Polvere interstellare

Lezione ISM 6
G. Vladilo

La crescita della complessità a livello microscopico nell'Universo

Nuclei atomici
⇓
Atomi
⇓
Molecole

Polvere

Difficile tracciare una linea di demarcazione netta tra molecole e polvere

Importanza della polvere interstellare

- Effetti sulle osservazioni astronomiche
  - Arrossamento ed estinzione
  - Deplezione delle abbondanze chimiche nel gas
- Effetti fisici nel mezzo interstellare
  - Transformazione di fotoni UV in fotoni IR
  - Raffreddamento del mezzo per emissione termica
  - Catalizzatore della formazione di molecole interstellari

Polvere interstellare

Evidenze osservative

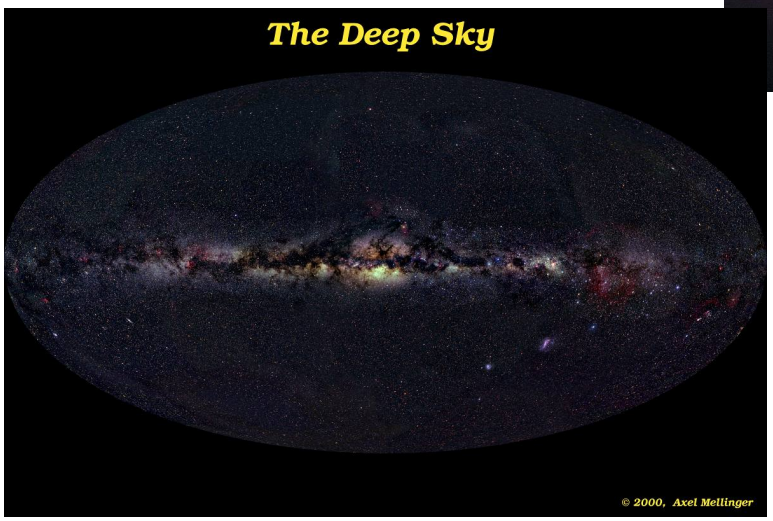
Mappe nel visibile
Righe in assorbimento del gas
Curve di estinzione
Spettroscopia infrarossa

Evidenze di polvere

Regioni oscure nella Via Lattea

- Regioni oscure
  - Assenza di stelle su placche fotografiche e immagini CCD di grande campo
    - I grani di polvere interstellare assorbono la radiazione delle stelle che si trovano dall'altra parte della nube

      Esempio:: Nebulosa Horsehead



Evidenze di polvere

Nebulose a riflessione

- Nebulose a riflessione
  - I grani riflettono la luce delle stelle nella nube
    - La radiazione stellare non è ionizzante
    - La stella centrale non è abbastanza calda

      Esempio: Nebulosa V838

- Le nebulose a riflessione ci offrono importanti diagnostici delle proprietà di scattering dei grani di polvere
  - Albedo
    - Rapporto tra cross-sections di scattering e di estinzione
  - Phase function
    - Distribuzione angolare della luce scatterata

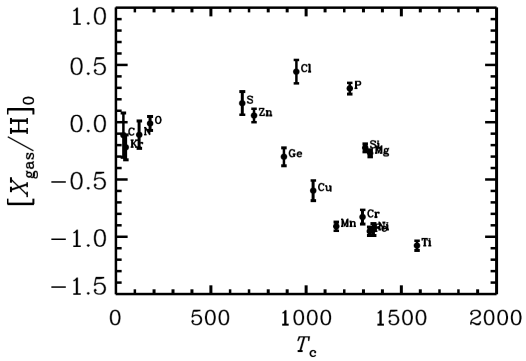
Studi di righe in assorbimento nel gas
Deplezione interstellare

- Le abbondanze chimiche del gas interstellare locale sono generalmente più basse dei valori solari
  - Interpretazione
    una parte degli atomi è incorporata nei grani di polvere e quindi non viene contata nelle misure di densità colonnari di atomi nel gas
- Tale deficienza di abbondanze viene chiamata "depletion"
  - Si stima mediante l'espressione $\delta_X = \log_{10}(N_X/N_H) - \log_{10}(X/H)_{sun}$
    - Notare la somiglianza con la definizione di [X/H]
      Ma il significato fisico è diverso!

