

# IL RAFFREDDAMENTO RADIATIVO

RECENTI RICERCHE HANNO CONFERMATO, IN VIA SPERIMENTALE, CHE PARTICOLARI SUPERFICI RIFLETTENTI AD ALTA EFFICIENZA RIESCONO AD OTTENERE UN EFFETTO RADIATIVO RAFFREDDANTE ANCHE NELLE ORE CALDE DELLA GIORNATA. LA TECNOLOGIA, SE VALIDATA, POTRÀ FORNIRE UN ENORME SGRAVIO ENERGETICO NEL SETTORE DELLA CLIMATIZZAZIONE CIVILE.

I raffreddamento climatico degli ambienti nel settore civile comporta un impatto sempre maggiore nel consumo globale di energia, risultando altresì anche una delle principali cause dei picchi della domanda di energia elettrica. Negli Stati Uniti l'uso dell'aria condizionata, ad esempio, rappresenta quasi il quindici per cento dell'energia primaria utilizzata negli edifici.

Diviene così vitale nel campo dell'efficienza energetica, lo sviluppo di tutte quelle soluzioni definite passive, in quanto prive di sistemi/soluzioni che necessitano di energia per il loro funzionamento, che consentono di minimizzare i consumi di energia elettrica, determinati proprio dal massiccio ricorso all'aria condizionata per il raffrescamento degli edifici, quota questa particolarmente significativa nei grandi agglomerati urbani.

Ecco dunque che lo sviluppo di una strategia di raffreddamento passivo che permette di "diminuire/contenere" le temperature in ambiente senza necessitare di alcun contributo di energia elettrica, potrebbe portare ad un impatto significativo sul consumo globale di energia.

Alla luce di queste considerazioni si stanno investigando sempre più a fondo le grandi potenzialità (in parte ancora inesplorate) della meccanica quantistica, e in particolare l'influenza termica delle radiazioni elettromagnetiche, che pur nella loro complessità, assumono un certa importanza anche nel mondo della climatizzazione passiva in virtù dei possibili straordinari sviluppi che stanno dimostrando di procurare nel settore delle energie rinnovabili.

In questa direzione è stato sviluppato il concetto di raffreddamento radiativo, fenomeno studiato ormai da decenni, nel quale si evidenzia il raffreddamento subito da un elemento attraverso l'emissione di radiazioni "trasparenti" all'atmosfera verso lo spazio siderale per determinati spettri d'onda com-

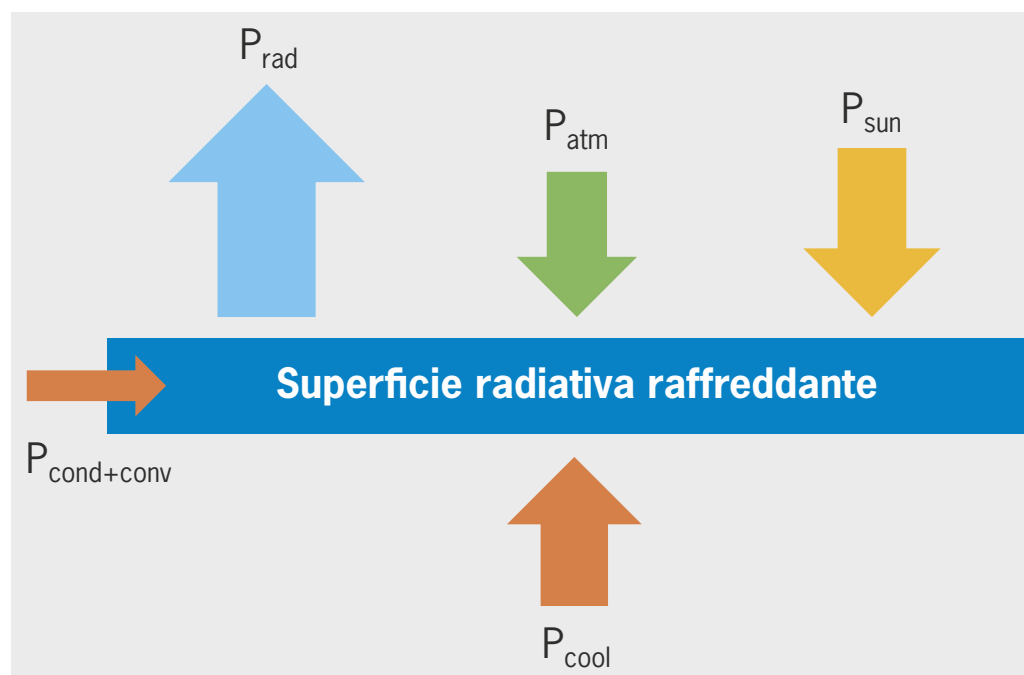


Fig. 1 - Bilancio energetico ottenuto dallo specchio raffreddante fotonico radiativo. Il contributo della componente  $P_{rad}$  è responsabile del processo di raffreddamento.

presi tra 8 e 13 micrometri.

