





# Biologia della specie (*Cataglyphis bombycina*)

- *Cataglyphis bombycina*, la formica d'argento del deserto del Sahara, del Sinai e dei deserti della Penisola Arabica, è famosa per la sua capacità di resistere a temperature estremamente elevate. Le operaie escono dal nido durante il periodo più caldo del giorno, quando le temperature superano i 50°C, per cercare corpi di animali colpiti dal caldo. Questa specie riesce a limitare rigorosamente il tempo di esposizione alla luce solare e al calore irradiato dalla sabbia; è dotata di zampe molto lunghe che le permettono di mantenere il corpo ad una distanza maggiore dalla superficie calda e di percorrere lunghe distanze più velocemente riducendo la durata dei tragitti e massimizzano il raffreddamento per convezione. Prima di uscire dal nido produce proteine da shock termico, evitando così un lento adattamento all'improvvisa esposizione al calore.





# Introduzione

- Le formiche argentate vivono in condizioni di temperature desertiche estreme; Il loro vistoso aspetto argenteo è il risultato di una fitta schiera di peli triangolari che migliorano non solo la riflettività della superficie corporea nella gamma dello spettro visibile e vicino infrarosso (NIR) dove culmina la radiazione solare, ma anche l'emissività nel medio infrarosso (MIR).
- Si vuole indagare su come le proprietà ottiche, geometriche e di alta riflessione, portino al colore brillante in *C.bombycina*.
- Si mostra, attraverso misurazioni ottiche e termodinamiche, che le proprietà di riflessione dei peli sono soddisfatte e migliorate dalla presenza di una superficie ondulata che garantisce una riflessione speculare quasi totale per una vasta gamma di angoli di incidenza. Questo garantisce una riflessione della luce 10 volte maggiore.
- Questo studio migliora la comprensione dei meccanismi ottici responsabili del colore argento in *C.bombycina* e delle notevoli proprietà termoregolatore del pelo che può portare allo sviluppo di rivestimenti biomimetici per il raffreddamento radiativo passivo di oggetti.