- I valori di deplezione
  - variano da elemento a elemento
  - variano in diversi tipi di regioni interstellari

Deplezione interstellare
Variazioni da elemento a elemento

- Elementi refrattari
  - Deplezione forte
    - Ti, Ni, Fe, Cr, Mn, ..
- Elementi volatili
  - Deplezione debole
    - S, Zn



- Correlazione tra deplezione e "temperatura di condensazione"
  - È una delle evidenze empiriche che supportano l'interpretazione delle deplezioni come effetto di polvere

Temperatura di condensazione

Temperatura alla quale il 50% di un elemento chimico condensa in un gas di composizione chimica solare che viene gradualmente raffreddato a partire da uno stato iniziale molto caldo in cui tutti gli atomi sono in fase gassosa

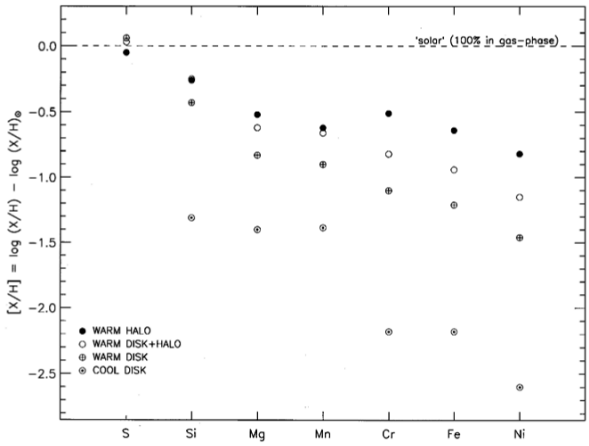
Per approfondire: Lodders K, 2003, ApJ, 591, 1220

Deplezione interstellare

Variazioni nelle diverse regioni interstellari

- Nubi dense e fredde
  - Deplezioni forti
- Nubi calde
  - Deplezioni deboli

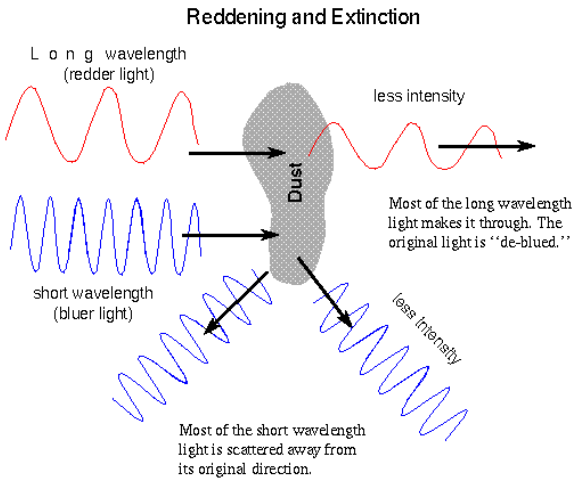
- In accordo con l'idea che le deplezioni sono associate alla polvere
  - La polvere sopravvive (o accresce) meglio nelle regioni dense e fredde
  - Tende a essere distrutta nelle regioni calde, di bassa densità



Evidenze di polvere

Arrossamento ed estinzione

- I grani di polvere assorbono e diffondono ("scattering") i fotoni incidenti
  - L'effetto dipende dalla lunghezza d'onda ed è all'origine di due effetti osservativi della polvere: l'arrossamento e l'estinzione
  - Lo scattering è particolarmente efficiente nell'UV
    - La radiazione in arrivo all'osservatore contiene una maggior frazione di luce rossa



Misura dell'arrossamento

- Storicamente l'arrossamento dei colori delle stelle è stata una delle prime evidenze osservative che ha gettato luce sulle proprietà della polvere

- L'arrossamento viene determinato da misure fotometriche
  - Molto più veloci delle misure spettroscopiche

- Eccesso di colore
  - Si misura confrontando l'indice di colore di stelle aventi lo stesso tipo spettrale
  - Stelle in direzioni prive di polvere vengono usate come riferimento
  - Uno degli indici più classici è basato sulle bande B (445 nm) e V (550 nm)

$$E(\mathrm{B\text{-}V}) = (\mathrm{B\text{-}V}) - (\mathrm{B\text{-}V})_0$$

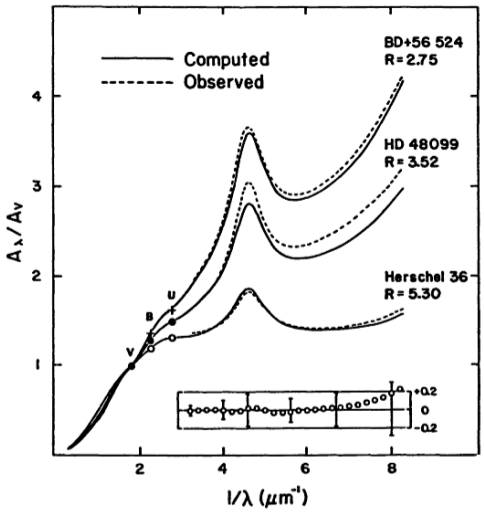
Evidenze di polvere:

Estinzione interstellare

- Estinzione:
  - assorbimento e scattering dei fotoni di una sorgente di fondo da parte dei grani di polvere interposti lungo la linea di vista
  - Se la sorgente è puntiforme nell'equazione del trasporto radiativo si può trascurare la frazione di fotoni emessi o scatterati dai grani all'interno dell'angolo solido sotteso dalla sorgente
    - Equazione semplificata: $I_\lambda = I_{\lambda 0}\, e^{-\tau\lambda}$
    - Dove $\tau_\lambda = N_d\, Q_{ext}\, \sigma_d$ è lo spessore ottico ("optical depth")
      - σ_d Sezione d'urto geometrica dei grani
      - N_d Densità colonnare dei grani di polvere
      - Q_{ext} Extinction efficiency factor (rapporto tra le sezioni d'urto ottica e geometrica)
- Definizione di estinzione
  - $A_\lambda\,(\mathrm{mag}) = -2.5 \log_{10} (I_\lambda / I_{\lambda 0}) = 1.086\, \tau_\lambda$

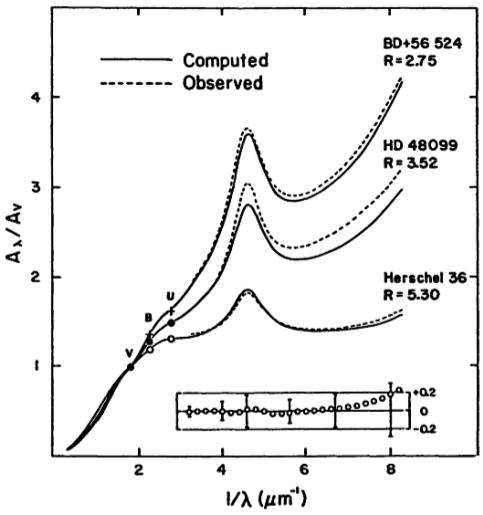
Curve di estinzione interstellare: misure

- Estinzione in funzione della lunghezza d'onda
  - Strumento diagnostico fondamentale per modelli di grani
  - La curve si ottengono dall'analisi di spettri stellari di bassa risoluzione
    - Confronto tra stelle dello stesso tipo spettrale con e senza polvere lungo la visuale
    - Oppure confronto tra spettri osservati e spettri sintetici stellari
  - Solitamente normalizzate al valore di estinzione nella banda visibile, A_V



Curve di estinzione interstellare: caratteristiche principali

- Caratteristiche principali
  - L'estinzione aumenta circa come λ^{-1}
  - "Extinction bump" a $\lambda \sim 2175$ Å
- Variazioni in nubi interstellari di diverso tipo
  - Curve più o meno ripide nell'UV
  - "Bump" più o meno forte



Relazione tra estinzione e arrossamento

- Definizione

  $R_V \equiv A(V) / E(B\text{-}V)$

- Valore tipico interstellare Galattico

  $R_V \approx 3.1$

  Ma può assumere valori tra ~2.1 e ~5.5

- Il parametro R_V può essere usato per parametrizzare i diversi tipi di curve di estinzione interstellare
  - All'aumentare di R_V le curve diventano più piatte

Draine (2003)

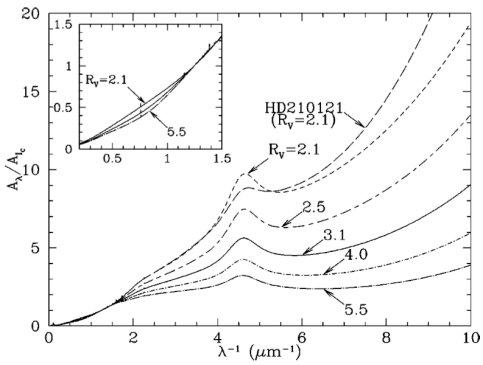


Figure 1 Extinction curves from prescription of Fitzpatrick (1999), with diffuse interstellar bands (DIBs) added as described in Section 3.3. The DIBs are barely visible on this plot.