In particolare è ormai noto il fenomeno del raffreddamento radiativo notturno, nel quale la superficie terrestre, favorita da determinate condizioni di cielo terso e scarsa umidità, riesce ad "espellere" quantità considerevoli di calore nello spazio profondo.

Partendo da queste considerazioni, dagli anni ottanta il raffreddamento radiativo viene utilizzato con determinate coperture verniciate in metallo che riescono ad "espellere" calore dagli edifici irraggiando a lunghezze d'onda che possono oltrepassare senza ostacoli l'atmosfera terrestre. Il limite del sistema è sempre stata la forte penalizzazione nelle ore diurne, dovuta all'assorbimento della luce solare diretta e conseguente riscaldamento, cioè proprio quando viceversa è decisamente maggiore la richiesta di raffreddamento.

D'altra parte, per ottenere un significativo raffreddamento diurno bisogna progettare una speciale struttura fotonica che risulti simultaneamente uno specchio a banda larga per la luce solare e un forte emettitore termico nella finestra di trasparenza dell'atmosfera.

Questo è stato il compito della prova condotta dai ricercatori della Università di Stanford, i quali hanno realizzato un foglio rivestito da una struttura foto-

nica integrata che riflette le radiazioni solari anche nelle ore diurne, consentendo al processo di raffreddamento radiativo di continuare a funzionare anche in presenza dei "caldi" raggi solari.

L'esperimento ha dimostrato una volta di più che lo spazio freddo interstellare può essere utilizzato come un elemento fondamentale per migliorare l'efficienza energetica sul nostro pianeta, anche attraverso un migliore utilizzo delle risorse termodinamiche rinnovabili.

Nel seguito dell'articolo si rende conto della ricerca di questo gruppo di scienziati della Stanford University che hanno sperimentato di poter raffreddare un sistema esposto la luce solare diretta con il processo passivo del "raffreddamento fotonico radiativo", di circa 5 gradi Celsius al di sotto della temperatura ambiente.

## Il bilancio energetico

Per ottenere l'effetto del raffreddamento fotonico radiativo durante le ore diurne, un dispositivo (prototipo) deve

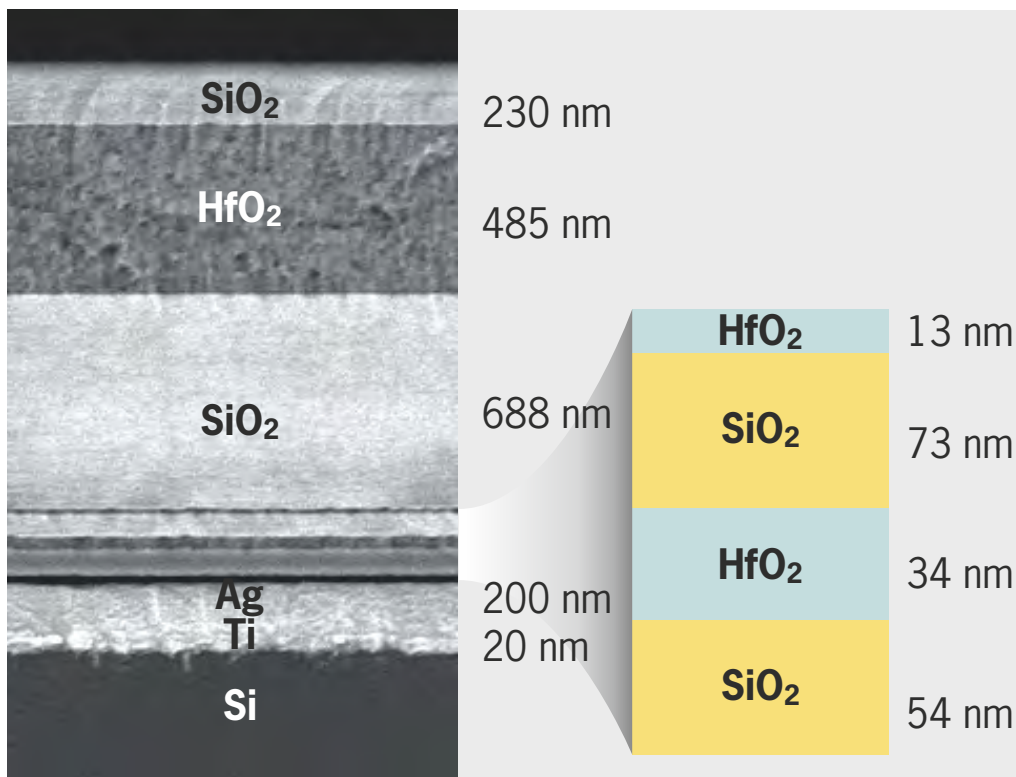


Fig. 2 - Vista al microscopio della disposizione e degli spessori dei materiali componenti lo speciale specchio fotonico raffreddante radiativo (Stanford University).

