

Spigolature astronomiche★

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio di astrofisica e scienza dello spazio di Bologna (OAS)

La temperatura di equilibrio

Claudio Elidoro

FIN da piccoli abbiamo imparato che i pianeti non brillano di luce propria, ma il loro luccichio è dovuto al fatto che riflettono la luce solare. Sono le caratteristiche della loro superficie, le distanze in gioco e la geometria di questi giochi di luce che fanno risplendere in modo più o meno vistoso un pianeta (ne abbiamo parlato nelle “Spigolature” del settembre 2012, giugno 2013 e settembre 2014).

Non abbiamo mai considerato, però, le conseguenze dell'irraggiamento solare su una superficie planetaria. La radiazione che investe un pianeta, infatti, trasporta energia e dunque finisce inevitabilmente col contribuire al suo bilancio energetico. D'altra parte, la fisica ci insegna che qualunque oggetto caratterizzato da una temperatura non nulla irradia energia, il che significa che il bilancio energetico di un pianeta, oltre alla componente in entrata (energia proveniente dal Sole) deve contemplare anche una componente in uscita.

Con molto tempo a disposizione – beh, i pianeti del Sistema solare hanno potuto disporre di 4 miliardi di anni – e senza nessun'altra diavoleria in azione, è inevitabile che il bilancio energetico finisca con l'attestarsi sul pareggio, con l'energia apportata dal Sole in perfetto equilibrio con l'energia irraggiata dalla superficie planetaria. A questa situazione corrisponderà un ben preciso valore della temperatura della superficie planetaria e a tale grandezza verrà dato il nome di “temperatura di equilibrio”. Rimandiamo al livello avanzato le considerazioni che ci porteranno a trovare la sua formulazione.

Talvolta ci si riferisce a questa grandezza con il termine di “temperatura di corpo nero equivalent-

te” di un pianeta, una terminologia che sottolinea in modo evidente come si stia considerando una situazione teorica. A rendere praticamente carta straccia le valutazioni della temperatura di un pianeta, ottenute dal calcolo della temperatura di equilibrio, infatti, contribuisce, in modo decisivo, la presenza di un'atmosfera e dell'effetto serra ad essa associato.

Il caso più evidente è quello di Venere. Il calcolo della temperatura di equilibrio di questo pianeta, infatti, suggerisce un valore di 250 K, dunque intorno a $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. I dati astronomici, però, indicano che la superficie del pianeta sperimenta temperature medie di $462\text{ }^{\circ}\text{C}$ (735 K) e che non c'è praticamente differenza tra temperatura diurna e notturna. La responsabilità di questo torrido calderone, costantemente riscaldato a temperature tranquillamente in grado di fondere il piombo ($T_{\text{fusione}} = 327\text{ }^{\circ}\text{C}$) e persino lo zinco ($T_{\text{fusione}} = 419\text{ }^{\circ}\text{C}$), è del devastante “effetto serra” innescato dall'atmosfera del pianeta.

L'atmosfera di Venere è quasi cento volte più massiccia della nostra (al suolo la pressione è 92 volte quella terrestre) ed è costituita quasi esclusivamente da anidride carbonica. Queste molecole, assorbendo la radiazione termica infrarossa emessa dalla superficie, le impediscono di abbandonare il pianeta, con l'inevitabile conseguenza di un rovinoso aumento della temperatura superficiale. L'atmosfera di Venere, insomma, si comporta proprio come i vetri di un'automobile nei mesi estivi. È esperienza comune che, dovendo risalire in macchina dopo averla lasciata parcheggiata al sole e con i vetri alzati, ci ritroviamo a dover fare i conti con temperature infernali. L'effetto viene proficuamente utilizzato per mantenere un caldo tepore all'interno di una serra, anche nei gelidi mesi invernali ed è per tale motivo che viene chiamato effetto serra.

Per nostra fortuna, purché rimanga a livelli adeguati, anche la Terra sperimenta un benefico effetto serra. Se la situazione termica del nostro pianeta dovesse dipendere unicamente dalla temperatura di equilibrio, infatti, staremmo veramente freschi. Nel vero senso della parola, dato che sperimenteremmo una temperatura media di 250 K, equivalenti a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ sotto lo zero. Per nostra fortuna, la presenza in at-

* 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>.

mosfera dei cosiddetti gas serra (anidride carbonica, vapore acqueo, metano, ...) intrappola parte del calore emesso dalla superficie, impedendogli di disperdersi nello spazio. Il processo è molto efficace e riesce ad innalzare la temperatura media della Terra al confortevole valore di 14 °C, condizione indispensabile per lo sviluppo della vita che noi conosciamo.

L'aspetto problematico è che molti gas serra sono di origine antropica – si pensi per esempio ai clorofluorocarburi (CFC) e molecole simili – e il loro aumento incontrollato finirebbe col potenziare in modo pericoloso l'effetto serra, trasformandolo da effetto benefico per il pianeta in problema estremamente grave. Volendo fare una battuta amara, tra i gas serra figura anche il protossido d'azoto, un gas altrimenti noto come gas esilarante. Ma c'è davvero poco da ridere: secondo l'agenzia americana per la protezione ambientale (EPA), infatti, valutando su un tempo di cento anni il suo potenziale di riscaldamento climatico per unità di massa, risulta 310 volte più significativo di quello dell'anidride carbonica.

