

Spigolature astronomiche★

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna

Elogio della polvere

Annibale D'Ercole

Noi tutti abbiamo a che fare quotidianamente con la polvere, un insieme di impalpabili particelle piccolissime, ma enormi se paragonate agli atomi e le molecole che le compongono. E tutti noi nutriamo un sentimento di fastidio nei confronti della polvere percepita come inutile e dannosa. Lo stesso sentimento devono averlo provato gli astronomi quando, negli anni Trenta del secolo scorso, capirono che le zone scure disseminate nella Via Lattea non indicano un'assenza di stelle in quelle regioni, ma la presenza di nubi di gas contenente polvere che scherma la luce delle stelle lì presenti, impedendone la visione.

Tuttavia, con il passare degli anni e il progredire delle conoscenze, ci si è resi conto che la polvere, pur rappresentando soltanto l'1% in massa di tutto il gas della nostra Galassia, gioca un ruolo essenziale nell'evoluzione di quest'ultima, influenzando in maniera sostanziale la formazione di stelle e pianeti, catalizzando la sintesi di molecole (tra cui quelle dell'acqua dei nostri oceani) e controllando, in ultima analisi, l'emergere della vita.

La gran parte delle informazioni sulla polvere proviene (ma non solo) dallo studio delle sue modalità di interazione con la radiazione. Tali modalità possono essere comprese in prima istanza dalla seguente metafora. Si consideri un uomo che corre lungo una battigia sabbiosa; la corsa procederà spedita in quanto i granelli di sabbia sono molto più piccoli del passo del corridore e non rappresentano un ostacolo. Ma l'uomo si troverebbe in difficoltà in presenza di sassi e sarebbe costretto ad arrestarsi nel caso in cui gli ostacoli avessero dimensioni pari o

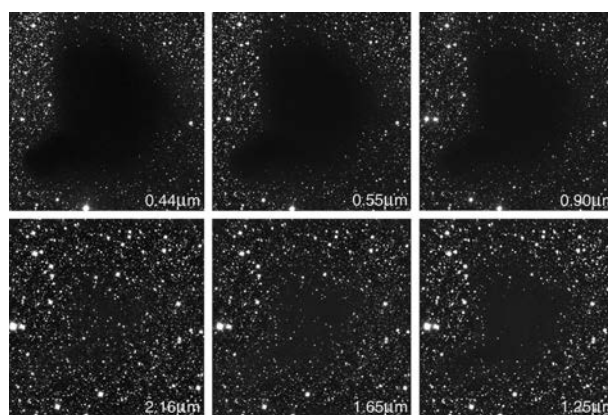


FIG. 1. La nube di Barnard 68 ripresa a lunghezze d'onda spazianti dal blu all'infrarosso. Nell'ottico la nube appare come una regione di circa 0,25 anni luce di diametro priva di stelle in un campo stellare altrimenti densamente popolato. All'aumentare della lunghezza d'onda la nube diventa sempre più trasparente, svelando la presenza di circa 3700 stelle poste alle sue spalle.

superiori all'ampiezza del suo passo. Analogamente, la radiazione "scavalca" agevolmente eventuali ostacoli molto più piccoli della sua lunghezza d'onda, ma è fortemente disturbata in caso contrario. La radiazione visibile ha lunghezze d'onda che, misurate in micron ($1 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ cm}$) vanno da $0,4 \mu\text{m}$ (violetto) a $0,7 \mu\text{m}$ (rosso); dal momento che, tipicamente, i grani di polvere hanno diametri dell'ordine di $0,2 \mu\text{m}$, si capisce che la luce risente della presenza della polvere, in particolare alle lunghezze d'onda minori (FIG. 1). Pertanto, se la luce di una stella attraversa gas e polvere interstellare prima di giungere a noi, essa apparirà affievolita¹ in particolare alle lunghezze d'onda più corte, risultando più rossa (un fenomeno analogo accade al tramonto alla luce solare). Questo effetto viene appunto detto *arrossamento*. Ad esso si associa il feno-

¹ Con linguaggio più tecnico, si dice che l'affievolimento di un raggio luminoso avviene a causa di due fenomeni: l'*assorbimento* e la *diffusione*. Un fotone viene assorbito se, nell'urto con il grano di polvere, scompare cedendo a quest'ultimo tutta la sua energia sotto forma di calore. Un fotone diffuso, invece, "sopravvive" all'urto, ma prosegue la sua traiettoria lungo una direzione diversa da quella originaria (si veda la FIG. 2).

