



# Lezione di Astronomia II – 3

Maurizio Tomasi ([maurizio.tomasi@unimi.it](mailto:maurizio.tomasi@unimi.it))

4 aprile 2024



# Il mezzo interstellare (ISM)



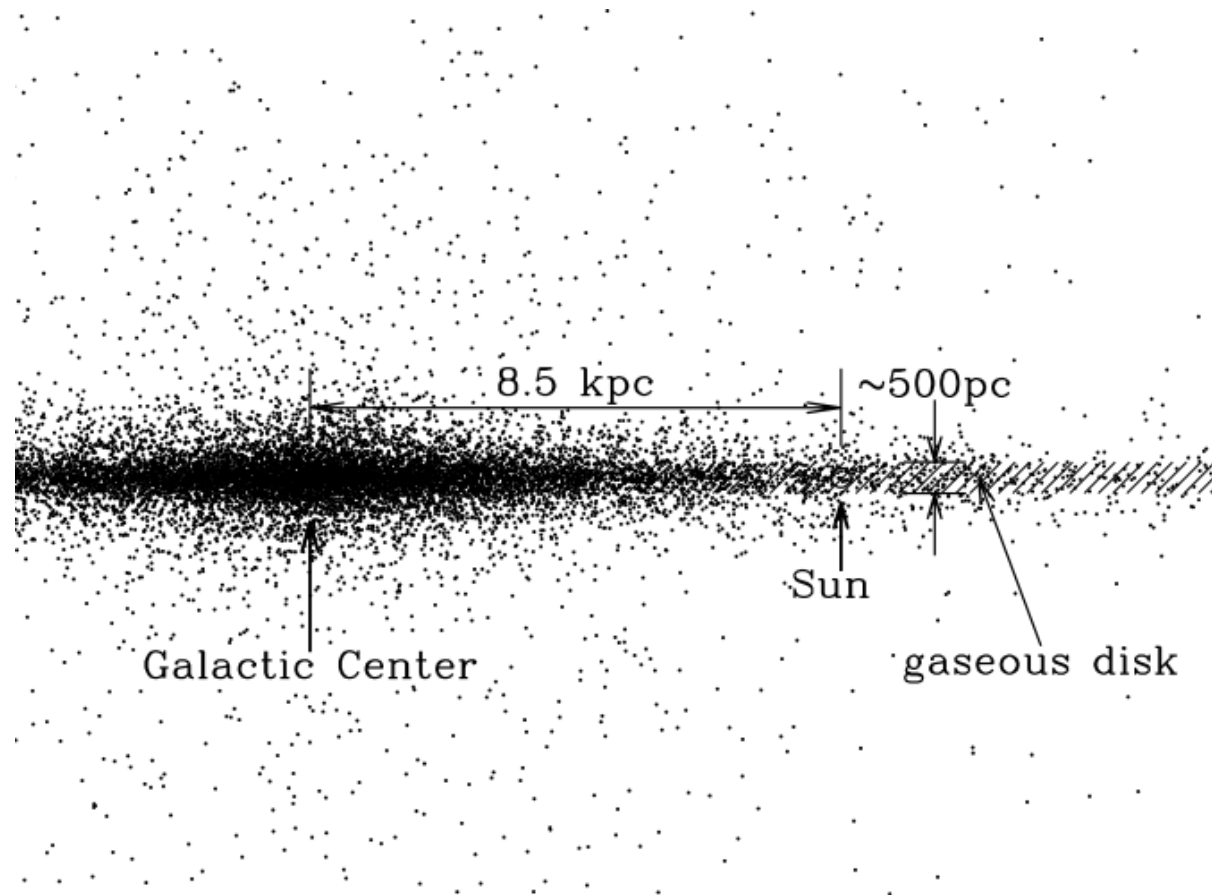
# Il piano galattico

L'evidenza del mezzo interstellare (*interstellar medium*, ISM) è data dalla presenza di regioni opache sul piano galattico, con uno spessore di  $\sim 100 \div 500$  pc.