Come anticipato, proviamo a calcolare quale potrebbe essere la temperatura di equilibrio di una superficie planetaria. Detto in modo estremamente sbrigativo, dovremo valutare quanta energia proveniente dalla sua stella raccoglie la superficie del pianeta e quanta a sua volta ne riemette sotto forma di radiazione di corpo nero. La temperatura di equilibrio sarà la temperatura alla quale questi due valori saranno uguali, cioè il bilancio energetico della superficie planetaria sarà in pareggio.

Chiamando R_p il raggio del pianeta, avremo che la sua sezione trasversale investita dall'energia della stella sarà πR_p^2 . Inoltre, poiché il pianeta è collocato a una certa distanza (d) dalla stella, la frazione di energia raccolta sarà il rapporto tra la sezione trasversale del pianeta e la superficie della sfera centrata nella stella con raggio d .

Rapporto che, in formule, è dato da:

$$\frac{\pi R_p^2}{4\pi d^2} = \frac{R_p^2}{4d^2} \quad (1)$$

Per calcolare l'energia complessiva emessa dalla stella (praticamente il valore della sua luminosità L_s) facciamo ricorso alla legge di Stefan-Boltzmann. Secondo questa legge, la luminosità di una stella è data da:

$$L_s = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4 \quad (2)$$

dove con R_s abbiamo indicato il raggio della stella, con T_s la sua temperatura superficiale e σ è la costante di Stefan-Boltzmann.

Tenendo conto della (1) e della (2) possiamo esprimere l'energia destinata a investire la superficie planetaria come:

$$E = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4 \cdot \frac{R_p^2}{4d^2} \quad (3)$$

Nella (3) è sottinteso che il pianeta raccolga tutta l'energia che lo investe, ma questo non è affatto vero. Sappiamo bene, infatti, che, tra le proprietà di ogni superficie, comprese quelle planetarie, vi è la capacità di riflettere parte della radiazione che la investe, una caratteristica chiamata "albedo" (A). Visto che, per definizione, una superficie perfettamente riflettente ha albedo pari a 1, la quantità $(1-A)$ indicherà la parte di energia che non viene respinta, ma viene catturata dalla superficie stessa. Questo significa che, per trovare l'energia che effettivamente rimane sulla superficie planetaria e contribuisce al suo bilancio termico (E_{IN}), dobbiamo correggere la (3) moltiplicandola per il fattore $(1-A)$. Otteniamo in tal modo:

$$E_{IN} = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4 \cdot \frac{R_p^2}{4d^2} \cdot (1-A) \quad (4)$$

A questo punto dobbiamo valutare quanta energia emette la superficie planetaria sotto forma di radiazione di corpo nero (E_{OUT}). Anche in questo caso ricorriamo alla legge di Stefan-Boltzmann e, praticamente, riscriviamo la (2) riferendola al pianeta:

$$E_{OUT} = 4\pi R_p^2 \sigma T_p^4 \quad (5)$$

All'equilibrio la radiazione raccolta e la radiazione emessa dovranno essere uguali. Uguagliando dunque la (4) e la (5) ed estraendo opportunamente la radice quarta in entrambi i membri possiamo ottenere l'espressione che ci indica la temperatura di equilibrio della superficie planetaria:

$$T_p = \sqrt[4]{1-A} \cdot T_s \cdot \sqrt{\frac{R_s}{2d}} \quad (6)$$

Si tratta ora di mettere alla prova l'espressione trovata.

Già si è accennato a quanto la presenza dell'atmosfera mantenga lontano dalla temperatura d'equilibrio le superfici di Venere e della Terra. Approfittiamo della (6) per calcolare le temperature di equilibrio per gli altri due pianeti di tipo terrestre del Sistema solare.

Nel caso del pianeta Mercurio, dunque, inserendo nell'espressione il valore della sua albedo (0,138), quello della sua distanza media dal Sole (0,38 UA, dunque $5,7 \times 10^7$ km), la temperatura superficiale della nostra stella (5800 K) e la misura del suo raggio (7×10^5 km), otteniamo per T_p un valore di 438 K. I dati relativi alle temperature superficiali di Mercurio, però, ci dicono che, a causa del suo lento moto rotatorio, vi sono incredibili differenze di temperatura tra l'emisfero soleggiato (465 °C, pari a 738 K) e quello in ombra (-184 °C, pari a 89 K). La superficie, insomma, non riesce ad avvicinarsi a

una situazione di equilibrio termico; curiosamente, se facciamo una media tra i due valori otteniamo comunque una temperatura perfettamente in linea con quella calcolata con la (6).

Se effettuiamo gli stessi calcoli per il pianeta Marte (albedo 0,15 e distanza media dal Sole pari a $2,28 \times 10^8$ km) otteniamo per T_P il valore di 218 K, pari a circa -55 °C. Siamo dunque perfettamente in

linea con i valori medi di temperatura registrati sulla superficie del Pianeta rosso. Complice la rotazione sufficientemente rapida del pianeta (il giorno dura solamente 37 minuti in più di quello terrestre) e l'estrema rarefazione della sua atmosfera (oltre cento volte più rarefatta di quella terrestre), la temperatura della superficie si attesta proprio intorno alla temperatura di equilibrio.

Claudio Elidoro si è laureato in Astronomia presso l'Università di Bologna con una tesi riguardante i Corpi minori del Sistema solare e si è diplomato al Master in Comunicazione Scientifica presso l'Università di Milano. È insegnante di matematica in una scuola professionale di Cremona e svolge attività di divulgazione astronomica scrivendo articoli per riviste del settore. Ha curato la prima parte della versione *online* delle "Spigolature Astronomiche". Nel dicembre 2006 il *Minor Planet Center* ha assegnato il suo nome all'asteroide "(43956) Elidoro".