* Questa rubrica si propone di presentare in modo sintetico e, per quanto possibile, autoconsistente argomenti che stanno alla base della conoscenza astronomica, spesso trascurati nella letteratura divulgativa, in quanto ritenuti di conoscenza generale oppure troppo difficili o troppo noiosi da presentare ad un pubblico non specialistico. Questi "fondamenti di astronomia", volutamente trattati in uno spazio limitato, possono essere letti a due livelli; eventuali approfondimenti per i lettori che desiderino ampliare la conoscenza dell'argomento vengono esposti in carattere corsivo e incorniciati. Si suggerisce questa rubrica, quindi, a studenti dei vari tipi e livelli di scuole. Le *Spigolature astronomiche* si possono trovare anche in rete, nel sito Web del «Giornale di Astronomia», <http://giornaleastronomia.difa.unibo.it/giornale.html>.

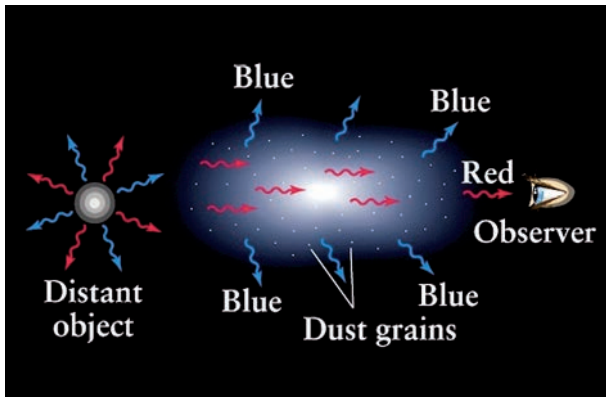


FIG. 2. Schema del fenomeno dell'arrossamento. Un raggio luminoso proveniente da una stella è composto da radiazione di diverse lunghezze d'onda, dal blu (minore lunghezza d'onda) al rosso (maggiore lunghezza d'onda). La radiazione rossa risente meno della presenza della polvere (si veda il testo) e prosegue il suo percorso sostanzialmente indisturbata. Molti fotoni blu, invece, dopo un eventuale "urto" con un grano di polvere, vengono diffusi, ossia deflessi dalla traiettoria originaria. Pertanto, il raggio luminoso che giunge all'osservatore è impoverito della componente blu, ed appare più rosso.

meno dell'*eccesso infrarosso*: i grani di polvere, colpiti dalla radiazione stellare, si scaldano e riemettono nell'infrarosso (al pari di qualunque oggetto caldo, quale una stufa o il nostro stesso corpo) generando così un eccesso di radiazione infrarossa rispetto a quella effettivamente emessa dalla stella. (FIG. 2)

Proprio studiando l'arrossamento e l'eccesso infrarosso gli astronomi sono risaliti alle proprietà dei grani di polvere, quali le dimensioni e la composizione chimica. Da questi studi risulta che i granelli di polvere sono principalmente aggregati di composti del carbonio (come ad esempio la grafite che troviamo nelle matite) o di silicati (composti principalmente da silicio e ossigeno), come quelli che formano le rocce terrestri. Infatti, questi atomi, benché assai meno numerosi di quelli di idrogeno ed elio, sono tuttavia i più abbondanti tra le sostanze non volatili, ossia adatte ad aggregarsi nelle nubi di gas freddo – con temperature pari o inferiori a 100 K^2 – in cui è concentrata gran parte del mezzo interstellare. All'interno di queste nubi gli atomi, impattando l'uno con l'altro, si uniscono a formare i grani di polvere; i tempi di formazione variano dal milione di anni nelle regioni più dense (con $n \approx 10^4\text{ cm}^{-3}$, diecimila particelle per centimetro cubico), al miliardo di anni nelle nubi più diffuse ($n \approx 10\text{ cm}^{-3}$). (FIG. 3)

