

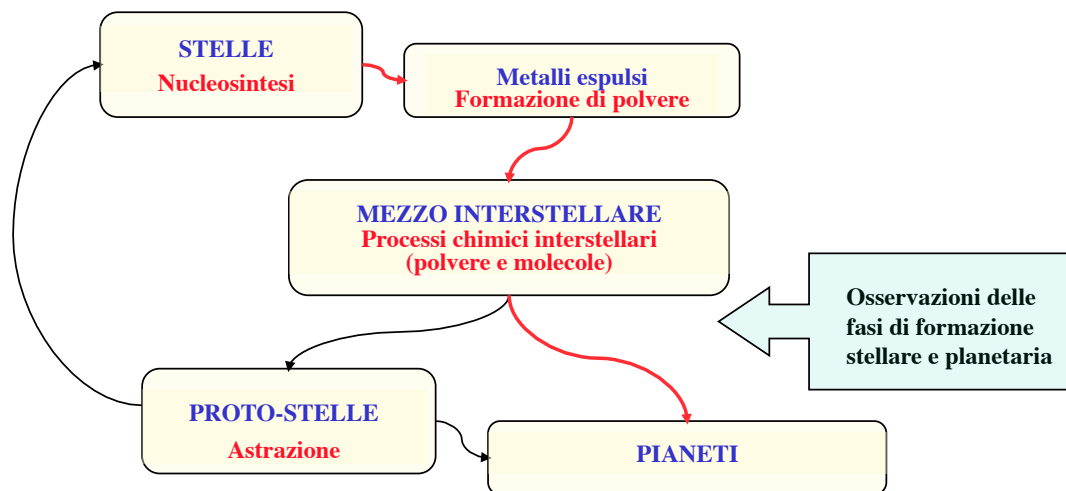
Evidenze osservative delle fasi di formazione stellare e planetaria

Lezione SP 7
G. Vladilo

Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

1

Dal mezzo interstellare alle stelle e pianeti



Formazione stellare e planetaria

- Il processo di formazione planetaria è indissolubilmente legato a quello della formazione stellare
 - In questo capitolo passiamo rapidamente in rassegna alcuni tipi di osservazioni astronomiche che gettano luce sulle varie fasi del processo di formazione stellare, allo scopo di avere un quadro di riferimento per lo studio della formazione planetaria
- Evidenze osservative
 - Fasi precedenti alla formazione stellare
 - “Cores” densi di nubi molecolari
 - Prime fasi di formazione
 - “Outflows” e getti molecolari
 - Oggetti stellari giovani
 - Stelle T Tauri
 - Dischi circumstellari

Fasi precedenti la formazione stellare

“Cores” densi di nubi molecolari

- Le più semplici configurazioni di gas molecolare denso da cui si avvia il processo di formazione stellare si trovano
 - all’interno di grandi complessi di nubi molecolari
 - oppure come cores densi isolati (noti come globuli di Bok)
- I cores molecolari densi si presentano in due forme:
 - Cores privi di stelle
 - Oggetti protostellari
- Lo studio della loro struttura e proprietà fisiche è fondamentale per capire il processo di formazione stellare
 - Tale tipo di studi è diventato possibile grazie ai progressi nelle tecniche osservative avvenuti nell’ultima quindicina di anni
- L’avvento di arrays di camere infrarosse di grande formato ha aperto una nuova finestra sugli studi di nubi molecolari
 - Possibile studiare un notevole intervallo di valori di estinzione ($0.3 < A_V < 40$ mag) e densità colonnare ($6 \times 10^{20} < N_H < 10^{23} \text{ cm}^{-2}$)

Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

5

Strutture di globuli privi di stelle

Lada et al. (2007; PPV)

- **Tecniche osservative**
 - Conteggi stellari
 - Eccessi di colore nel vicino IR

Bande H ($1.65 \mu\text{m}$) e K ($2.2 \mu\text{m}$)