# Il disco gassoso

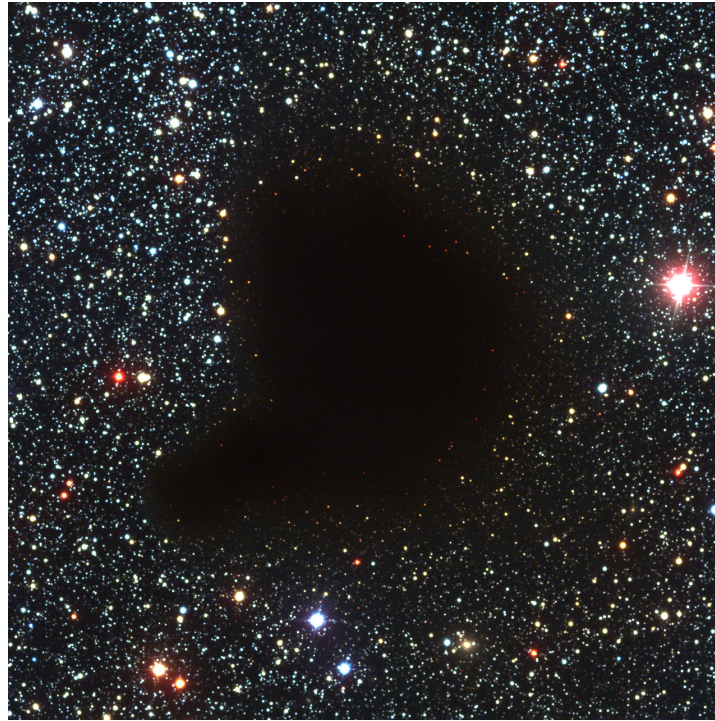


Adattato da B. Draine, *Physics of the interstellar and galactic medium*, Princeton University Press (2011).



# Globuli e nubi

Il mezzo interstellare mostra addensamenti di materia la cui scala è circa  $\sim 1$  pc («globuli» e «nubi»).



Barnard 68 («Black cloud»)



# Il mezzo interstellare

Ci sono due motivi per cui ISM è interessante:

1. Contiene una parte importante della massa della Galassia ( $10^{10} M_{\odot}$ );
2. È un luogo di formazione stellare:

$$t_{\text{O-star}} < 1 \text{ Gyr},$$

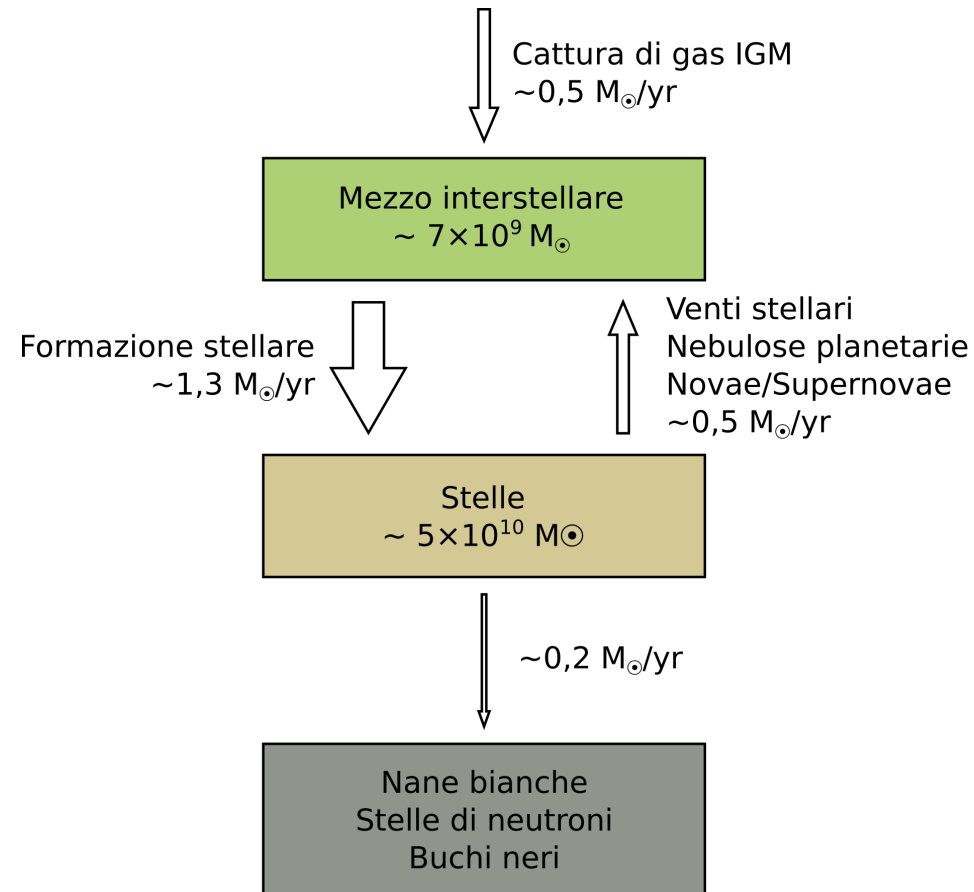
$$t_{\text{Via Lattea}} \sim \max t_{\text{gc}} \gtrsim 10 \text{ Gyr}.$$

Quindi il fatto che oggi si osservino stelle O nella Via Lattea implica che la formazione stellare sia ancora in corso.





# Barioni nella Via Lattea



Adattato da B. Draine, *Physics of the interstellar and galactic medium*, Princeton University Press (2011).



# Componenti dell'ISM

ISM comprende tutto ciò che nella Galassia sta tra le stelle. Esso è composto da:

1. **Gas;**
2. **Polveri;**
3. Raggi cosmici;
4. Radiazione e.m. (luce stellare, CMB, ...);
5. Campo magnetico interstellare;
6. Campo gravitazionale;
7. Materia oscura.