Principali caratteristiche delle curve di estinzione
La pendenza

- Determinata dalla distribuzione delle dimensioni dei grani
  - La curva di estinzione diventa più piatta al diminuire della frazione di grani piccoli (≤ 100 Å) che assorbono nell'estremo ultravioletto
  - Possibili interpretazioni:
    - La dimensione dei grani può aumentare in nubi di alta densità per coagulazione di grani piccoli o per condensazione di ghiacci
    - In particolari visuali si può avere distruzione dei grani più piccoli

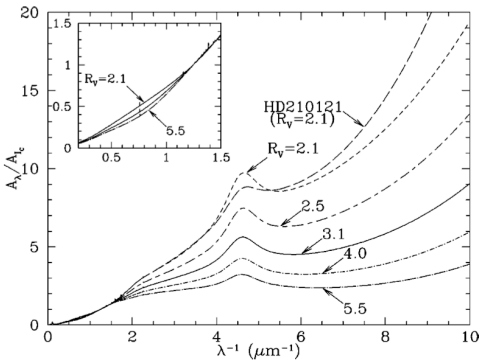


Figure 1 Extinction curves from prescription of Fitzpatrick (1999), with diffuse interstellar bands (DIBs) added as described in Section 3.3. The DIBs are barely visible on this plot.

Principali caratteristiche delle curve di estinzione
Il “bump” a 2175 Å

- Principali caratteristiche osservative
  - La posizione centrale è costante
  - La larghezza varia (leggermente) in diverse visuali
    Fitzpatrick & Massa (1986)
  - L’intensità indica che il bump deve essere prodotto da un elemento chimico abbondante
    Draine (1989)
- Interpretazione del bump
  - Estremamente dibattuta in letteratura
  - C’è accordo generale che si tratti di materiale carbonaceo
    - Originariamente si pensava a grafite
    - Attualmente molecole organiche aromatiche

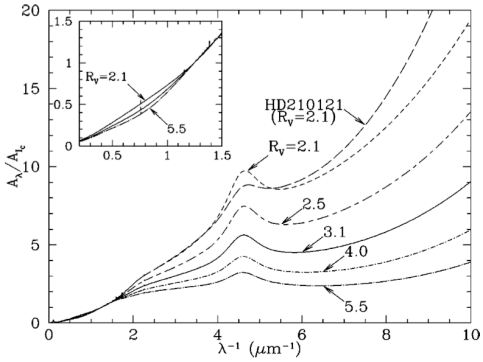
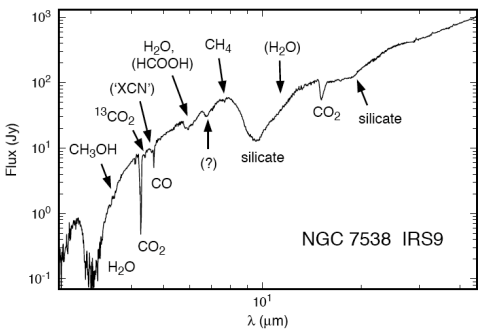


Figure 1 Extinction curves from prescription of Fitzpatrick (1999), with diffuse interstellar bands (DIBs) added as described in Section 3.3. The DIBs are barely visible on this plot.

Evidenze di polvere
Assorbimenti infrarossi

- Osservazioni di sorgenti di fondo sufficientemente brillanti nell’IR
  - Visuali in regioni ricche di polvere
  - Bande vibrazionali
- Ghiacci, composti organici
  - H_2O, CO, CO_2, CH_3OH …
- Silicati
  - 9.7 μm e 18 μm
    Modi di vibrazione “stretching” di legami Si−O e modi “bending” di legami O−Si−O

Esempio: spettro ISO SWS nel mid-IR da 2.4 a 45 μm nella direzione dell’ammasso stellare giovane NGC7538 IRS9 immerso in una nube molecolare Whittet et al. (1996)



Esempi si silicati:

Pirosseni $Mg_xFe_{(1-x)}SiO_3$

Olivine $Mg_{2y}Fe_{2(1-y)}SiO_4$

Modi vibrazionali di polvere e ghiacci interstellari

Molecule	Mode	λ (μm)
H_2O	O–H stretch	3.05
	H–O–H bend	6.0
	libration	13.3
NH_3	N–H stretch	2.96
	umbrella	9.35
CH_4	C–H stretch	3.32
	C–H deformation	7.69
CO	C–O stretch	4.67
CO_2	C–O stretch	4.27
	O–C–O bend	15.3
CH_3OH	O–H stretch	3.08
	C–H stretch	3.35
	C–H stretch	3.53
	O–H bend, C–H deformation	6.89
	C–O stretch	9.75
$MgSiO_3$	Si–O stretch	9.7
	O–Si–O bend	19.0
Mg_2SiO_4	Si–O stretch	10.0
	O–Si–O bend	19.5
$FeSiO_3$	Si–O stretch	9.5
	O–Si–O bend	20.0
Fe_2SiO_4	Si–O stretch	9.8
	O–Si–O bend	20.0
SiC	Si–C stretch	11.2

- Difficile distinguere tra diversi tipi di silicati
  - Serve risoluzione spettrale molto alta

Pirosseni	$Mg_xFe_{(1-x)}SiO_3$
Olivine	$Mg_{2y}Fe_{2(1-y)}SiO_4$

Evidenze osservative
al confine tra molecole e polvere

Esempi

Diffuse Interstellar Bands (DIBs)
Unidentified Infrared Bands (UIBs)

Distinguere tra lunghe molecole e piccoli grani di polvere
è per certi versi una questione di definizione

Evidenze osservative al confine tra molecole e polvere

Diffuse Interstellar Bands (DIBs)

- Circa 200 bande di assorbimento interstellari
  - nello spettro visibile, tra 4000 Å e 10000 Å
  - allargate e poco profonde
  - raggruppate in famiglie
    - le intensità delle bande di una data famiglia variano in maniera simile in diverse direzioni
- Origine ancora poco chiara
  - Oggetto di un lungo dibattito
  - Per lungo tempo associate a impurità o ghiacci sui grani di polvere
  - Si ritiene ora che si tratti di bande in assorbimento molecolari di lunghe molecole in fase gassosa
  - Svariate proposte di identificazione, difficili da confermare

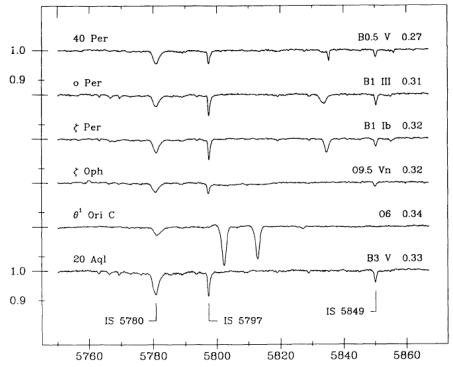


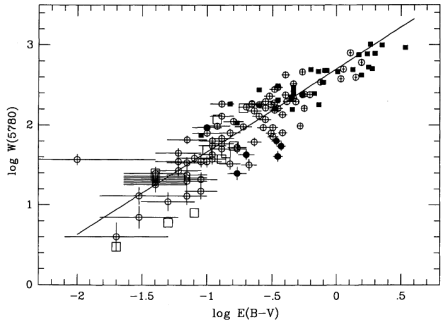
FIG. 3.—CFHT spectra of six stars having $E(B-V)$ values near 0.3. The DIBs λ5780 and especially λ5797 may have quite different equivalent widths at essentially the same degree of reddening.

Diffuse Interstellar Bands (DIBs)

- Che si tratti di assorbimenti interstellari è confermato da alcune correlazioni osservative
  - Esempio

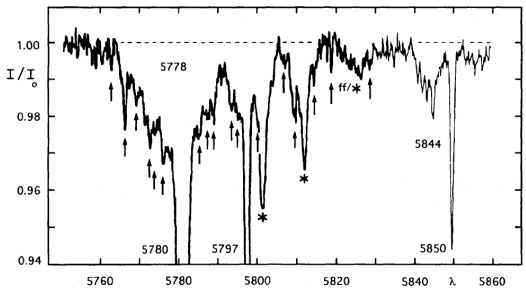
    intensità della banda a 5780 Å con eccesso di colore E(B-V)

    Herbig (1993)



- Che possa trattarsi di molecole è suggerito da alcune analisi ad alta risoluzione spettrale
  - In alcune bande si osserva una struttura simile a una banda di assorbimento roto-vibrazionale

    Jenniskens et al. (1996)