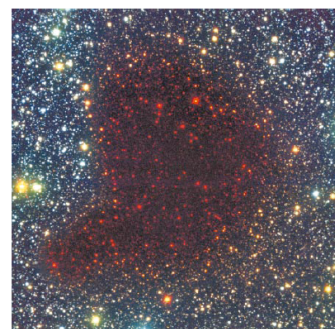
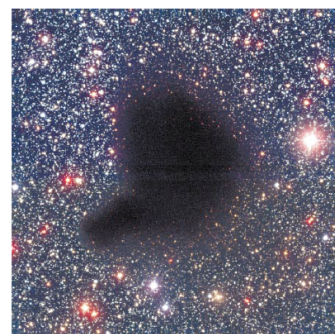
- **Esempio di osservazioni**

Figure a destra: immagine del globulo Barnard 68 ottenuta all’ESO nel visibile (in alto) e nell’infrarosso (in basso); la nube è completamente opaca nel visibile e relativamente trasparente nell’infrarosso a causa della dipendenza dell’estinzione dalla lunghezza d’onda

Alves et al. (2001)

- **Studio della struttura**

- Si costruisce una mappa dei valori di estinzione in funzione della posizione
- Si costruisce un profilo radiale di estinzione facendo una media azimutale della mappa bidimensionale



Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

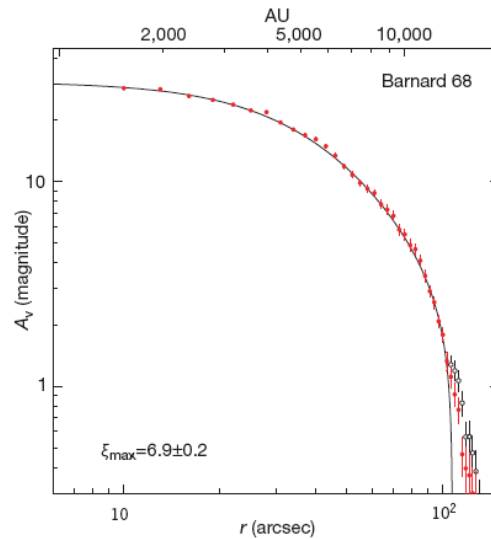
6

Strutture di globuli privi di stelle

- **Struttura del core di B68**

Alves et al. (2001)

- Il profilo radiale di estinzione fitta bene una “sfera di Bonnor-Ebert”
Sfera isoterma di gas all’interno della quale la pressione interna bilancia esattamente la spinta di autogravità e la pressione sulla superficie esterna
 - Dimostrazione che non si tratta di un fenomeno transiente, ma di una situazione di equilibrio
- **Risultati simili trovati per altri globuli privi di stelle e cores molecolari**
 - Tali configurazioni di equilibrio probabilmente rappresentano le condizioni iniziali prima della formazione stellare in cores densi



Prime fasi di formazione stellare

“Outflows” e getti molecolari

- Fuoriuscite di gas (“outflows”) da oggetti stellari giovani sono una delle manifestazioni di formazione stellare più facili da osservare

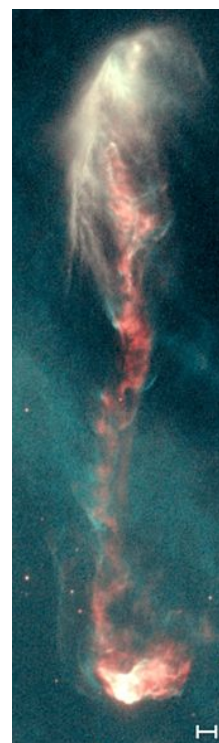
- I primi esempi, associati agli oggetti Herbig-Haro (HH), furono scoperti alla metà del secolo scorso

Nebulose peculiari situate nella vicinanza di nubi oscure in regioni di recente formazione stellare

Negli anni ‘70 si trovarono nei loro spettri evidenze di onde d’urto collisionali

Negli anni ‘80 si trovò che alcuni degli oggetti HH tracciavano getti bipolari molto collimati con grandi valori di moto proprio

