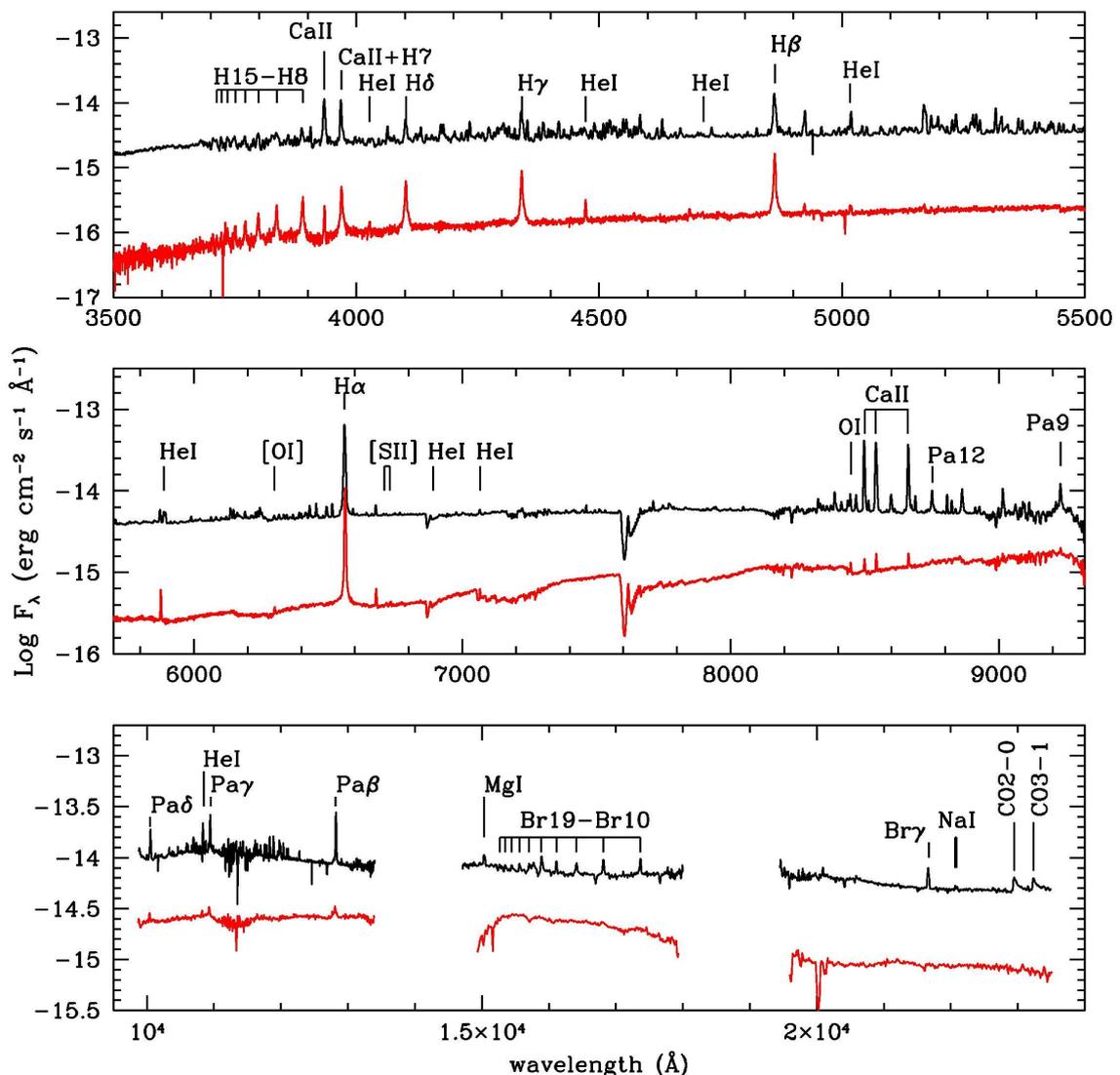


Figura 10: Spettro ottico (LBT/MODS) e nel vicino infrarosso (LBT/LUCIFER) di V1118 Ori in outburst (nero) in confronto con lo spettro in quiescenza (rosso)

dove localizza zone relativamente calde (essendo il CO completamente dissociato a ~ 4000 K) a densità elevate ($>10^7$ cm⁻³). Quando l'outburst evolve verso la quiescenza, lo spettro mostra nell'ordine forte emissione del CO, assenza, e, in ultimo, assorbimento del CO.