Oggi ci occuperemo solo di **gas** e **polveri**.





# Il mezzo interstellare

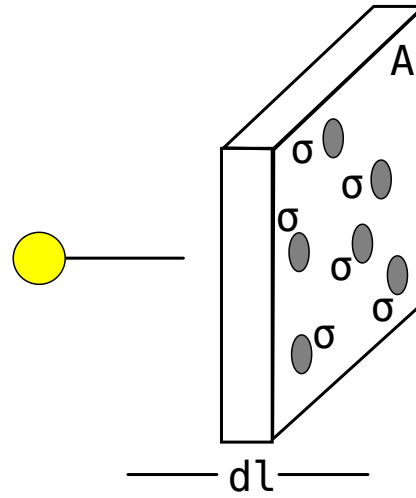
Metodi di osservazione:

- Polvere:
  1. Oscuramento (in banda V);
  2. Emissione diretta (UV, IR, mm).
- Gas: emissione/assorbimento di righe.



# Riduzione del flusso

- Il flusso di oggetti brillanti viene essere ridotto dall'ISM per **diffusione** e **assorbimento**:
  1. La diffusione cambia la direzione di propagazione della radiazione
  2. L'assorbimento aumenta la temperatura del mezzo interstellareI due fenomeni si indicano collettivamente col termine **estinzione**.
- Il mezzo interstellare ha densità molto variabili: da  $10^{-4}$  a  $10^{+6} \text{ cm}^{-3}$ , ma si tratta comunque di valori bassissimi! (L'aria ha densità  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )



- Un fotone che attraversa uno spessore  $dl$  di ISM ha una certa probabilità  $p$  di interagire con le sue particelle, venendo estinto (diffuso/assorbito).
- Se nello spessore ci sono  $N = n(l) \times A \times dl$  particelle, allora

$$p = \frac{N \sigma_{\lambda}}{A} = \frac{n(l) A dl \sigma_{\lambda}}{A} = n(l) \sigma_{\lambda} dl.$$

(supponendo che  $dl$  sia così piccolo che le particelle non si eclissino a vicenda).



# Equazione dell'estinzione

- Data la probabilità  $p$  di estinzione, ad una certa  $\lambda$  la radianza spettrale  $I_\lambda$  ( $[I_\lambda] = \text{W/m}^2/\text{Hz}/\text{sr}$ ) verrà ridotta a causa dell'estinzione:

$$dI_\lambda = -p \times I_\lambda = -n(l) \sigma_\lambda I_\lambda dl.$$

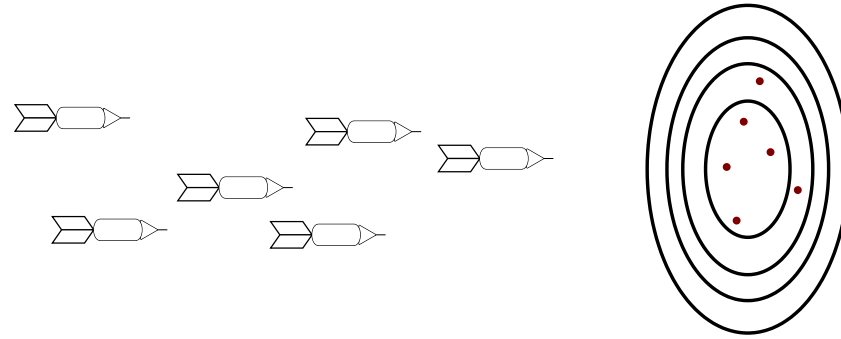
- Risolvendo l'equazione differenziale, si ottiene

$$I_\lambda(l) = I_0 e^{-\int_0^l n(l') dl' \sigma_\lambda} = I_0 e^{-\sigma_\lambda \int_0^l n(l') dl'} = I_0 e^{-\tau_\lambda(l)},$$

e quindi la radianza spettrale dipende dalla distanza se c'è estinzione!



# Densità colonnare



Si definisce **densità colonnare** la quantità

$$N_{\text{col}} = \int_0^l n(l') \, dl',$$

e vale che  $[N_{\text{col}}] = \text{cm}^{-2}$ . Se  $n(l)$  è costante,  $N_{\text{col}} = n \times l$ .



# Coefficiente di estinzione

- Il valore  $\tau_\lambda(L) = N_{\text{col}} \sigma_\lambda$  è detto **coefficiente di estinzione**, ed è un numero puro.
- L'estinzione è l'effetto combinato di assorbimento e diffusione. La loro importanza relativa dipende dalle proprietà fisiche dei grani e da  $\lambda$ .
- Si definisce *albedo*  $a_{\lambda,\text{diff}}$  la frazione dell'estinzione dovuta alla diffusione:

$$I_\lambda(l) = I_0 e^{-\tau_\lambda} = I_0 e^{-\tau_\lambda(a_{\lambda,\text{diff}} + a_{\lambda,\text{ass}})},$$

con  $a_{\lambda,\text{diff}} + a_{\lambda,\text{ass}} = 1$ .