Herbig Haro object HH47, immagine HST
La barra sovrapposta rappresenta 1000 AU



Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

9

“Outflows” e getti molecolari

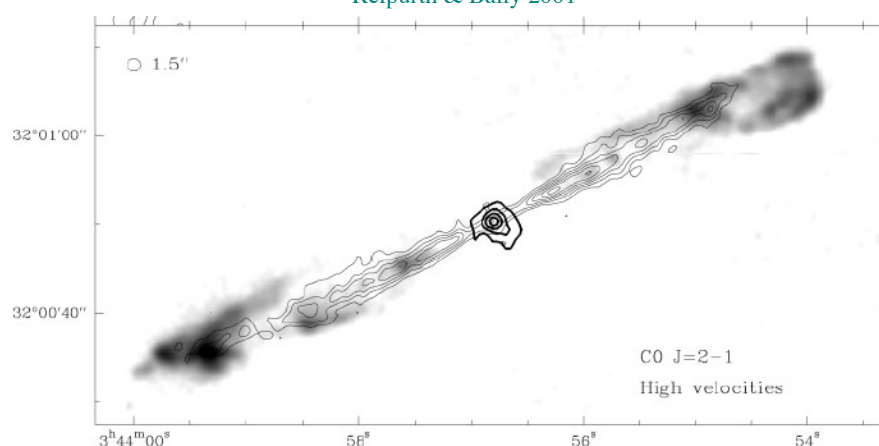
- Varie manifestazioni di attività di fuoriuscita di gas furono quindi trovate in stelle giovani

Ad esempio profili P-Cygni, indicativi di potenti venti stellari; getti molecolari bipolari osservati nelle emissioni millimetriche di CO; emissioni OH e H₂O di alta velocità

- Negli anni ‘80 getti bipolari furono scoperti anche nel continuo radio centimetrico attorno ad oggetti stellari giovani (YSO: “young stellar objects”)

Principalmente di origine termica, continuo emesso da radiazione free-free

Reipurth & Bally 2001



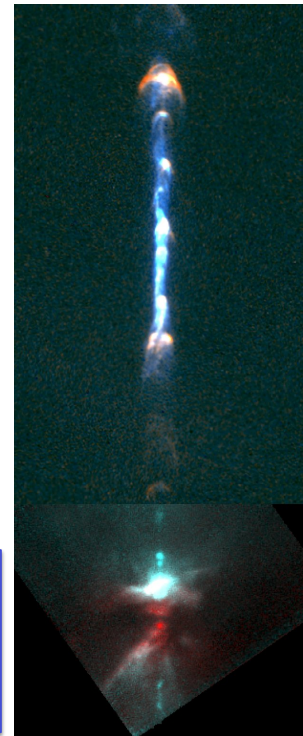
Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

10

“Outflows” e getti molecolari

- **Principali proprietà osservative**
 - Velocità dei getti
 - Sono dell'ordine di ~ 50 km/s, ma la velocità dipende dalla lunghezza d'onda
 - Getti primari ad alta velocità si osservano nelle bande spettrali più energetiche (ad es. nella banda X)
 - Flussi secondari di minor velocità sono osservati nelle bande spettrali di minor energia
 - Evoluzione
 - Le densità e la perdita di massa tendono a diminuire con il tempo
 - La velocità dei getti tende invece ad aumentare
 - Dimensioni
 - $\sim 10^4$ AU
 - Oggetti stellari associati
 - Spesso non si riescono a osservare nel visibile
 - In alcuni casi trovate stelle T Tauri

Esempio in figura: oggetto HH111. Getto associato con stelle giovani di bassa massa. Sovrapposizione di immagini HST nel visibile (in alto) e nell'infrarosso (in basso). La sorgente del getto è profondamente immersa in una nube molecolare e non può essere osservata nel visibile.



Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

11

“Outflows” e getti molecolari

- **L'insieme delle osservazioni, assieme a considerazioni teoriche, indicano che i getti ricavano la loro energia da stelle nelle prime fasi di formazione**
 - L'esistenza dei getti non era stata predetta da alcuna teoria di formazione stellare
 - Si ritiene tuttavia che la produzione di tali flussi di gas costituisca un aspetto fondamentale del processo di formazione stellare
 - Flussi di gas collimato si hanno in altri sistemi astrofisici in cui interagiscono processi di accrescimento, rotazione e campi magnetici
 - Il gran numero di getti osservati in oggetti stellari giovani, mediante diversi tipi di indicatori, ci permette di studiare la fisica di questi sistemi, affinando la nostra comprensione di analoghi sistemi astrofisici situati a maggiori distanze (come i nuclei galattici attivi)
- **Punti aperti**
 - Sorgente di energia
 - L'oggetto stellare, la sua magnetosfera, un disco circumstellare? Una loro combinazione?
 - Meccanismo di collimazione dei venti
 - Getti confinati dalla presenza di un disco?
 - Durata del meccanismo di produzione di getti

Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

12

Oggetti stellari giovani

Restringiamo la nostra attenzione su stelle di tipo solare, $M_* \sim 0.2 - 2 M_\odot$
Non consideriamo stelle massicce OB e stelle di massa intermedia Ae/Be

Stelle T Tauri

- **Stelle T Tauri**

- Gli spettri nel visibile indicano che si tratta di stelle di tipo spettrale avanzato con varie caratteristiche peculiari

Righe in emissione ($H\alpha$, CaII H & K...) indicative di attività di tipo cromosferico

Profili di righe indicativi di flussi di gas

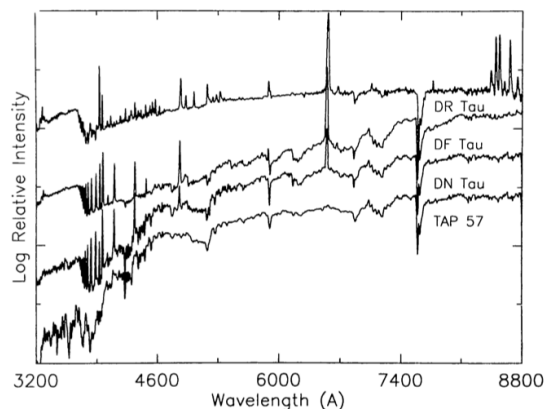
Alti valori di velocità di rotazione $v \sin i$

Righe di Li forti

Indicatori di età giovane

- Si trovano in regioni di formazione stellare

Sono talvolta associate con getti di gas e con oggetti HH



Bertout (1989)

Stelle T Tauri

- L'osservazione in altre bande spettrali confermano che si tratta di oggetti peculiari
 - Hanno emissione nella banda X
Indicativa della presenza di gas a temperature coronali
 - Mostrano eccessi infrarossi (1-10 μm)
Indicativo della presenza di un disco di polveri circumstellare
- Vengono suddivise in
 - T Tauri classiche
Forte riga in emissione di $\text{H}\alpha$
Mostrano eccesso infrarosso (1-10 μm)
 - T Tauri a righe deboli
Scoperte nei raggi X
Riga in emissione di $\text{H}\alpha$ debole
Non mostrano eccesso infrarosso

Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

15

Stelle T Tauri

- La posizione delle stelle T Tauri nel diagramma HR conferma che si tratta di oggetti molto giovani
 - Sovraluminose rispetto alle stelle di sequenza principale dello stesso tipo spettrale
 - In accordo con gli alti valori di velocità di rotazione e l'intensità delle righe di LiI
 - Si trovano generalmente nella fase di pre-sequenza principale