Evidenze osservative al confine tra molecole e polvere

Bande emissione IR

- Emissione da mezzo diffuso e regioni circumstellari

  Zone di foto-dissociazione all'interfaccia tra regioni HII e nubi neutre

  – Intense bande di emissione a 3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 e 12.7 μm

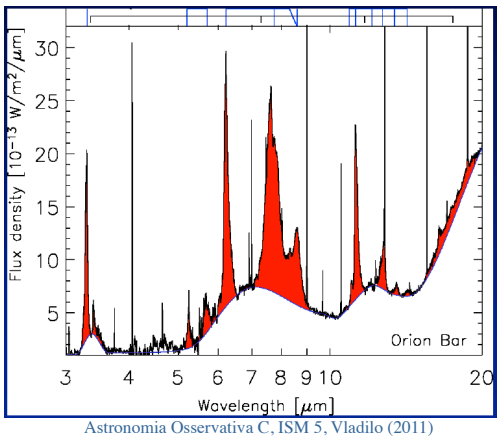
  Storicamente chiamate UIBs (Unidentified Infrared Bands)

  Poi attribuiti a grandi molecole o piccoli grani contenenti anelli aromatici idrogenati

  Esempi:

  3.3 μm modo di vibrazione stretching di C−H attaccato ad un anello aromatico

  6.2 μm e 7.7 μm modo di C−C stretching in un solido o molecola aromatica



Peeters et al. (2004)

Relazioni tra polvere e altre componenti interstellari

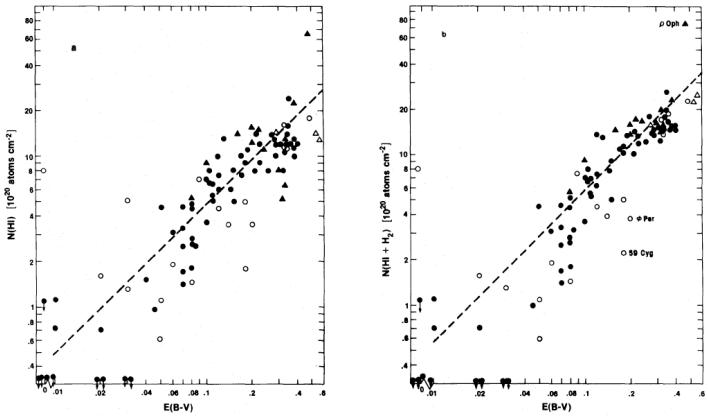
Polvere e gas

Rapporto polvere su gas

Polvere e molecole

Evidenze sperimentali

Gas e polvere si tracciano:
Correlazione tra arrossamento o estinzione e densità colonnare di HI



- Rapporto tra densità colonnare di idrogeno ed eccesso di colore
  $\langle N(\mathrm{HI}+\mathrm{H_2})/E(B\text{-}V)\rangle = 5.8 \times 10^{21}$ atomi cm^{-2} mag^{-1}
  Bohlin et al. (1978)
  - Talvolta chiamato "gas-to-dust ratio"
- Estinzione per atomo di idrogeno
  - Per R_V=3.1 $\Rightarrow$ $\langle A_V/N_H\rangle \sim 5.3 \times 10^{-22}$ mag cm^2 atomo^{-1}

Il rapporto polvere/gas in massa

- Diversi tipi di stime, seppure approsimative, danno un valore consistente, $M_{dust}/M_H \sim 0.01$
  - Valore da tener presente, comunemente adottato anche in modelli di formazione planetaria
- Esempi di metodi di misura di M_{dust}/M_H:
  - "Limite di Purcell": si ottiene tenendo in conto
    - dell'estinzione per atomo di idrogeno
    - della densità media dei grani
    - delle proprietà dielettriche dei grani di polvere
      Purcell (1969); Kim & Martin (1996); corso di van Dishoeck
  - Sommando la frazione di elementi chimici incorporata nella polvere
    - Tale frazione può essere stimata dalle misure di deplezioni interstellari degli elementi chimici più abbondanti
      Si ottiene $M_{dust}/M_H \sim 0.008$

Polvere e molecole sono associate
Esempio: correlazione tra $f(H_2)$ e arrossamento