# Materiali e metodi

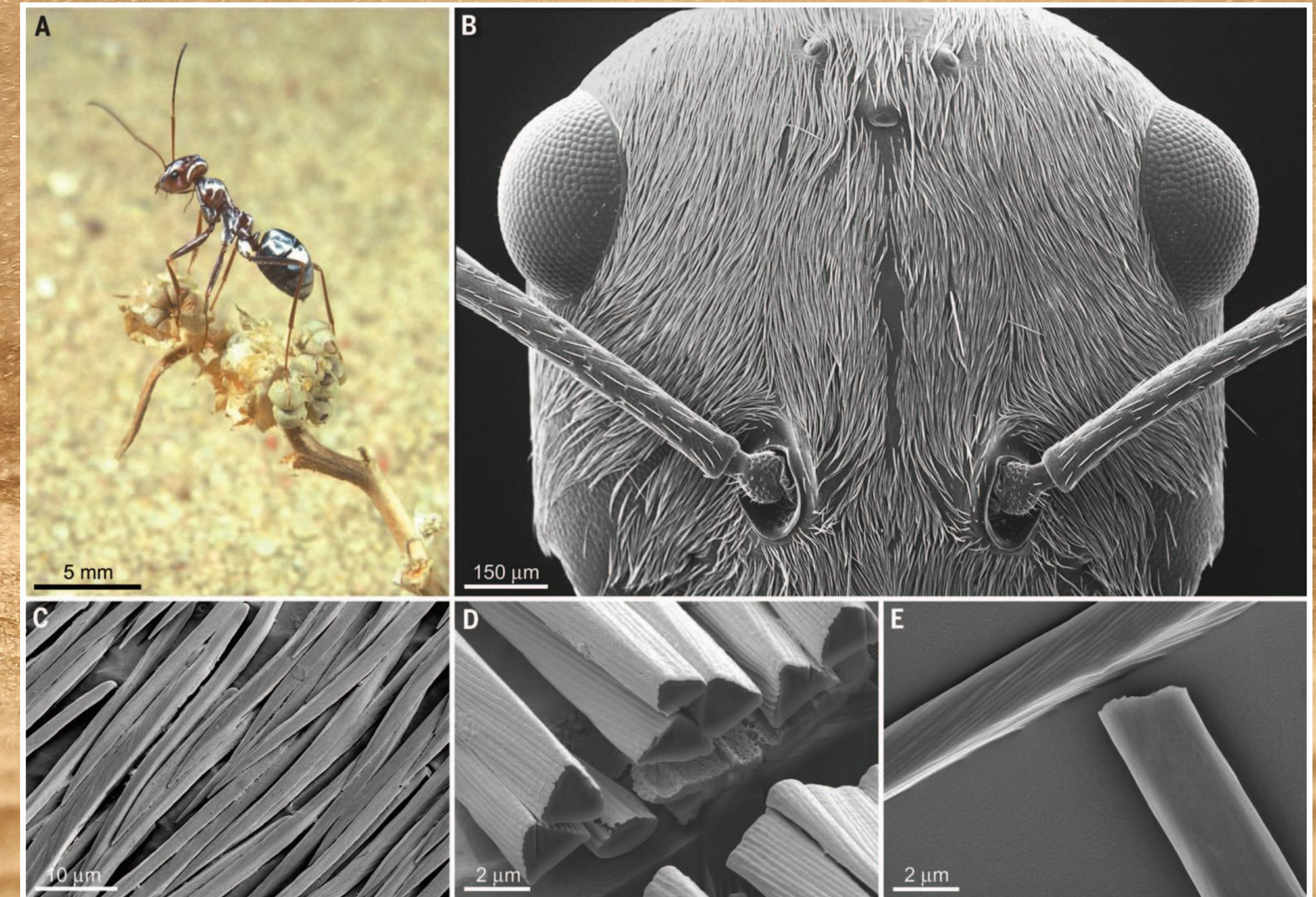
- Per poter **confrontare Riflettanza e Tasso di Riscaldamento** sono stati rimossi i peli da alcuni esemplari raccolti in Tunisia, strofinando un ago smussato di tungsteno lungo la pelle delle formiche. I peli si staccano facilmente e si attaccano elettrostaticamente all'ago. Non vi è alcuna perdita di materiale cuticolare dai campioni di formiche.
- Le **Misurazioni della Riflettività Ottica** sono state ottenute tramite due spettrometri a infrarossi a trasformata di Fourier (FTIR). Per lo spettro del visibile e vicino infrarosso (NIR) e per l'emissività nel medio infrarosso (MIR), la riflettività dei campioni è stata misurata in funzione dell'angolo di incidenza.
- Esperimento **Risonanze di Mie** in peli triangolari. Spettro di riflettività per una serie di peli triangolari con luce incidente polarizzata TE. I picchi negli spettri sono dovuti alle risonanze di Mie nei peli triangolari.
- Nelle **Misurazioni Termodinamiche** sono stati imitati tutti gli effetti di trasferimento di calore radiativo che le formiche sperimentano nel loro ambiente naturale. Per simulare la radiazione solare è stata utilizzata una lampada allo xeno (Thorlabs HPLS-30-04). Per simulare la radiazione di fondo di un cielo sereno è stata utilizzata una piastra metallica raffreddata termoelettricamente (TE Technology CP-200) mantenuta a 5°C. I campioni sono stati sospesi su sottili capelli umani per ridurre al minimo la conduzione termica. Le misurazioni sono state condotte sia in aria ferma che in una camera a vuoto (Janis ST-100).
- Esperimento **wetting and drying cycle** per dimostrare come la riflettività fosse influenzata dalla presenza di un fluido. Come fluido di emersione è stata utilizzata una soluzione di etanolo 70% e acqua 30%.



# Risultati e Discussione

## 1 | Morfologia dei peli

- Le analisi al SEM confermano che i peli assumono una sezione trasversale triangolare con una lunghezza di 200-300  $\mu\text{m}$ , sono allineati localmente nella stessa direzione e si assottigliano gradualmente sulla punta. Le due superfici superiori presentano scanalature che aumentano ulteriormente la riflessione della luce solare mentre la faccia inferiore ne è priva.