Figura: diagramma HR di stelle T Tauri

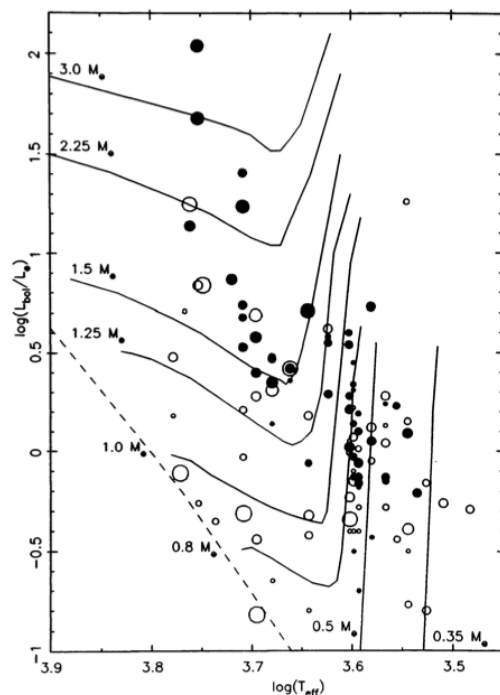
Cerchi pieni: T Tauri classiche

Cerchi vuoti: T Tauri "weak-lines"

Le dimensioni dei simboli sono proporzionali alla velocità di rotazione della stella, $v \sin i$

Linee continue: tracce evolutive di pre-sequenza principale per stelle di diversa massa

Linea tratteggiata: sequenza principale di età zero



Bertout (1989)

Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

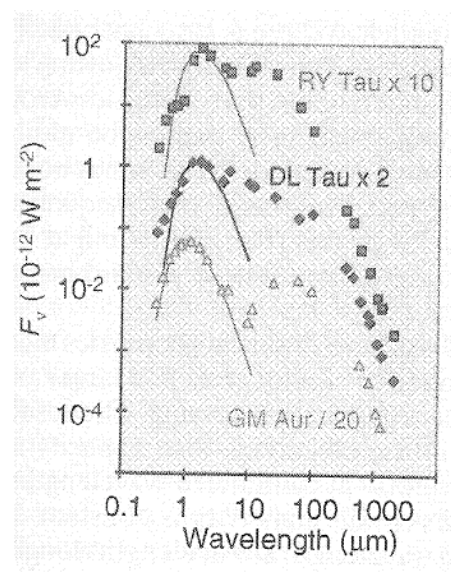
16

Dischi circumstellari

Bibliografia: Beckwith & Sargent (1996)

Eccessi infrarossi

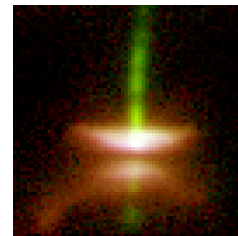
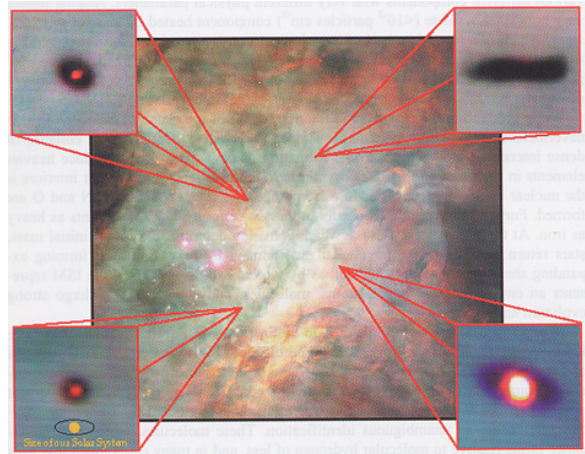
- Negli ultimi 15 anni si è accumulata evidenza osservativa che la maggior parte delle stelle nasce con dischi circumstellari
- **I dischi circumstellari sono stati inizialmente rivelati in maniera indiretta, mediante il loro eccesso infrarosso**
 - Eccesso rispetto all'emissione di corpo nero corrispondente alla temperatura effettiva della stella
 - L'eccesso infrarosso è interpretato come emissione termica di polvere circumstellare
 - Nell'infrarosso l'emissione è vari ordini di grandezza più intensa dell'emissione stellare
 - Nonostante la polvere rappresenti circa solo l'1% della massa nei dischi (il resto è in fase gassosa) essa emette la quasi totalità della radiazione
 - La polvere emette su di un ampio intervallo spettrale, tra $\sim 2\mu\text{m}$ e $\sim 1\text{ mm}$, come risultato di un'ampia variazione di temperatura nel disco circumstellare
 - Da $T \sim 1000\text{ K}$, in prossimità della stella, a $T \sim 30\text{ K}$, nei bordi esterni del disco a centinaia di AU dalla stella