Un ulteriore sito di formazione dei grani di polvere è dato dall'atmosfera delle cosiddette stelle *giganti rosse*, ossia stelle che attraversano una fase evolutiva durante la quale la loro atmosfera si dilata enormemente raffreddandosi fino a temperature dell'ordine di $1000\text{ K} - 2000\text{ K}$ (per confronto, ricordiamo che la temperatura superficiale del Sole è pari a $T \approx 6000\text{ K}$); queste temperature sono ancora

² La scala di temperatura Kelvin è simile all'usuale scala Celsius, ma "sfasata" di $273,15$ gradi; pertanto si ha, ad esempio, $0\text{ K} = -273,15\text{ °C}$ e $273,15\text{ K} = 0\text{ °C}$.



FIG. 3. Tutti i corpi (animati e inanimati) emettono radiazione infrarossa in ragione della loro temperatura, come mostrato da questa fotografia di tre suricati ottenuta sia nel visibile (luce solare riflessa) che nell'infrarosso (emissione propria, alquanto intensa a causa dell'elevato metabolismo di questi animali). I grani di polvere, scaldati dalla radiazione ultravioletta delle stelle e dagli urti con gli atomi del mezzo interstellare, raggiungono temperature che vanno da 30 K a 1000 K (a seconda dello specifico ambiente in cui si trovano); a questo ampio intervallo di temperature corrisponde un altrettanto ampio intervallo di lunghezze d'onda della radiazione emessa, che va da $2\text{ }\mu\text{m}$ a 1 mm .

sufficientemente basse da favorire la condensazione piuttosto che l'evaporazione dei grani di polvere, i quali accrescono in tempi brevissimi dato che l'elevata densità ($n \approx 10^{13}\text{ cm}^{-3}$) delle atmosfere stellari favorisce notevolmente l'urto tra molecole (si veda il livello avanzato).

In generale, la formazione di polvere risulta essere così efficiente da riuscire a trasformare tutto il gas in polvere in soli 10^7 anni, un tempo estremamente breve rispetto all'età della nostra Galassia (circa 10^{10} anni). Le osservazioni, invece, mostrano la compresenza di atomi di carbonio e ossigeno sia nel gas che nella polvere, indicando che quest'ultima è soggetta a processi di distruzione. In effetti, l'esistenza di un granello di polvere è alquanto precaria a causa di diversi fenomeni:

- i) l'urto tra due grani non ne provoca l'aggregazione, ma piuttosto la frammentazione;
- ii) l'interazione dei grani con la radiazione stellare ultravioletta e con i raggi cosmici (protoni, elettroni ed altre particelle che viaggiano a velocità vicine a quella della luce e che permeano la Galassia) producono effetti di erosione che determinano un rallentamento della crescita dei grani, o anche la loro distruzione;
- iii) le onde d'urto prodotte dalle esplosioni di supernovae, investendo i grani di polvere, li disintegrano efficacemente;
- iv) infine, la polvere contenuta all'interno di una nube che collassa per formare una stella è destinata all'evaporazione/sublimazione al momento dell'accensione della stella stessa.

Da quanto detto finora si evince che la polvere interstellare segue un ciclo evolutivo: i grani di polvere creati nelle giganti rosse vengono sospinti dai

venti stellari nel mezzo interstellare dove, oltre al processo di formazione (e di crescita) che prosegue, si verificano i meccanismi di distruzione elencati più sopra; uno di questi, il collasso gravitazionale delle nubi, porta alla formazione di nuove stelle che, a tempo debito, formeranno nuovi grani di polvere, chiudendo così il ciclo vitale.