- Frazione di H_2 ed eccesso di colore

  Esempio in figura: Rachford et al. (2002)

$$f \equiv \frac{2n(H_2)}{n(H)+2n(H_2)} \approx \frac{2N(H_2)}{N(H)+2N(H_2)}$$

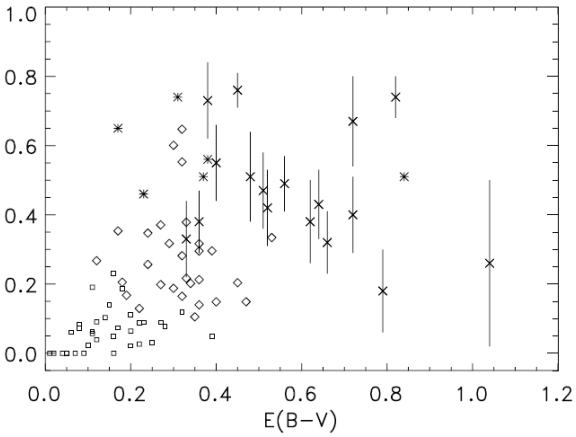


FIG. 7.—Molecular fraction vs. color excess. *Crosses: FUSE*; *asterisks: FUSE* points with no independent measurement of N(H I); *diamonds: Copernicus* points with $N(H_2) > 10^{20}$ cm^{-2}; *squares: Copernicus* points with $N(H_2) < 10^{20}$ cm^{-2}.

Natura dei grani di polvere interstellare

- Dimensioni
- Proprietà geometriche
- Composizione chimica
- Struttura dei grani

La modellizzazione delle curve di estinzione è il principale strumento per la comprensione della natura dei grani

Principali parametri dei modelli

- Distribuzione delle dimensioni dei grani
- Indice di rifrazione dei grani

Vincoli osservativi

- Proprietà di scattering e assorbimento dei grani
- Composizione chimica dei grani

Soluzione non univoca!

Dimensioni dei grani di polvere

- Dalle misure di arrossamento e polarizzazione
  - Le particelle devono avere dimensioni a dello stesso ordine di grandezza della luce visibile

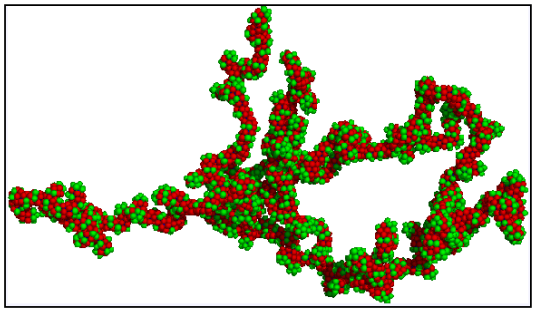
    $2\pi a/\lambda \approx 1$
  - Gran parte della massa della polvere si trova in particelle con $a \approx 0.15$ μm

    Se *a* fosse molto maggiore o minore la scoperta della polvere interstellare sarebbe stata più difficile

    Bias osservativo: possiamo escludere la presenza di "mattoni interstellari" ?

Proprietà geometriche e strutturali

- Alcune caratteristiche
  - Porosità
  - Possibile forma frattale
  - Generalmente amorfa



- Le proprietà variano in diversi tipi di regioni
  - In casi particolari sono stati identificati materiali cristallini, piuttosto che amorfi

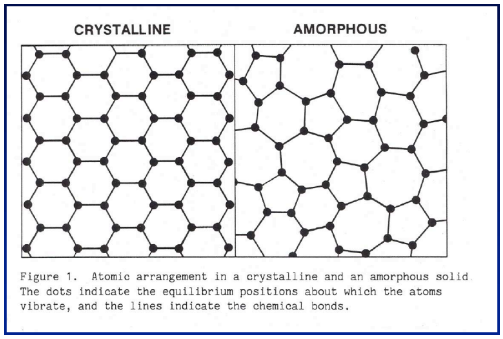


Figure 1. Atomic arrangement in a crystalline and an amorphous solid The dots indicate the equilibrium positions about which the atoms vibrate, and the lines indicate the chemical bonds.

Struttura dei grani

- Dalla modellizzazione delle curve di estinzione
  - Diverse popolazioni di grani servono a spiegare le diverse parti della curva di estinzione
    - Grani grandi (~ 0.12 μm)
      Estinzione nel visibile
    - Grani piccoli carbonacei (< 0.01 μm)
      Bump a 2175 Å
    - Grani piccoli di silicati (< 0.01 μm)
      Estinzione nel lontano UV

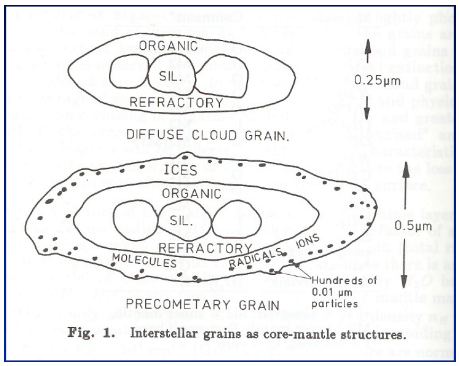


Fig. 1. Interstellar grains as core-mantle structures.