Dischi circumstellari

- Le immagini ad alta risoluzione spaziale hanno successivamente dimostrato che l'eccesso infrarosso è dovuto alla presenza di dischi di polvere circumstellare

- Dimensioni
Comparabili a quelle del Sistema Solare
- Caratteristiche geometriche
Dischi piani, sottili nelle regioni interne (< 50 AU), si allargano gradualmente nelle parti esterne e hanno i bordi troncati



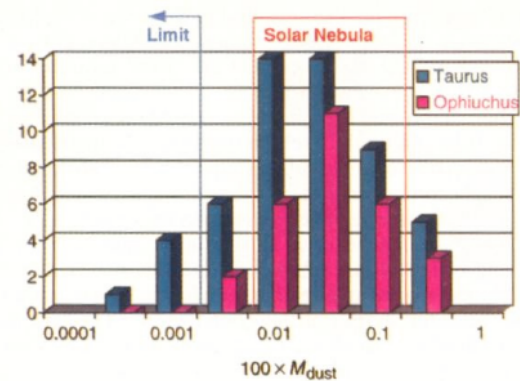
Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

19

Dischi circumstellari

• Masse dei dischi

- Massa in polvere $\sim 10^{-4} - 10^{-3} M_{\odot}$
Sufficiente a produrre circa 10 volte più pianeti di quelli del Sistema Solare
Le masse della polvere sono misurate dall'eccesso infrarosso
- Massa totale $\sim 0.01 - 0.1 M_{\odot}$
Consistente con le stime di massa della nebulosa da cui ha avuto origine il Sistema Solare
La massa totale è stimata indirettamente assumendo un rapporto gas/polvere ~ 100



- Figura: distribuzione delle masse dei dischi confrontata con la massa della nebulosa solare
Beckwith & Sargent (1996)

Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

20

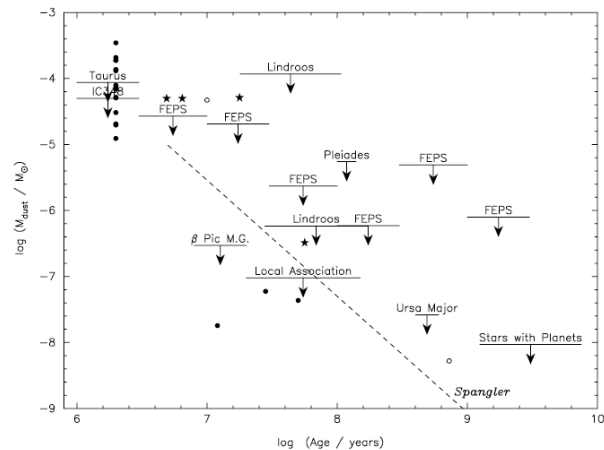
Dischi circumstellari

- **Evoluzione della massa in polvere circumstellare**

- Per studiare l'evoluzione della massa di polvere circumstellare, la si misura in stelle di diverse età
- Si trova che la massa in polvere diminuisce con il tempo
 - La componente solida si consuma nel tempo
- Andamento consistente con un'ipotesi di coagulazione/accrescimento della componente solida in oggetti protoplanetari o planetari

Non si possono escludere a priori altre cause: sublimazione della polvere, accrescimento sulla stella

Carpenter et al. (2005)



Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

21

Dischi protoplanetari

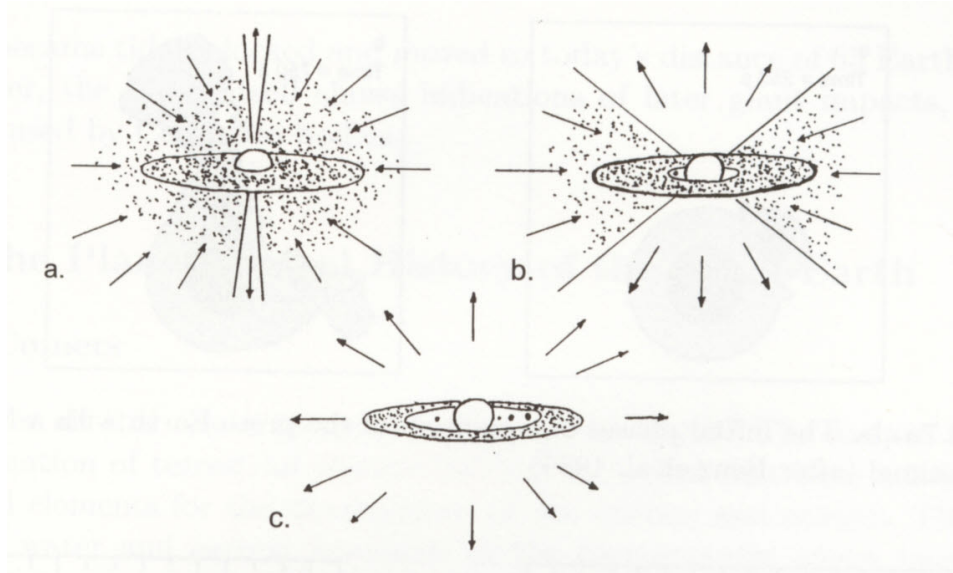
- **Conclusione**

- L'evidenza osservativa è consistente con l'ipotesi che la componente solida presente nei dischi circumstellari costituisca il materiale da cui ha origine la formazione planetaria
- Per tale motivo i dischi circumstellari vengono anche chiamati dischi protoplanetari

Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

22

Classificazione degli oggetti protostellari



Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

23

Classificazione di oggetti protostellari

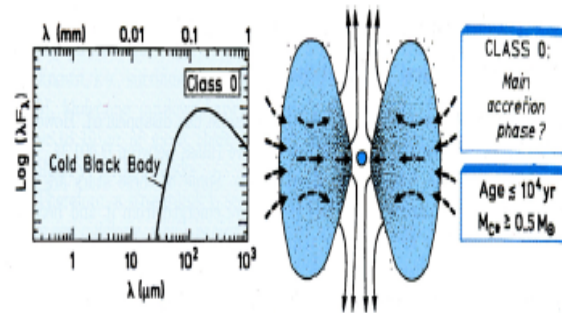
- **Gli oggetti protostellari vengono classificati in quattro classi**
 - Classe 0, I, II e III
 - Con una transizione graduale da una classe all'altra
 - La classificazione è principalmente basata sulle caratteristiche dell'emissione spettrale nell'intervallo spettrale tra $\sim 1 \mu\text{m}$ e $\sim 1\text{mm}$
- **La classificazione viene intesa in termini evolutivi**
 - Rappresentativa delle prime fasi evolutive di stelle di tipo solare
- **Costituisce un importante quadro di riferimento per**
 - la comprensione dei processi di formazione planetaria
 - una visione unificata per un'interpretazione evolutiva delle evidenze osservative sopra accennate (getti collimati, stelle T Tau, eccessi infrarossi, dischi...)