# Estinzione e magnitudine

- Passando da  $I$  al flusso  $b$  ( $[b] = \text{W}/\text{m}^2$ ), se quello misurato è inferiore a causa dell'estinzione, vuol dire che la magnitudine **aumenta**:

$$A_\lambda \equiv m'_\lambda - m_\lambda = 2.5 \log_{10} \frac{b_0}{b_\lambda(l)} = 2.5 \log_{10} e^{\tau_\lambda(l)} = 1.0857 \tau_\lambda(l)$$

( $A$  viene talvolta detto *assorbimento totale*).

- Si può quindi usare l'approssimazione

$$A_\lambda \approx \tau_\lambda(l).$$





# ISM e misura delle distanze

- In presenza di estinzione  $A$ , in generale si ha che

$$\begin{aligned} m'_\lambda &= m_\lambda + A_\lambda \\ &= M_\lambda + 5 \log_{10} \frac{d}{10 \text{ pc}} + A_\lambda \end{aligned}$$

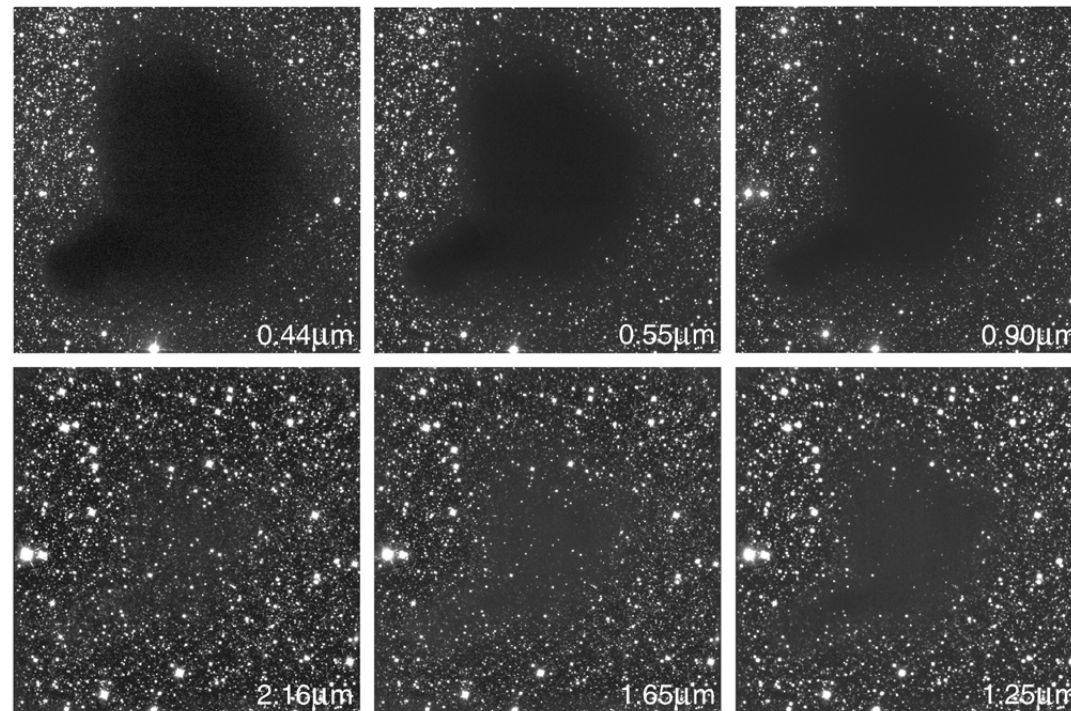
(la presenza di  $A_\lambda$  rende la stella più debole).

- Quindi in presenza di estinzione non è più sufficiente conoscere  $M_\lambda$  per ricavare  $d$ !



# Estinzione in funzione di $\lambda$

La scrittura  $A_\lambda$  suggerisce che l'estinzione dipenda dalla lunghezza d'onda.



The Dark Cloud B68 at Different Wavelengths (NTT + SOFI)



# Estinzione in funzione di $\lambda$

- Intorno al visibile, l'estinzione è più intensa se  $\lambda$  è piccola (luce blu).
- Questo comporta che il numero di stelle osservate aumenta nell'IR.
- Inoltre, le stelle appaiono più rosse (*stellar reddening*). Vediamo come si quantifica l'impatto dell'arrossamento sull'osservazione del flusso di una stella.