soddisfare una serie di vincoli molto rigorosi imposti dal bilancio energetico (figura 1) espresso dall'equazione:

$$P_{cool}(T) = P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{sun} - P_{cond+conv}$$

dove  $P_{cool}(T)$  rappresenta la potenza raffreddante netta ottenuta dal dispositivo.

Nell'equazione la  $P_{rad}(T)$  definisce la potenza irradiata dal prototipo verso l'atmosfera, viceversa  $P_{atm}(T_{amb})$  risulta quella assorbita a seguito dell'incidenza termica delle radiazioni diffuse dall'atmosfera e  $P_{sun}$  rappresenta la potenza incidente del sole.  $P_{cond+conv}$  è invece la potenza (non radiativa) assimilata per convezione e conduzione. Dalla relazione è facile dunque immaginare che per massimizzare il raffreddamento radiativo, il prototipo deve essere in grado in primis di ottenere una forte riflessione della luce solare al fine di ridurre al minimo il valore di  $P_{sun}$ . Deve pertanto risultare fortemente riflettente nell'intervallo di

lunghezza d'onda visibile e in quelli prossimi all'infrarosso.

In secondo luogo, è necessario che il prototipo emetta un valore elevato di radiazione termica  $P_{rad}$ , riducendo nel contempo al minimo la radiazione termica atmosferica incidente  $P_{atm}$ , operazione questa che richiede una riduzione al minimo dell'energia termica emessa nelle lunghezze d'onda dove l'atmosfera risulti non trasparente (opaca).

Così il dispositivo deve poter emettere selettivamente e in grandi quantità, energia radiativa possibilmente solo tra le lunghezze d'onda comprese tra gli 8 mm e i 13 mm, dove l'atmosfera risulta trasparente, e viceversa ridurla ai valori minimi nelle altre lunghezze d'onda.

Queste caratteristiche termodinamiche richieste al dispositivo pongono dei seri limiti naturali alla sua realizzazione e funzionalità. Si ricorda inoltre che la trasmissione termica radiativa varia in funzione della quarta potenza della temperatura ( $T^4$ ) e il sole, con una temperatura di 5.777 K, emette così di gran lunga una maggiore quantità di energia radiativa rispetto alla terra, che in genere ha una temperatura di

circa 300 K. Per questo, supponendo di avere idealmente un dispositivo emettitore selettivo che diffonde solo nella finestra di trasparenza atmosferica prima indicata, oltre il 90% della luce solare incidente deve essere riflessa per mantenere il dispositivo alla temperatura ambiente.

In pratica, per ottenere l'effetto di un raffreddamento radiativo diurno significativo, oltre il 94% della luce solare deve essere riflessa, questo anche in virtù delle diverse condizioni atmosferiche riscontrabili nelle differenti aree geografiche.

Il risultato è particolarmente difficile da ottenere soprattutto se combinato con l'obiettivo di una forte emissione radiativa concentrata nella finestra di trasparenza dell'atmosfera.

Ultima considerazione, ma certamente non trascurabile, il dispositivo di raffreddamento radiativo deve essere ben sigillato dall'ambiente circostante per ridurre al minimo il valore di  $P_{cond$

+ conv\*

Questo vincolo presenta una sfida progettuale impegnativa nelle giornate soleggiate dato che la maggior parte delle superfici che potrebbero trovarsi a contatto con il dispositivo di raffreddamento radiativo si riscaldano quando vengono esposte alla luce solare e trasferiscono questo calore aggiunto al dispositivo di raffreddamento.

Queste severe condizioni sono state alla base del fallimento di tutte le precedenti sperimentazioni, le quali utilizzando riflettori metallici ed emettitori termici convenzionali dotati di copertura riflettente, hanno dimostrato di non essere in grado di ottenere i medesimi risultati di raffreddamento nelle ore diurne.

### Il prototipo fotonico

I ricercatori della Stanford University utilizzando un approccio definito "fotonico termico", hanno così realizzato un nuovo materiale ultrasottile e trasparente, capace di respingere la luce solare direttamente nello spazio cosmico, in modo da poter diminuire la temperatura dell'ambiente sottostan-

te. Si tratta di un materiale multistrato della misura di appena 1,8 micron di spessore (inferiore ad un foglio "domopack"), realizzato con biossido di silicio, ossido di afnio e argento.