Nel corso di tale ciclo la polvere non si limita ad essere spettatrice passiva degli eventi che la coinvolgono; al contrario, come abbiamo accennato all'inizio, essa ricopre un ruolo rilevante nell'evoluzione della Galassia. Si consideri, ad esempio, il processo di formazione stellare che prende avvio dalla contrazione gravitazionale di una nube di gas. Tale contrazione induce un aumento della temperatura³ della nube e una conseguente tendenza di quest'ultima a riespandersi contrastando l'avvio del collasso. È pertanto necessario che la nube si liberi della propria energia termica per permettere al processo di formazione stellare di proseguire. A questo punto entra in gioco la polvere. Quando gli atomi (e le molecole) di idrogeno urtano contro i grani di polvere, questi si scaldano ed emettono questa energia termica nell'infrarosso. La contrazione può pertanto proseguire; successivamente, col procedere del collasso, anche il gas emetterà radiazione direttamente (e copiosamente).⁴

Un altro effetto importante dovuto alla presenza della polvere è dato dalla formazione delle molecole osservate nelle nubi interstellari. Sarebbe erroneo pensare che queste molecole si formino direttamente dall'incontro casuale degli atomi che le compongono. È infatti estremamente improbabile che tutti gli atomi necessari a comporre una molecola si trovino casualmente nello stesso punto allo stesso tempo per legarsi chimicamente. Succede invece che un atomo, a seguito dell'incontro con un grano di polvere, rimanga "parcheggiato" sulla sua superficie. Nel tempo altri atomi "atterrano" sul grano dove possono legarsi a quelli già presenti e formare così molecole, tra cui l'idrogeno molecolare e le molecole organiche. Il primo, composto da due atomi di idrogeno, costituisce la più semplice e più abbondante molecola nell'universo, e forma nubi dense e compatte da cui si originano le stelle. Le molecole organiche, invece, sono formate da catene di idrogeno, carbonio, azoto e ossigeno come quelle che si trovano negli esseri viventi e di cui costituiscono i "mattoni" fondamentali. Alcuni astronomi ipotizzano, pertanto, che tali

mattoni non si siano formati inizialmente sulla Terra, ma siano arrivati dal cielo trasportati da meteoriti. Sottolineiamo, infine, che la polvere risulta importante anche nella formazione dell'acqua, una molecola senza la quale la vita come noi la conosciamo non esisterebbe.

Si consideri un grano di polvere (assunto sferico) di raggio a che si muove con velocità v attraverso un gas la cui densità è pari a n particelle per unità di volume. La massa del grano al tempo t è data dalla somma delle masse degli atomi del gas che, durante tale tempo, lo impattano e vi aderiscono. Per ricavare questa massa notiamo innanzitutto che nel tempo t il grano di polvere percorre una distanza vt e "spazza" un volume cilindrico $\pi a^2 vt$; il numero di particelle di gas intercettate al tempo t è pari al numero di particelle contenute in questo cilindro, ossia $\pi a^2 vnt$. Pertanto la massa del grano a questo tempo è data da

$$M = \pi a^2 v n m \xi t, \quad (1)$$

dove m è la massa della singola particella di gas. Il parametro ξ rappresenta l'efficienza di aggregazione. Se tutte le particelle di gas investite dal grano vi aderissero, avremmo $\xi = 1$. Ma in realtà molte rimbalzano via; nel seguito noi assumiamo $\xi = 1/3$, ossia solo 3 particelle su 10 aderiscono al grano. (FIG. 4)

La massa del grano di polvere ad ogni istante può anche scriversi come

$$M = \frac{4\pi}{3} \rho a^3, \quad (2)$$

dove ρ è la densità del singolo grano. Combinando quest'ultima equazione con la precedente, otteniamo l'andamento nel tempo della crescita del grano:

$$a = 0.75 \frac{v n m \xi}{\rho} t = 0.22 t, \quad \mu\text{m}, \quad (3)$$

dove t , indica il tempo misurato in miliardi di anni, mentre le lunghezze sono misurate in mi-

