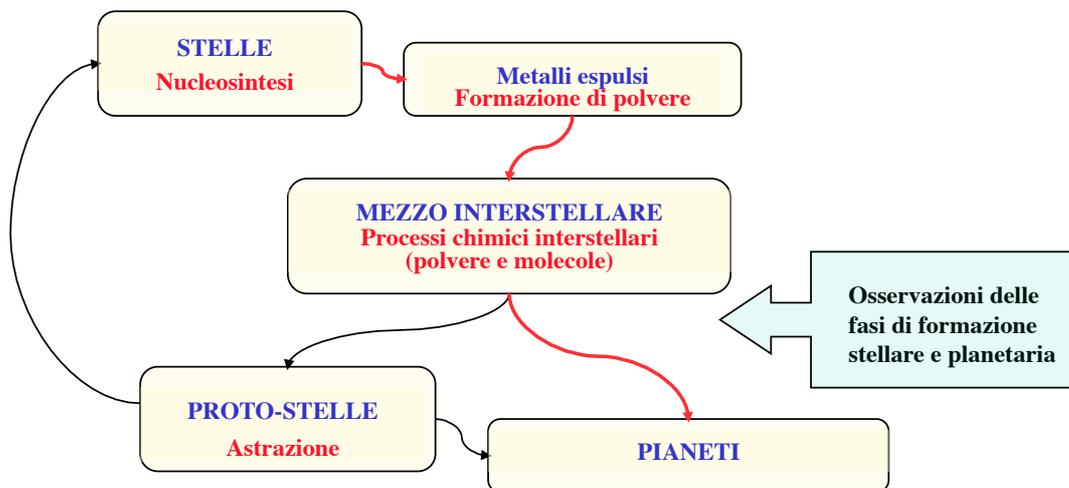


# Evidenze osservative delle fasi di formazione stellare e planetaria

planform1  
G. Vladilo

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
  - 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

3

## Fasi precedenti la formazione stellare

4

## “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 negli ultimi decenni
- 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 ( $6 \times 10^{20} < N_H < 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ )

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  $\mu\text{m}$ )