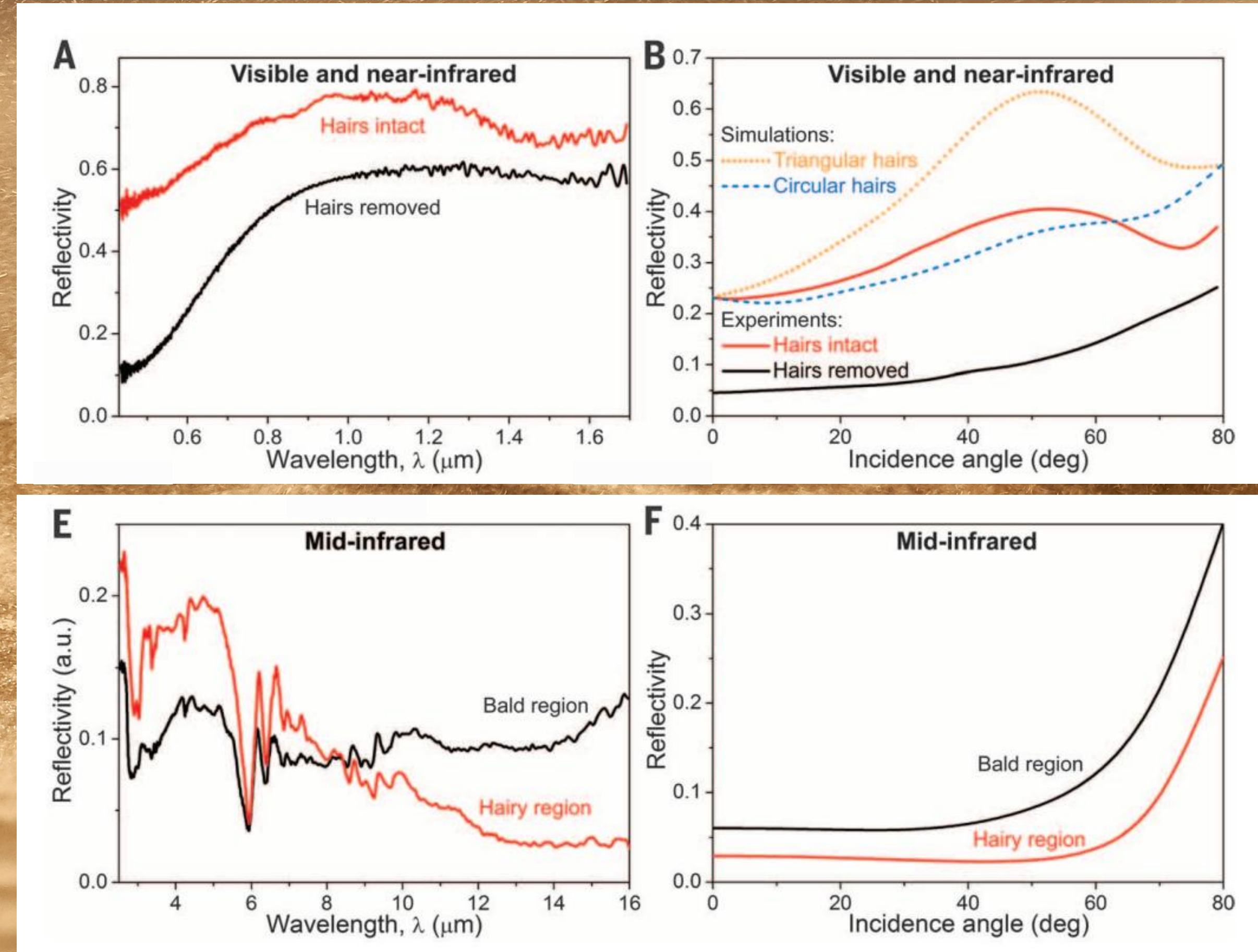


**Fig. 1.** Il bagliore luminoso della formica d'argento e la sua base strutturale. **(A)** Formica d'argento che scarica calore sulla vegetazione secca. **(B)** vista frontale SEM della testa fittamente ricoperto di peli. **(C)** Immagine SEM dei peli che si assottigliano gradualmente verso la punta. **(D)** Vista in sezione trasversale dei peli fresati con FIB. **(E)** Immagine SEM di due peli; uno capovolto per mostrare la sfaccettatura inferiore piatta.