# Eccesso di colore

- Misuriamo l'indice di colore di una stella in due filtri, es. B e V:

$$m_V = M_V + 5 \log_{10} \frac{d}{10 \text{ pc}} + A_V,$$

$$m_B = M_B + 5 \log_{10} \frac{d}{10 \text{ pc}} + A_B.$$

- Dalla differenza tra le due equazioni ottengo che

$$m_B - m_V = (M_B - M_V) + (A_B - A_V).$$



# Eccesso di colore

$$m_B - m_V = (M_B - M_V) + (A_B - A_V).$$

- Il valore  $m_B - m_V$  è misurato direttamente.
- Il valore  $M_B - M_V$  si stima dal tipo spettrale.
- Il valore  $A_B - A_V$  si può quindi ricavare facilmente, ed è chiamato **eccesso di colore**, o **arrossamento** («reddening», vedi Draine, *Physics of the interstellar and galactic medium*, pag. 238).
- Di solito si scrive  $E(B - V)$  anziché  $A_B - A_V$  ( $E$  sta per *Excess*).



# Eccesso di colore e $A_\lambda$

- È ragionevole aspettarsi che in presenza di molto ISM aumenti sia  $A_V$  che  $E(B - V)$ ...
- ...e infatti si è osservato che il loro rapporto è circa costante:

$$R \equiv \frac{A_V}{E(B - V)} \approx 3.1$$

( $R$  è solitamente definito in termini di  $B$  e  $V$ , quindi il nostro esempio calzava!).



# Valori di $R$

- Dal fatto che il valore di  $R$  è abbastanza noto, si può usare la conoscenza dell'arrossamento  $E(B - V)$  per stimare  $A_V$  (e quindi anche la distanza  $d$ !)
- Il valore di  $R$  è sempre dell'ordine di qualche unità, ma dipende dall'ambiente (es., le due Nubi di Magellano hanno  $R$  diverso dalla Via Lattea)
- Anche nella Via Lattea il valore di  $R$  varia a seconda della direzione.
- Tipicamente,  $2.5 \lesssim R \lesssim 5$ .





# Fisica dell'estinzione



# Fisica dell'estinzione

- Ricordiamo la definizione di  $A_\lambda$ :

$$A_\lambda = 2.5 \log_{10} e^{\tau_\lambda} \approx \tau_\lambda.$$

- Il *coefficiente di estinzione*  $\tau_\lambda$  è legato alla fisica microscopica dell'ISM:

$$\tau_\lambda = \sigma_\lambda N_{\text{col}},$$

dove  $N_{\text{col}}$  è la densità colonnare dell'ISM tra noi e l'oggetto osservato,  $l$  lo spessore, e  $\sigma_\lambda$  la sezione d'urto totale (assorbimento e diffusione) alla lunghezza d'onda  $\lambda$ .



# Fisica dell'estinzione

- Se  $A \propto N_{\text{col}}$ , ciò vuol dire che osservare nubi di polvere di diverse dimensioni/densità porta a valori diversi di  $A$ , anche se  $\sigma$  è la stessa.
- Se si vuole studiare la dipendenza dell'estinzione da  $\lambda$ , si usa la quantità (numero puro)

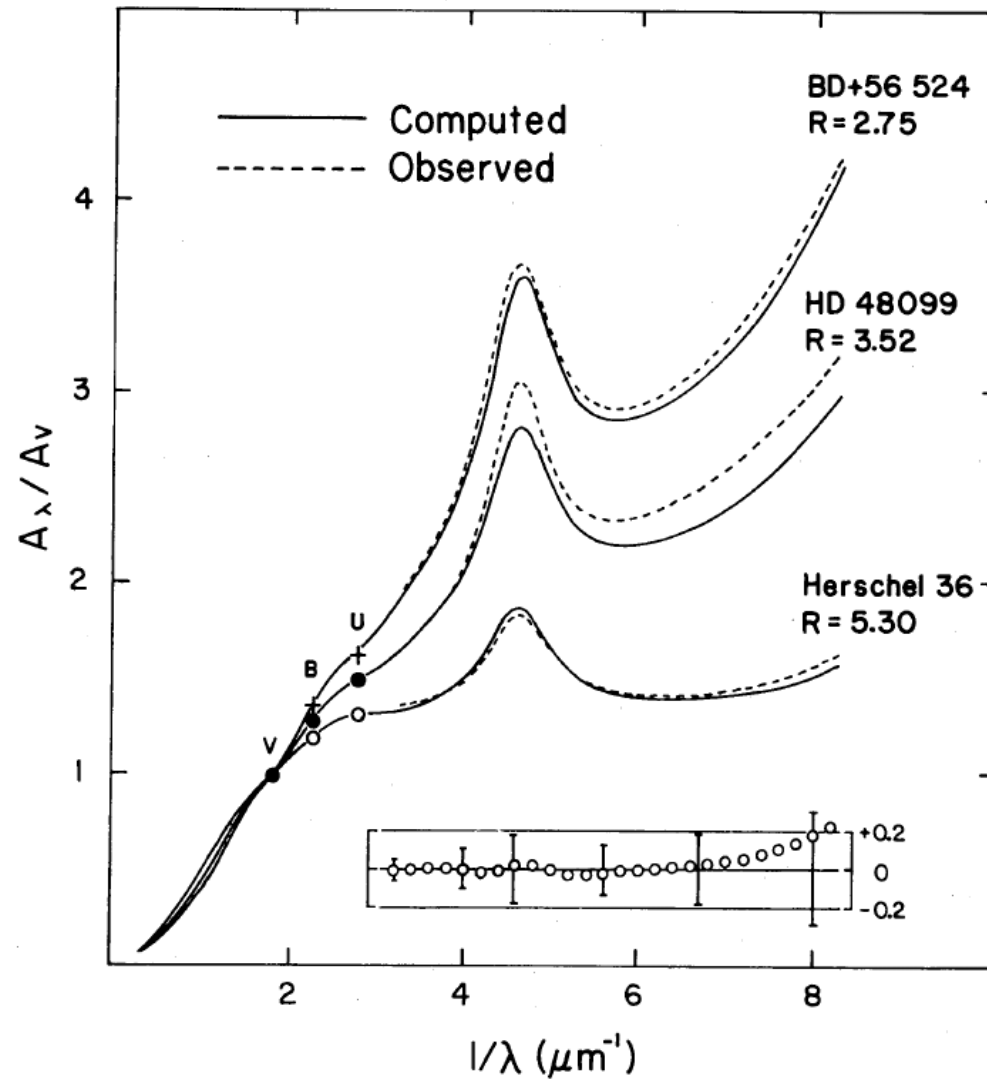
$$f(\lambda) \equiv \frac{A_\lambda}{A_V} = \frac{\tau_\lambda}{\tau_V} = \frac{N_{\text{col}} \sigma_\lambda}{N_{\text{col}} \sigma_V} = \frac{\sigma_\lambda}{\sigma_V},$$