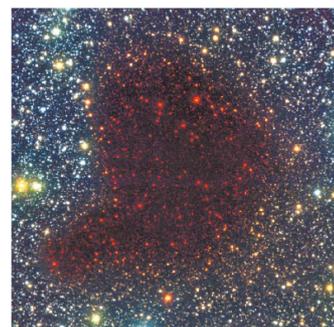
- **Esempio di osservazioni**

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



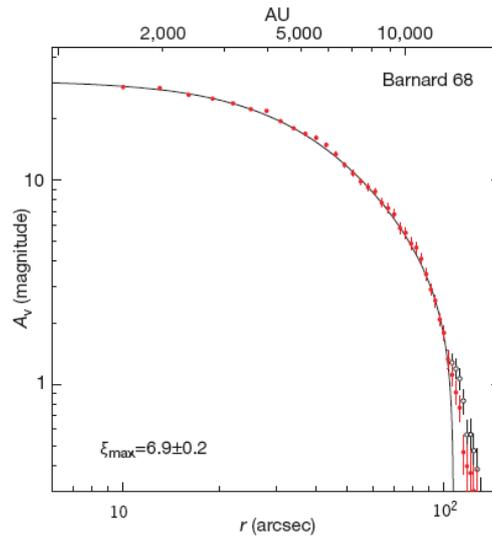
6

## 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



7

## Prime fasi di formazione stellare

8

## “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 novecento

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



9

## “Outflows” e getti molecolari

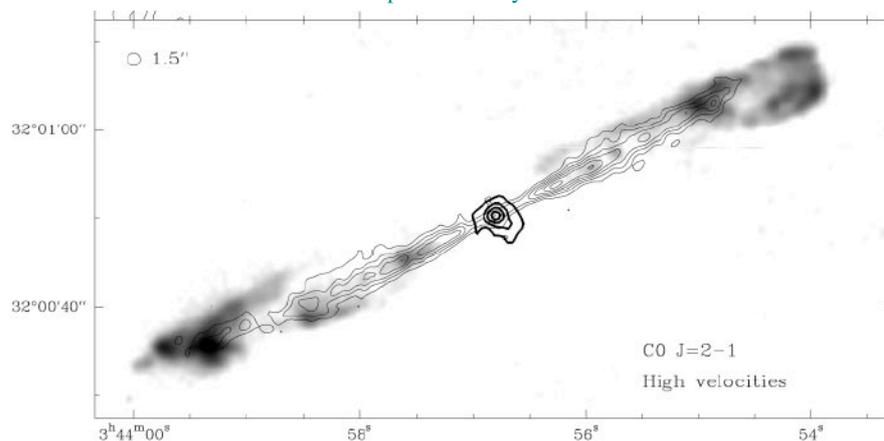
– Varie manifestazioni di attività di fuoriuscita di gas furono quindi trovate in stelle giovani

Ad esempio profili P-Cygni, indicativi di potenti venti stellari; getti molecolari bipolari osservati nelle emissioni millimetriche di CO; emissioni OH e H<sub>2</sub>O 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

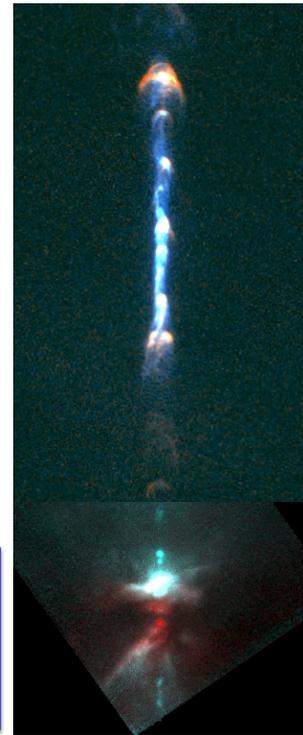


10

## “Outflows” e getti molecolari

- **Principali proprietà osservative**
  - **Velocità dei getti**
    - Dell’ordine di  $\sim 50$  km/s, ma 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 tende 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.



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
  - Meccanismo di collimazione dei venti
  - Durata del meccanismo di produzione di getti

12

## Oggetti stellari giovani

Prendiamo in considerazione stelle di tipo solare,  $M_* \sim 0.2 - 2 M_\odot$

Esistono fenomeni analoghi anche per stelle massicce OB e stelle di massa intermedia Ae/Be

13

## 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

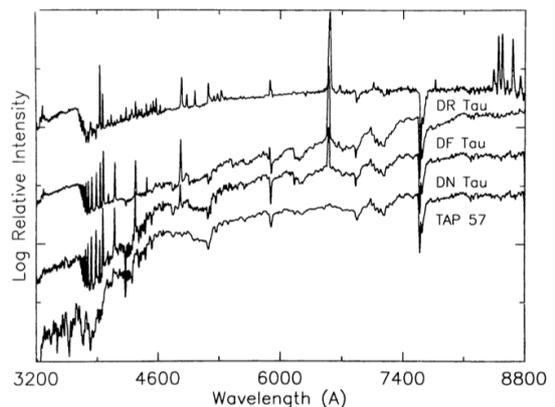
- Alti valori di velocità di rotazione  $v \sin i$

- 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)

14

## 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  $\mu\text{m}$ )
    - Indicativo della presenza di un disco di polveri circumstellare
- Vengono suddivise in
  - T Tauri classiche
    - Forte riga in emissione di  $H\alpha$
    - Mostrano eccesso infrarosso (1-10  $\mu\text{m}$ )
  - T Tauri a righe deboli
    - Scoperte nei raggi X
    - Riga in emissione di  $H\alpha$  debole
    - Non mostrano eccesso infrarosso