## 2 | Misurazioni sulla Riflettività Ottica

- Le misurazioni del visibile e del NIR hanno mostrato che la riflessione è sostanzialmente migliorata nelle regioni con copertura di peli rispetto a regioni da cui erano stati rimossi.
- Le misure di riflettività eseguite nella gamma MIR hanno rivelato che procedendo da lunghezze d'onda inferiori a superiori, la maggiore riflettività delle regioni con copertura di peli rispetto a quelli senza si invertono a riflettività ridotta.
- Una riflettività ridotta corrisponde ad una maggiore emissività.

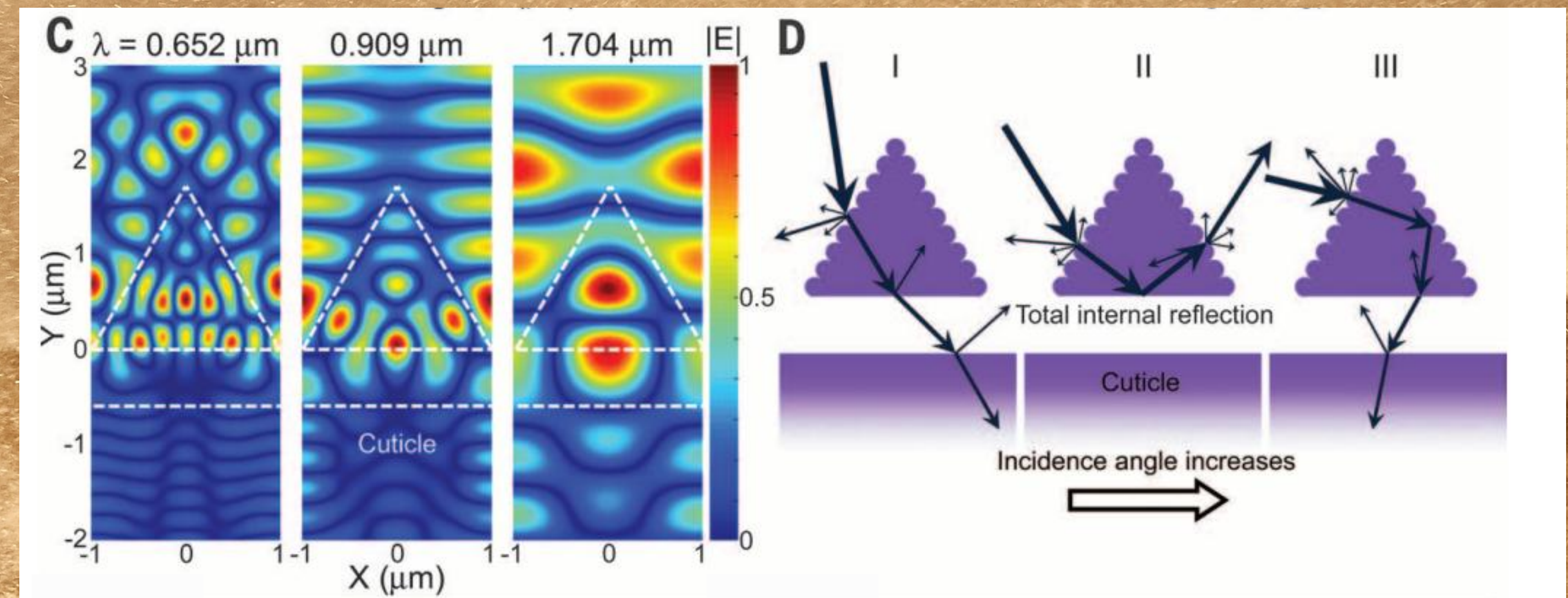


**Fig. 2.** Riflettività della superficie corporea della formica d'argento dal campo visibile a quello MIR dello spettro. **(A)** Riflettività misurata nel visibile e nel NIR. **(B)** Risultati di misurazione e simulazione che mostrano la riflettività visibile e NIR in funzione dell'angolo di incidenza. **(E)** Riflettività misurata nel MIR a incidenza normale. **(F)** Riflettività MIR simulata in funzione dell'angolo di incidenza.