e in questo modo la dipendenza dalla densità colonnare scompare! (Valeva lo stesso per  $R$ ).



# Fisica dell'estinzione

- Dallo studio di  $f(\lambda)$  si osserva che:
  1. Nel visibile/IR,  $f(\lambda) \propto 1/\lambda \propto \nu$  (la luce blu viene assorbita maggiormente);
  2. C'è un picco nell'UV;
  3. Si vedono strutture nello spettro dell'IR.
- La forma di  $f(\lambda)$  dipende comunque anche dalla direzione di osservazione (c'è polvere e polvere!), soprattutto nell'UV.



Notare che sull'asse  $x$  c'è  $1/\lambda$  anziché  $\lambda$ .



# Esercizio per casa

Una stella di tipo B viene osservata con  $m_B = 11.0$  mag,  $m_V = 10.0$  mag.

Se per una stella B,  $M_V \approx -0.9$  e  $M_B - M_V \approx -0.17$ , qual è il valore di  $A_V$  e la sua distanza? (Supporre che  $R = 3.1$ ).

[Soluzione:  $A_V \approx 3.6$ ,  $d \approx 280$  pc].



# La polvere nel mezzo interstellare





# Polvere nel ISM

Ci chiediamo: qual è la dimensione tipica  $r_g$  dei grani di polvere?

- Se  $r_g \gg \lambda$ , vale l'ottica geometrica, e  $A(\lambda)$  è costante;
- Se  $r_g \ll \lambda$ , allora  $\sigma \sim 0$  e dunque  $A(\lambda)$  è piccolo e costante;
- Se  $r_g \sim \lambda$ , allora la diffrazione è importante, e  $A(\lambda)$  dipende fortemente da  $\lambda$ .