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

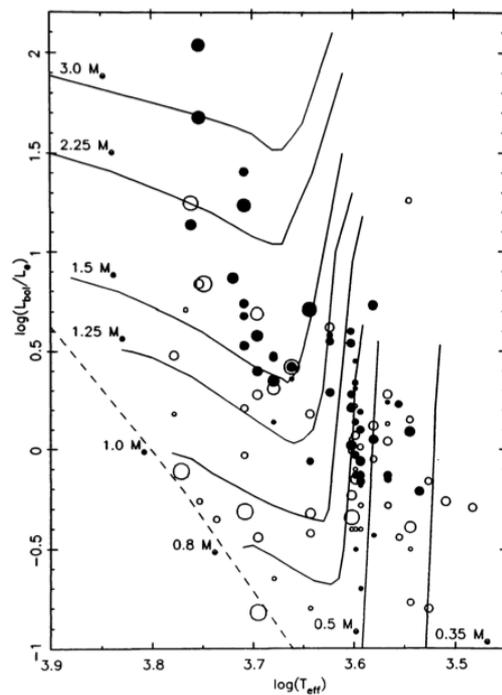
Cerchi pieni: T Tauri classiche

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)

16

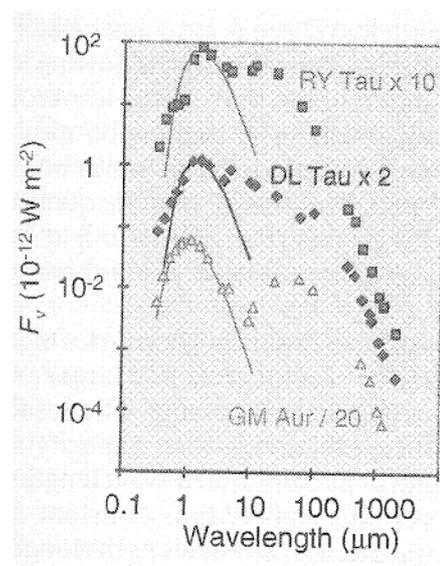
# Dischi circumstellari

Bibliografia: Beckwith & Sargent (1996)

17

## Eccessi infrarossi

- Negli ultimi decenni 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 IR
    - 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



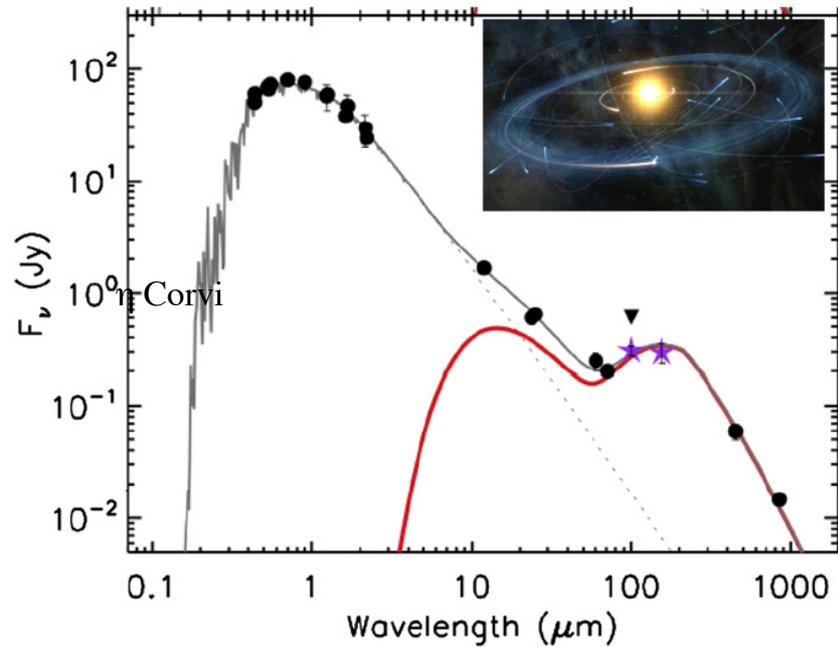
18

## Eccessi infrarossi

Esempi di osservazioni recenti di eccessi infrarossi

Misure nel lontano IR ottenute con lo strumento PACS a bordo del satellite Herschel