### 3 | Risonanze di Mie

- La dispersione di Mie migliora la riflettività su tutti gli angoli nelle regioni con copertura dei peli rispetto alle regioni con peli rimossi. Con l'aumento dell'angolo di incidenza, il miglioramento della riflettività diventa particolarmente forte oltre i 30°. Questo è l'angolo critico a cui la riflessione interna totale inizia a verificarsi nella parte inferiore dei peli.

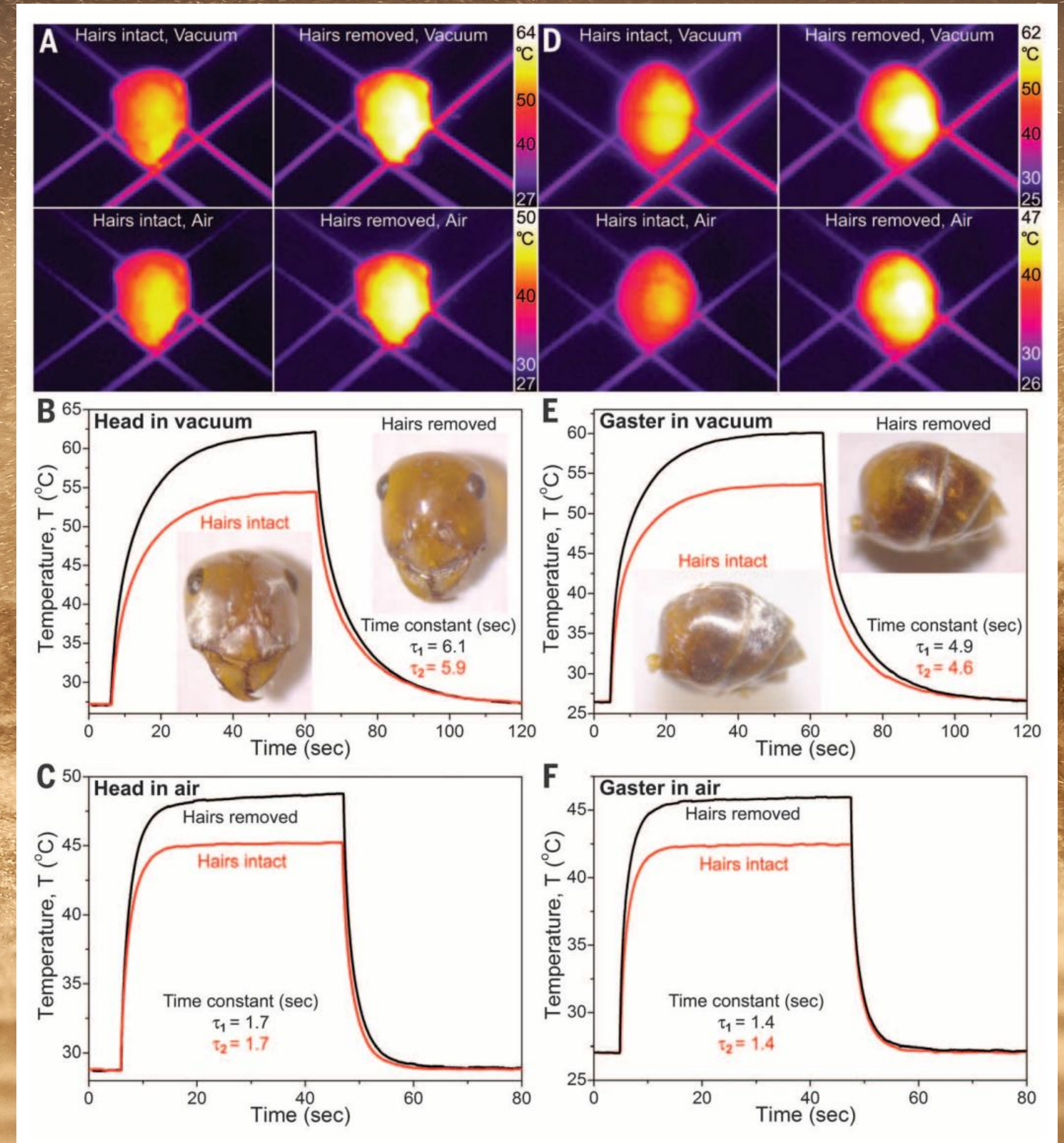


**Fig. 2. (C)** Vista in sezione trasversale di una distribuzione bidimensionale di un campo luminoso attorno ad un pelo triangolare per tre risonanze Mie. **(D)** Diagramma schematico che mostra l'interazione tra luce visibile e NIR e un pelo ad angoli di incidenza piccoli (I), intermedi (II) e grandi (III). Le due facce superiori ondulate possono aumentare la riflessione diffusa nelle gamme dell'ultravioletto e del visibile.



## 4 | Misurazioni Termodinamiche

- Le costanti di tempo indicano un aumento della velocità di trasferimento di calore radiativo e sono una conferma diretta dell'effetto dei peli nel migliorare l'emissività MIR. Utilizzando le costanti di tempo e il modello di trasferimento del calore, abbiamo calcolato che la copertura dei capelli aumenta l'emissività di circa il 15%.
- I peli ricoprono solo la parte superiore dei lati del corpo della formica. L'assenza di peli sulla superficie inferiore riduce il trasferimento di energia radiativa tra la sabbia calda e il corpo più freddo delle formiche, in modo che gli animali possano ridurre l'assorbimento della radiazione di corpo nero dal suolo del deserto.