Astronomia Osservativa C, SP 7, 2011

24

Classificazione di oggetti protostellari

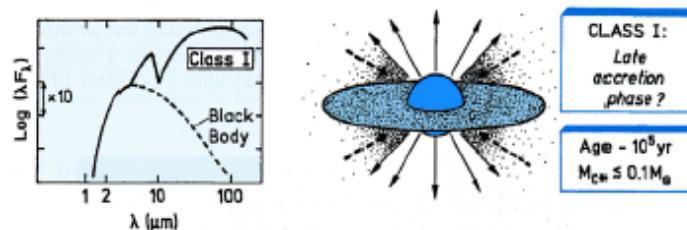
Classe 0: protostelle giovani



Classe 0 - Protostella Giovane: comincia a formarsi un disco centrale di raggio fra le 200 e 300 UA. Il tasso di accrescimento della protostella è di $10^{-5} - 10^{-6} M_{\text{Sol}}$. La polvere nell'involucro in collasso è troppo fredda (~ 30 K) anche per irraggiare nell'IR. Solo la sua emissione nel millimetrico può essere rivelata. Il raggio dell'involucro in collasso è dell'ordine di $10^3 - 10^4$ UA. Questa fase dura circa 10^4 anni. Genera un intenso getto collimato.

Classificazione di oggetti protostellari

Classe I: protostelle evolute

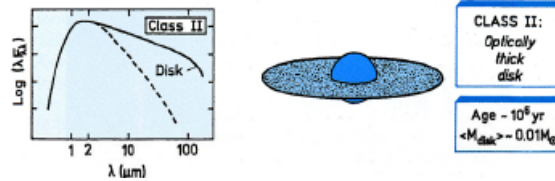


Classe I – Protostella evoluta: l'involucro, sia pure tenue, esiste ancora ed emette intensamente nell'IR. L'accrescimento prosegue alimentato un disco di accrescimento di alcune centinaia di UA di raggio. Questa fase dura circa 10^5 anni.

Getti molecolari sono ancora presenti, ma meno focalizzati.

Classificazione di oggetti protostellari

Classe II: stelle T Tauri classiche

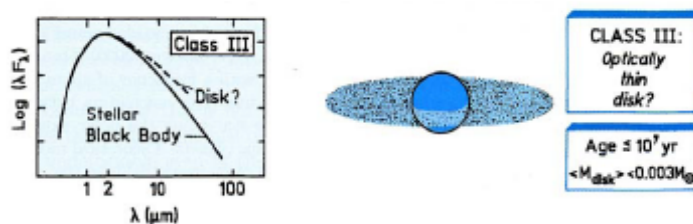


Classe II - T Tauri La fase protostellare è finita, l'involucro è scomparso. La Protostella è diventata una classica T-Tauri.

Le stelle T Tauri hanno masse e temperature simili a quelle del Sole, ma sono molto più luminose. Ruotano velocemente su se stesse, tipicamente in pochi giorni (invece che in un mese come il Sole), e sono molto attive e variabili. Ci sono evidenze di estese macchie solari sulla loro superficie, ed hanno emissioni di raggi X e radio intense e variabili, circa 1000 volte superiori a quelle del Sole. Molte hanno venti stellari estremamente potenti. Alcune di loro sono ancora immerse nella nube progenitrice. I getti molecolari diminuiscono fino a sparire.

Classificazione di oggetti protostellari

Classe III: stelle T Tauri a righe deboli



Classe III - T Tauri con deboli righe di emissione: il disco circumstellare è sparito. L'evento deve verificarsi in tempi brevi (in meno di 10^5 anni) Questa fase dura da 10^6 a 10^7 anni.

Getti molecolari completamente spariti.

- La classificazione degli oggetti protostellari ci fa capire come il fenomeno dei getti sia collegato a quello dei dischi circumstellari

– “Paradosso” della formazione stellare:

per poter accrescere massa, la stella deve perdere massa

Si stima che circa il 10% della massa ottenuta per accrescimento dal disco sia espulsa mediante i getti

- Per spiegare i processi in gioco si invocano modelli magnetoidrodinamici (MHD) nei quali i campi magnetici giocano un ruolo importante nel trasferire lungo l’asse di rotazione stellare parte del materiale accresciuto dal disco

La sorgente di energia sarebbe la forza centrifuga risultante dalla rotazione

La formazione planetaria nel contesto della formazione stellare:
evoluzione nel diagramma HR

Beckwith & Sargent (1996)