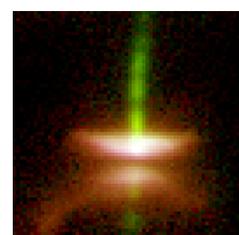
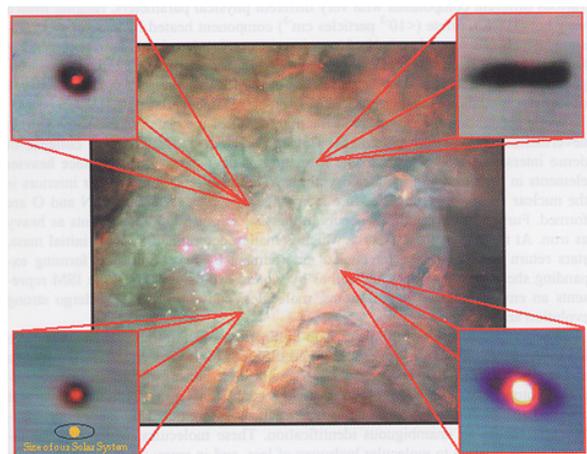
Lisse et al. (2012)



19

## Dischi circumstellari

- Le immagini ad alta risoluzione spaziale hanno confermato 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

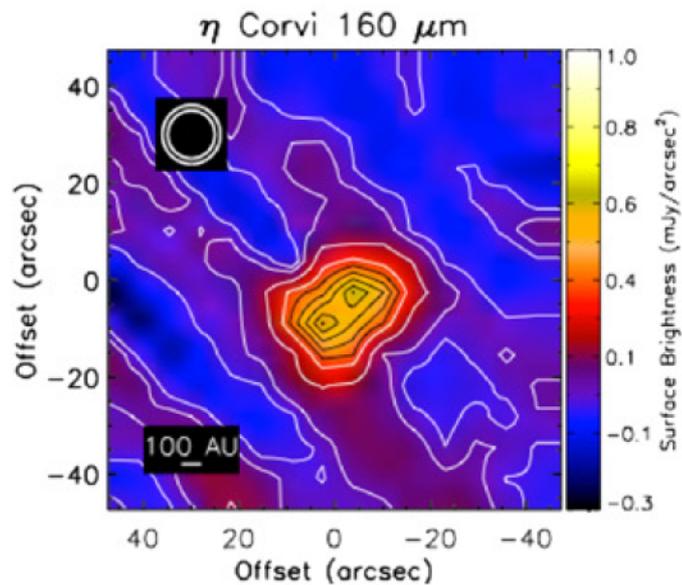


20

Esempi di osservazioni recenti di dischi circumstellari

Imaging nel lontano IR con lo strumento PACS a bordo del satellite Herschel

Lisse et al. (2012)



21

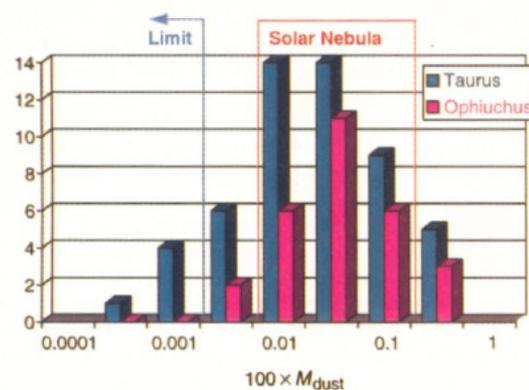
## Dischi circumstellari

- **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
- 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

Le masse della polvere sono misurate dall'eccesso infrarosso

La massa totale è stimata indirettamente assumendo un rapporto gas/polvere  $\sim 100$



Distribuzione delle masse dei dischi confrontata con la massa della nebulosa solare  
Beckwith & Sargent (1996)

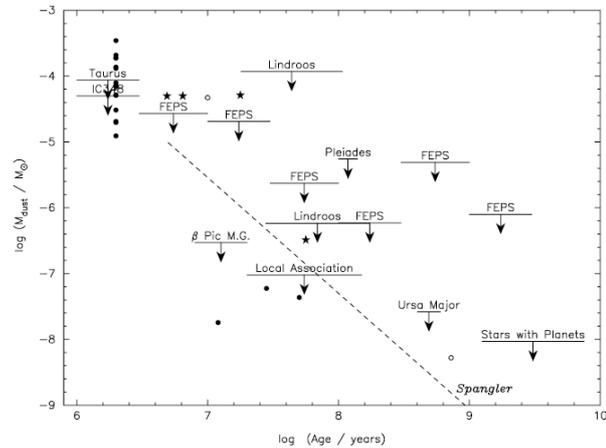
22

# 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
  - Indicazione che 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 interpretazioni: sublimazione della polvere, accrescimento sulla stella