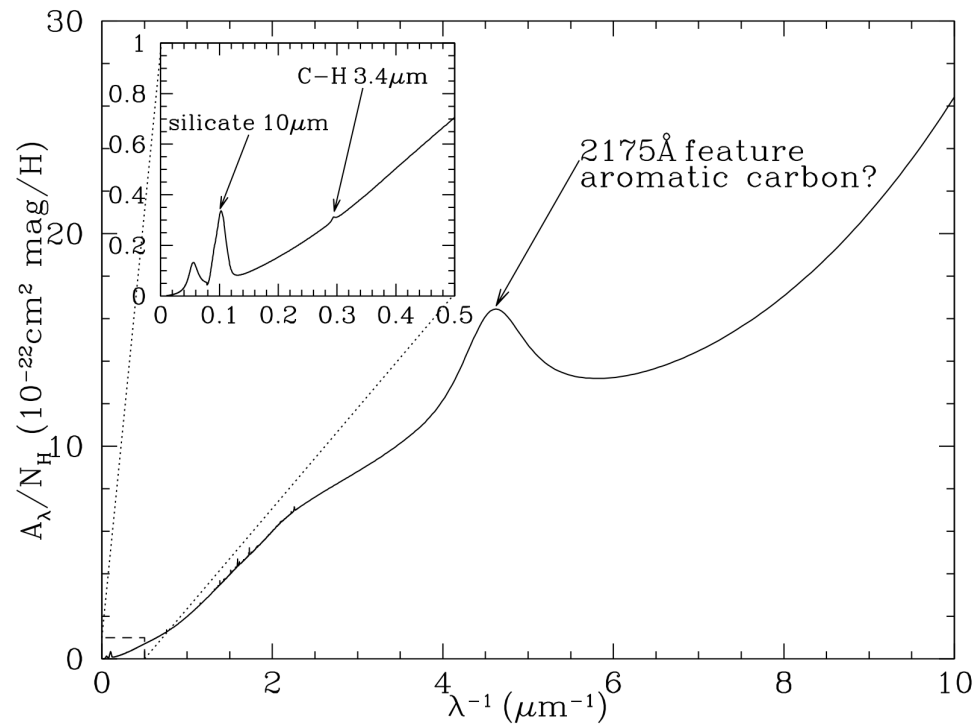
# Dimensione dei grani

Le evidenze sperimentali indicano che esistono due tipi di grani di polvere:

1. **Grani grossi** ( $\mu\text{m}$ – $\text{mm}$ ) generano uno spettro IR. Si osservano strutture spettrali a  $\sim 1\div 10\ \mu\text{m}$ , indicative di silicati ( $\text{SiO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ) e ghiaccio ( $\text{H}_2\text{O}$ );
2. **Grani piccoli** (1–10 nm) generano estinzione in UV, e sono aggregati di  $\sim 100$  atomi (idrocarburi, carbonio, grafite).