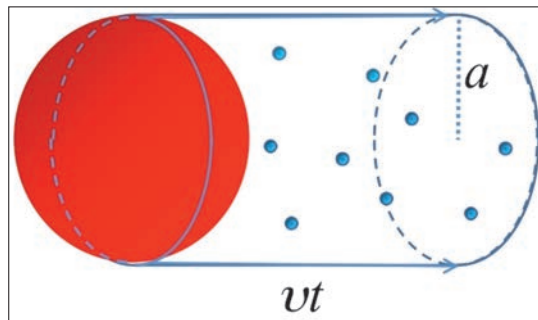


FIG. 4. La figura illustra un grano di polvere – rappresentato come una sfera di raggio a – che si muove con velocità v attraverso un gas le cui particelle sono qui rappresentate da sferette. Dopo un tempo t il grano ha spazzato il volume cilindrico schematizzato in figura.

³ Dal primo principio della termodinamica sappiamo che un gas che viene compresso aumenta la sua temperatura. Gonfiando le ruote della bicicletta la pompa si scalda perché parte dell'energia spesa per comprimere l'aria si trasforma in energia termica di quest'ultima.

⁴ Col tempo la contrazione della nube si fa sempre più veloce. L'energia cinetica dei suoi atomi diventa sufficientemente alta da consentire la transizione tra livelli energetici atomici durante i reciproci urti tra particelle. Questi urti, cioè, forniscono agli elettroni l'energia necessaria per passare dal livello fondamentale ad uno più energetico; successivamente, gli elettroni eccitati tornano al livello fondamentale, emettendo uno o più fotoni.

cron. La valutazione quantitativa dell'eq. (3) è stata ottenuta come segue. All'accrescimento del grano non partecipa l'idrogeno (H), perché volatile, e neanche l'elio (He), un gas nobile che non si lega chimicamente a niente; il primo elemento utile al nostro scopo è l'ossigeno, l'elemento più comune dopo H e He, la cui densità è pari a $n \approx 10^{-3}n_H$ – ossia un atomo di ossigeno ogni 1000 atomi di idrogeno –, e la cui massa è pari a $m = 16m_p$, dal momento che il suo nucleo contiene 8 neutroni e 8 protoni con massa $m_p = 1.67 \times 10^{-24}$ g. Per semplicità, nella valutazione dell'eq. (3) è stato trascurato il contributo degli altri elementi in quanto la loro scarsità li rende poco rilevanti ai nostri fini. La velocità degli atomi è quella di agitazione termica, pari a $v = (3kT/m)^{0.5}$, dove k è la costante di Boltzmann e T è la temperatura del gas espressa in gradi Kelvin.

Assumendo $n_H = 20 \text{ cm}^{-3}$ e $T = 80 \text{ K}$, che sono valori tipici per le nubi interstellari diffuse, e prendendo $\rho = 2 \text{ g cm}^{-3}$ come valore rappresentativo della densità di un grano di polvere, otteniamo finalmente il valore espresso nell'eq. (3). (FIG. 4)

Questa equazione ci dice che, per raggiungere il tipico raggio $a = 0,1 \mu\text{m}$, un grano di polvere impiega circa 5×10^8 anni. Dunque, anche in un ambiente poco denso come una nube diffusa, dove gli urti sono rari, la polvere si sviluppa così rapidamente che nessun atomo di ossigeno dovrebbe più trovarsi “libero” nel gas interstellare perché già accorpato dalla polvere. Il fatto che, invece, circa l'80% degli atomi di ossigeno risulta diffuso nel gas mostra l'efficienza dei meccanismi di distruzione dei grani di polvere elencati nel livello base.

Annibale D'Ercole si è laureato in Fisica all'Università di Roma “La Sapienza”. Astronomo associato presso l'INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna, si occupa di simulazioni numeriche di idrodinamica, applicate alle nebulose e al gas interstellare delle galassie. È autore di numerosi articoli divulgativi pubblicati presso questa e altre riviste.