Carpenter et al. (2005)



23

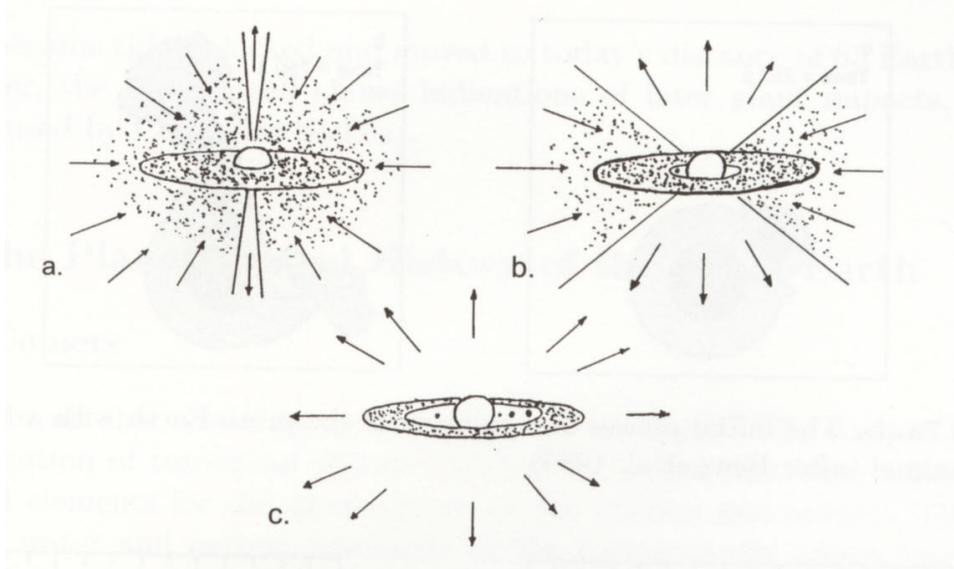
# Dischi protoplanetari

- **Conclusione**

- L'evidenza osservativa è consistente, anche dal punto vista quantitativo, 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

24

## Classificazione degli oggetti protostellari



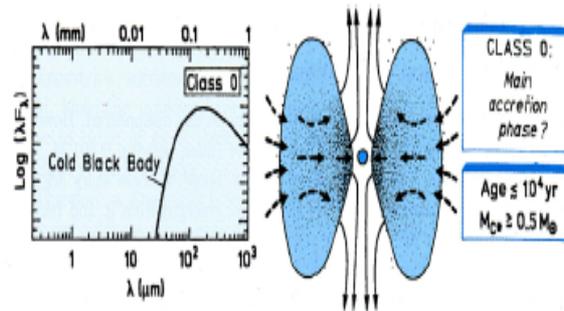
25

## 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 come una sequenza evolutiva**
  - Rappresentativa delle prime fasi evolutive di stelle di tipo solare
- **Fornisce un quadro di riferimento per**
  - la comprensione dei processi di formazione planetaria
  - un'interpretazione evolutiva delle evidenze osservative sopra accennate (getti collimati, stelle T Tau, eccessi infrarossi, dischi protoplanetari)

26

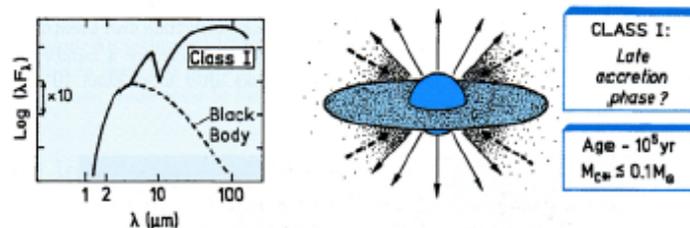
## Classificazione di oggetti protostellari Classe 0: protostelle giovani



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 ( $\sim 30$  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.