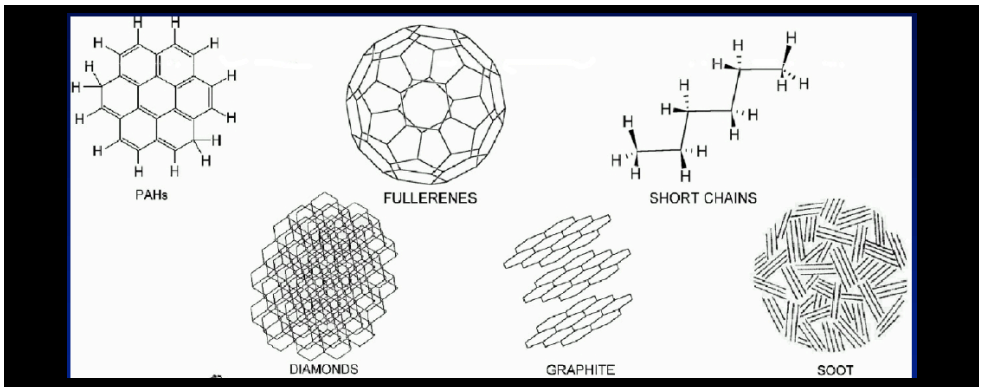
- Modello core-mantle
  Li & Greenberg (1997)
  - I grani grandi consistono di
    - Core di silicati e materiale organico refrattario (~ 0.05 μm)
    - Mantello di ghiacci
      Prodotto da processamento di ghiacci semplici quali H_2O, CO, CH_3OH, H_2CO, …

Composizione chimica dei grani di polvere

- Vincoli osservativi
  - Curve di estinzione
  - Righe in assorbimento nel vicino IR
  - Abbondanze chimiche e deplezioni
- Risultati incerti in quanto i vincoli osservativi non possono darci risposte univoche
  Esempio: incertezze dei valori solari di riferimento si traducono in una forte incertezza sulla quantità di carbonio in polvere stimata dalle deplezioni

Composti a base di carbonio nell'ISM

- Grafite
  - Originariamente ritenuta una componente importante della polvere
- PAHs
  - Polyciclic Aromatic Hydrocarbons; composti aromatici: collezione di anelli di benzene
    possono essere pensati come frammenti di fogli di grafite con atomi di idrogeno ai bordi
  - Hanno caratteristiche righe in emissione a 3.3, 6.2, 7.7 mm, ..
- Fullereni



Composizione chimica dei grani di polvere

Table 1.1. *Jenkins (2004) Grain Composition: One Illustrative Possibility*

Material	C [a]	O [a]	Mg [a]	Si [a]	Al [a]	Ca [a]	Fe [a]	Ni [a]	ρ [b]	V [c]
Grain Cores										
C,PAH,HAC,...	71	-	-	-	-	-	-	-	2.2	6.5
$MgFeSiO_4$ olivine	-	52	13	13	-	-	13	-	3.8	9.8
$CaMgSiO_4$ monticellite	-	8	2	2	-	2	-	-	3.2	1.6
Fe_2O_3 hematite	-	18	-	-	-	-	12	-	5.3	3.0
Al_2O_3 corundum	-	4.5	-	-	3	-	-	-	4.02	0.6
Ni_2O_3 dinickel trioxide	-	2.4	-	-	-	-	-	1.6	4.84	0.5
Illustrative Core Total	71	85	15	15	3	2	25	1.6	3.5	22.1
Observed Core Total [d]	71^{+61}_{-71}	53^{+49}_{-53}	15	14	3.0	2.2	25	1.6		
Grain Mantles										
C,PAH,HAC,...	35	-	-	-	-	-	-	-	2.2	3.2
$Mg_{0.9}Fe_{0.1}SiO_3$ pyroxene	-	57	17	19	-	-	2	-	3.3	9.9
Illustrative Mantle Total	35	57	17	19	-	-	2	-	3.5	13.1