5 Prospettive future

Nelle precedenti sezioni sono stati menzionati interrogativi aperti e prospettive osservative, qui sono elencati alcuni punti ulteriori che potrebbero essere indirizzati in un prossimo futuro.

- I monitoraggi a grande campo di una porzione consistente di regioni di formazione stellare note sono fondamentali per ingrandire il campione delle EXor. Sotto questo aspetto, l'imminente tecnologia LSST grazie alle sue specifiche capacità (cadenza di monitoraggio, sensibilità, largo campo, risoluzione spaziale), offrirà un nuovo paradigma concettuale per investigare su base statistica il fenomeno dell'accrescimento episodico e sulle sue implicazioni sull'intero processo di formazione stellare.
- Sono stati proposti di recente modelli di dischi di accrescimento magnetizzati: ALMA fornirà misure dirette di campi magnetici e della loro morfologia su scale di distanza dell'ordine di quelle del disco.
- Le EXor sono troppo deboli per l'attuale sensibilità delle tecnologie interferometriche, ma verrà utilizzata una strumentazione evoluta (p. es. *LINC-NIRVANA* all'*LBT*) combinata con algoritmi di deconvoluzione di immagini ad alto contrasto, già sviluppata, per recuperare informazione sulla morfologia del disco e sulla presenza di compagni a piccola distanza.
- Parecchi processi, come cristallizzazione, estinzione da polvere, perdita di massa, non sono meramente concomitanti con l'accrescimento di materia, ma intimamente correlati ad esso, perciò sono essenziali studi avanzati su questi argomenti per raggiungere una visione consistente dei parametri chiave delle EXor.

6 Pubblicazioni ANS sugli oggetti di pre-Sequenza Principale nel periodo 2009-2017

- (2017) T. Giannini, U. Munari, S. Antonucci, D. Lorenzetti, A.A. Arkharov, S. Dallaporta, A. Rossi, G. Traven
The 2016-2017 peak luminosity of the pre-main sequence variable V2492 Cyg
A&A, in press (arXiv:171008151)
- (2017) T. Giannini, S. Antonucci, D. Lorenzetti, U. Munari, G. Li Causi, C. F. Manara, B. Nisini, A. A. Arkharov, S. Dallaporta, A. Di Paola, A. Giunta, A. Harutyunyan, S.A. Klimanov, A. Marchetti, G.L. Righetti, A. Rossi, F. Strafella, V. Testa
The 2015-2016 outburst of the classical EXor V1118 Ori
ApJ 839, 112
- (2017) Munari U., G. Traven, S. Dallaporta, D. Lorenzetti, T. Giannini, S. Antonucci
High resolution spectroscopy of the young eruptive star V2492 Cyg currently peaking at record brightness
ATel 10183
- (2017) Jurdana-epi, R.; Munari, U.; Antonucci, S.; Giannini, T.; Li Causi, G.; Lorenzetti, D.
Investigating the past history of EXors: the cases of V1118 Orionis, V1143 Orionis, and NY Orionis
A&A 602, A99
- (2016) Jurdana-epi, Rajka; Munari, Ulisse
The past photometric history of the FU Ori-type young eruptive star 2MASS J06593158-0405277 = V960 Mon
NewA 43, 87
- (2012) Semkov, E. H.; Peneva, S. P.; Munari, U.; Tsvetkov, M. K.; Jurdana-epi, R.; de Miguel, E.; Schwartz, R. D.; Dimitrov, D. P.; Kjurkchieva, D. P.; Radeva, V. S.
Optical photometric and spectral study of the new FU Orionis object V2493 Cygni=HBC 722
A&A 542, A43
- (2010) Semkov, E.H., Peneva, S.P., Munari, U., Milani, A., Valisa, P.
The large amplitude outburst of the young star HBC 722 in NGC 7000/IC 5070, a new FU Orionis candidate
A&A 523, L3
- (2010) Munari, U., Valisa, P., Dallaporta, S., Itagaki, K.
A New Variable Star in Cygnus
CBET 2428

(2010) Munari, U., Milani, A., Valisa, P., Semkov, E.
Spectroscopic confirmation of HBC 722 as a new FU Orionis star in NGC 7000
ATel 2808

(2009) Munari, U., Siviero, A., Ochner, P., Fiorucci, M., Dallaporta, S.
V582 Aurigae
CBET 1898