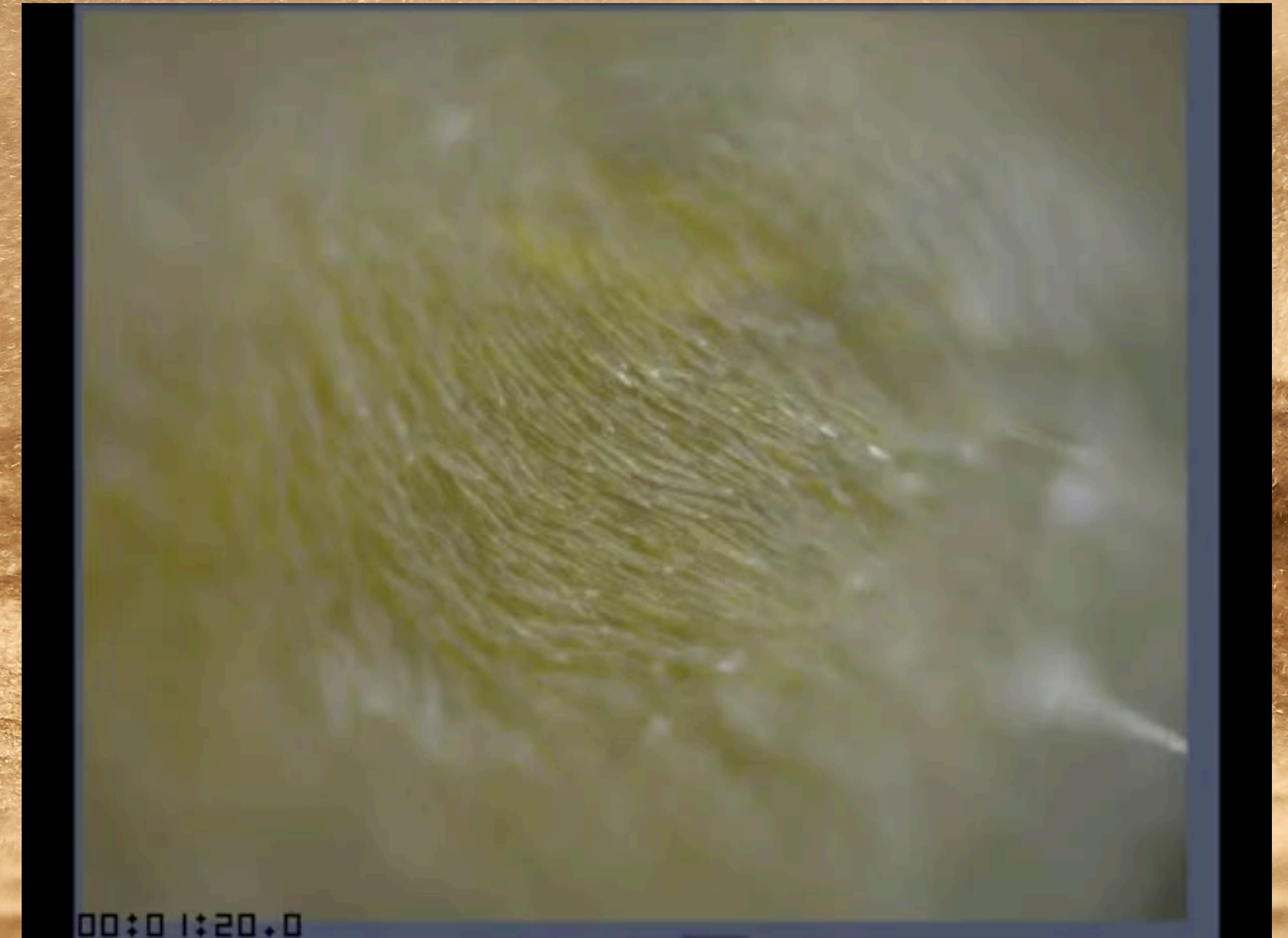


**Fig. 3.** Risultati di esperimenti termodinamici. **(A)** Immagini della termocamera che mostrano la testa di un esemplare di formica allo stato stazionario termico in condizioni diverse. Vengono mostrati i profili di temperatura temporale misurati per la testa prima e dopo la depilazione nel vuoto **(B)** e nell'aria ferma **(C)**. **(D, E, F)** Risultati ottenuti per la parte posteriore (gaster) di un esemplare di formica. Gli inserti in **(B)** ed **(E)** sono foto di campioni prima e dopo la depilazione.



## 5 | Wetting and Drying Cycle

- L'elevata riflettività è scomparsa quando i campioni sono stati bagnati con una soluzione di etanolo-acqua, che rimuoveva il contrasto dell'indice di rifrazione tra aria e capelli e quindi distruggevano le condizioni richieste per la diffusione di Mie e riflessione interna totale.





# Conclusioni

- In conclusione, le formiche argentate del Sahara sono ricoperte da una fitta schiera di peli triangolari sulla parte superiore e sui lati del corpo. Questi peli argentati proteggono le formiche dal surriscaldamento in almeno tre modi. In primo luogo, come risultato della dispersione di Mie e della totale riflessione interna, i peli migliorano la riflettività nel visibile e nel NIR, dove culmina la radiazione solare. In secondo luogo, nel MIR, dove la radiazione solare diventa trascurabile, i peli, che agiscono come uno strato antiriflesso migliorano l'emissività e quindi aumentano la capacità delle formiche di scaricare il calore in eccesso tramite la radiazione del corpo nero. In terzo luogo, la superficie inferiore del corpo, priva di peli, riflette la radiazione MIR dal pavimento caldo del deserto in modo più efficiente. Questi effetti provocano una diminuzione della temperatura corporea stazionaria delle formiche e consentono quindi di sopportare temperature ambientali estremamente elevate.
- Questo studio potrebbe avere un impatto tecnologico significativo ispirando lo sviluppo di rivestimenti biomimetici per il raffreddamento passivo degli oggetti. Un recente articolo riportava la creazione di una pellicola multistrato in grado di raffreddare un oggetto utilizzando gli stessi meccanismi delle formiche d'argento: alta riflettività nello spettro solare ed elevata emissività nel MIR.



# Grazie per l'attenzione