27

## Classificazione di oggetti protostellari Classe I: protostelle evolute



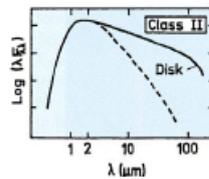
Classe I - Protostella evoluta: l'involucro, sia pure tenue, esiste ancora ed emette intensamente nell'IR. L'accrescimento prosegue alimentato un disco di accrescimento di alcune centinaia di UA di raggio. Questa fase dura circa  $10^5$  anni.

Getti molecolari sono ancora presenti, ma meno focalizzati.

28

## Classificazione di oggetti protostellari

### Classe II: stelle T Tauri classiche



CLASS II:  
Optically  
thick  
disk

Age  $\sim 10^6$  yr  
 $\langle M_{\text{disk}} \rangle \sim 0.01 M_{\odot}$

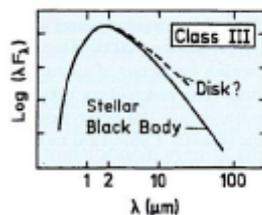
Classe II - T Tauri La fase protostellare è finita, l'involucro è scomparso. La Protostella è diventata una classica T-Tauri.

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.

29

## Classificazione di oggetti protostellari

### Classe III: stelle T Tauri a righe deboli



CLASS III:  
Optically  
thin  
disk?

Age  $\leq 10^7$  yr  
 $\langle M_{\text{disk}} \rangle < 0.003 M_{\odot}$

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.

30

- 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

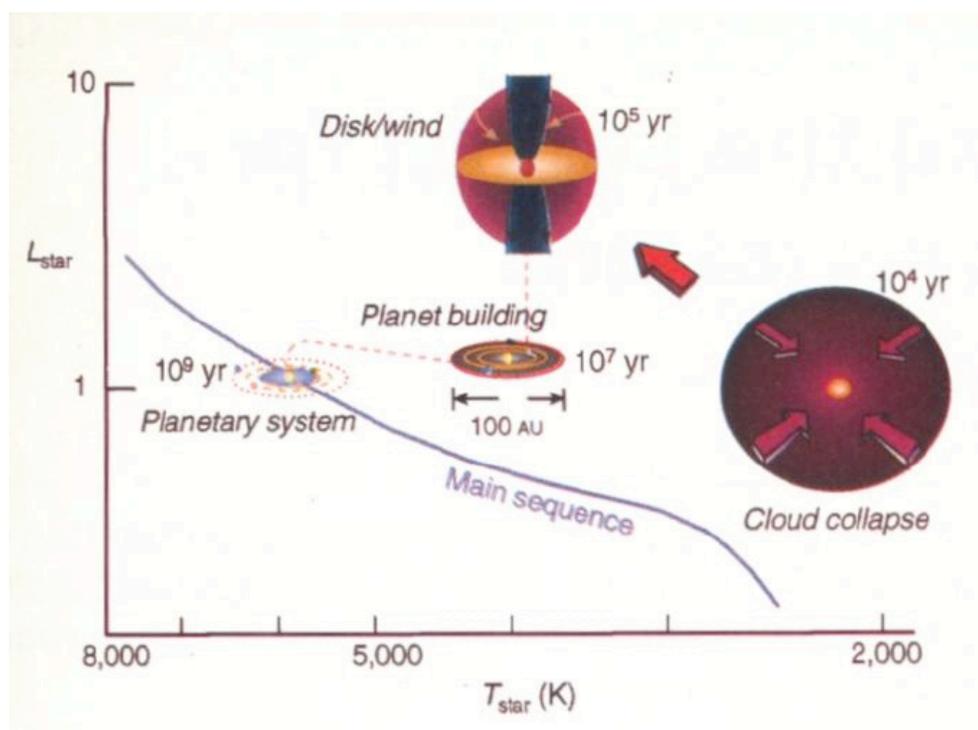
– Per spiegare i processi in gioco si invocano modelli magnetoidrodinamici (MHD) nei quali i campi magnetici giocano un ruolo importante nel trasferire lungo l’asse di rotazione stellare parte del materiale accresciuto dal disco

La sorgente di energia sarebbe la forza centrifuga risultante dalla rotazione

31

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

Beckwith & Sargent (1996)



32