# Polvere nel ISM: composizione

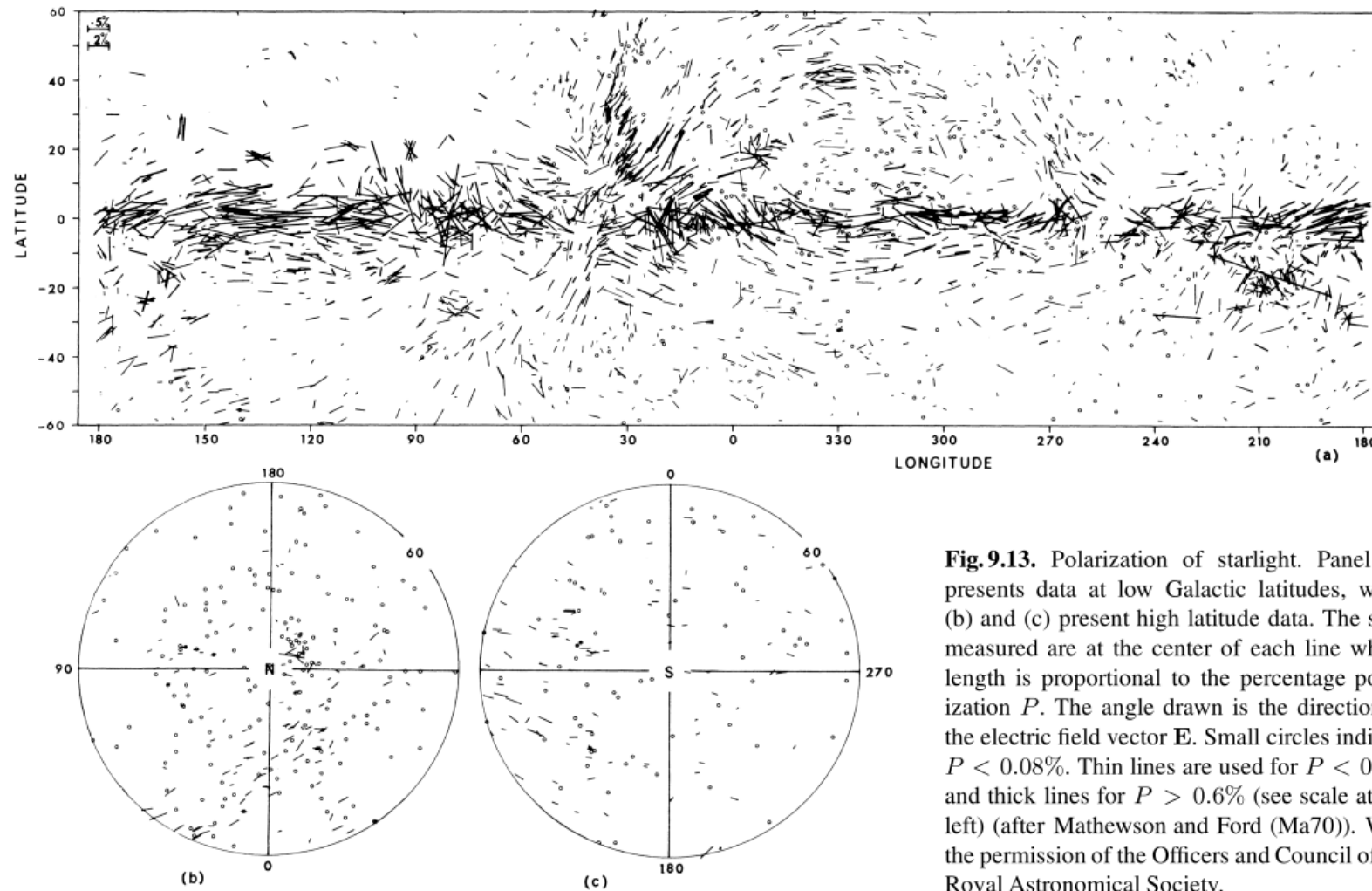


B. Draine, *Physics of the interstellar and galactic medium*, Princeton University Press (2011).



# Forma dei grani di polvere

- Indicazioni sulla forma dei grani vengono da misure di **polarizzazione**.
- La luce delle stelle che attraversa lo ISM è polarizzata. Si suppone che questo dipenda dalla forma dei grani nel ISM, perché HI, HII ed He hanno simmetria sferica e non possono indurre polarizzazione.
- La polarizzazione della luce di stelle sul piano galattico è maggiore se tra noi e la stella sono presenti polveri.



**Fig.9.13.** Polarization of starlight. Panel (a) presents data at low Galactic latitudes, while (b) and (c) present high latitude data. The stars measured are at the center of each line whose length is proportional to the percentage polarization  $P$ . The angle drawn is the direction of the electric field vector  $\mathbf{E}$ . Small circles indicate  $P < 0.08\%$ . Thin lines are used for  $P < 0.6\%$  and thick lines for  $P > 0.6\%$  (see scale at top left) (after Mathewson and Ford (Ma70)). With the permission of the Officers and Council of the Royal Astronomical Society.



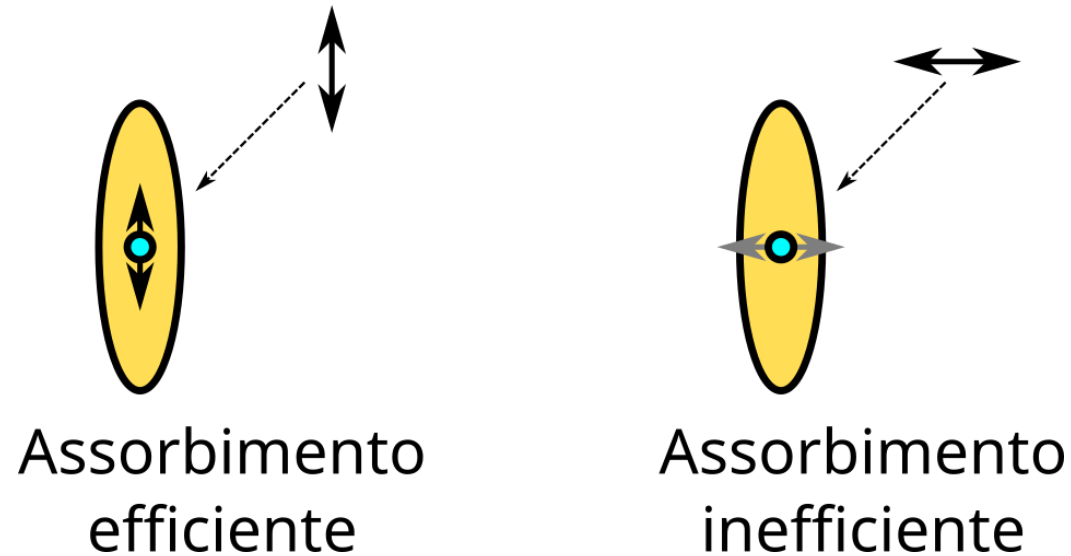
# Forma dei grani di polvere

- La luce delle stelle nel disco galattico è preferenzialmente polarizzata **parallelamente** al piano
- Ma le stelle nelle vicinanze del Sole non emettono luce così polarizzata come quella che si osserva → è l'ISM che causa la polarizzazione
- Questo implica che i grani di polvere devono assorbire più o meno facilmente i fotoni a seconda del loro angolo di polarizzazione



# Forma dei grani di polvere

La forma più probabile dei grani è un ellissoide: in questo modo gli elettroni sono liberi di rispondere al campo  $\vec{E}$  esterno più in alcune direzioni che in altre.



La polarizzazione si osserva soprattutto nel visibile, mentre è assente nell'UV (ottica geometrica!)





# Osservazioni sulla polarizzazione

- Livello medio di polarizzazione:  $1\% \div 2\%$ ;
  - Debole dipendenza da  $\lambda$ ;
  - Dipendenza da  $A_V$ :
    - Se  $A_V$  è piccolo, la polarizzazione è sempre bassa;
    - Se  $A_V$  è grande, la polarizzazione può essere qualunque.
- (Di conseguenza, la presenza di polvere è **necessaria ma non sufficiente** per avere polarizzazione).