La superficie a specchio del dispositivo è capace di reagire sia allo spettro visibile che a quello invisibile della luce. La diffusione del calore avviene infatti sia attraverso le radiazioni percepibili dall'occhio umano, come i raggi solari, sia attraverso onde non intercettabili dal nostro apparato visivo, come i raggi infrarossi, tipo quelli che si propagano dal forno della nostra cucina.

Il dispositivo di raffreddamento radiativo fotonico è costituito da sette strati alternati di biossido di afnio ( $\text{HfO}_2$ ) e biossido di silicio ( $\text{SiO}_2$ ) di vari spessori, posti sopra a 200 nm di argento (Ag). Gli strati sono poi tutti depositati su un wafer di silicio spesso 200 mm (figura 2).

Il biossido di afnio funge da materiale ad alto indice di rifrazione e presenta anche basso assorbimento alle radiazioni ultraviolette, funzione utile quando si ottimizza per la riflettanza solare, mentre il biossido di silicio è otticamente trasparente ed è viceversa un materiale a basso indice di rifrazione. L'uso del biossido di afnio non risulta essenziale, e può essere sostituito con biossido di titanio ( $\text{TiO}_2$ ), in quanto più economico.

Gli spessori dei primi tre strati sono maggiori e sono soprattutto responsabili della radiazione termica dal raffreddatore, attraverso una combinazione di proprietà dei materiali ed effetti di interferenza.

La combinazione di tutti questi strati si traduce in una struttura che nell'insieme consente un'alta riflettanza solare e una forte emissione termica. Lo spettro sperimentale di assorbimento/emissione dovuto all'effetto del raffreddamento radiativo fotonico viene mostrato in figura 3.

Il dispositivo di raffreddamento mostra un minimo assorbimento nelle lunghezze d'onda da 300 nm a 4 mm, riflettendo il 97% della potenza solare

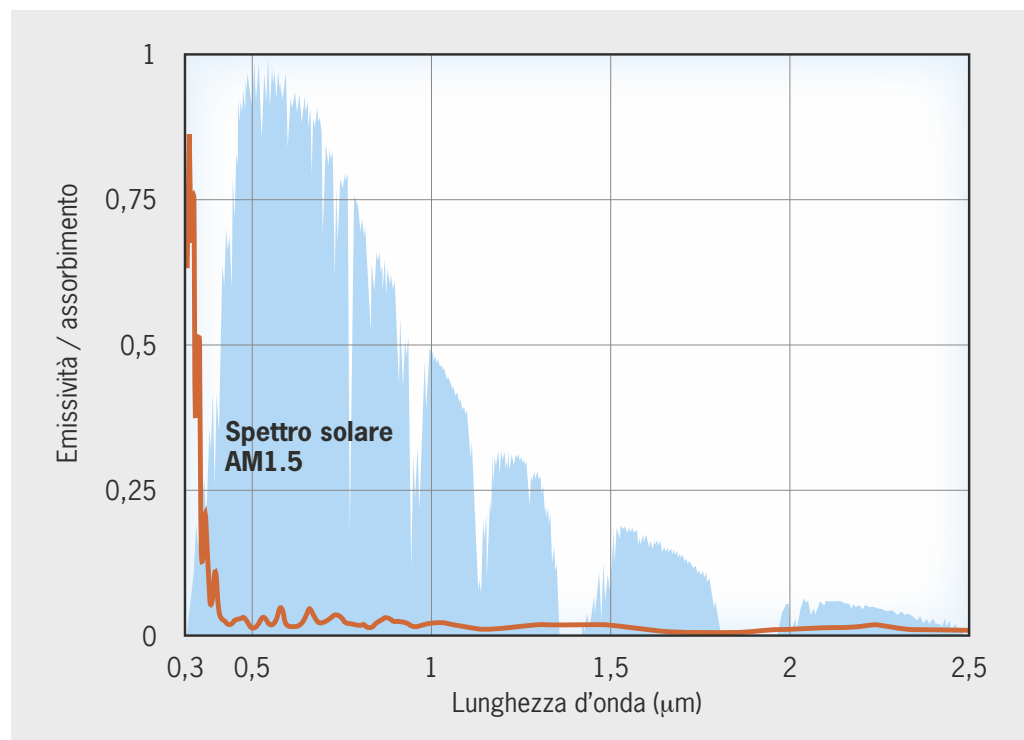


Fig. 3 - Lo spettro sperimentale della emissività/assorbimento dovuto all'effetto del raffreddamento radiativo (Stanford University).

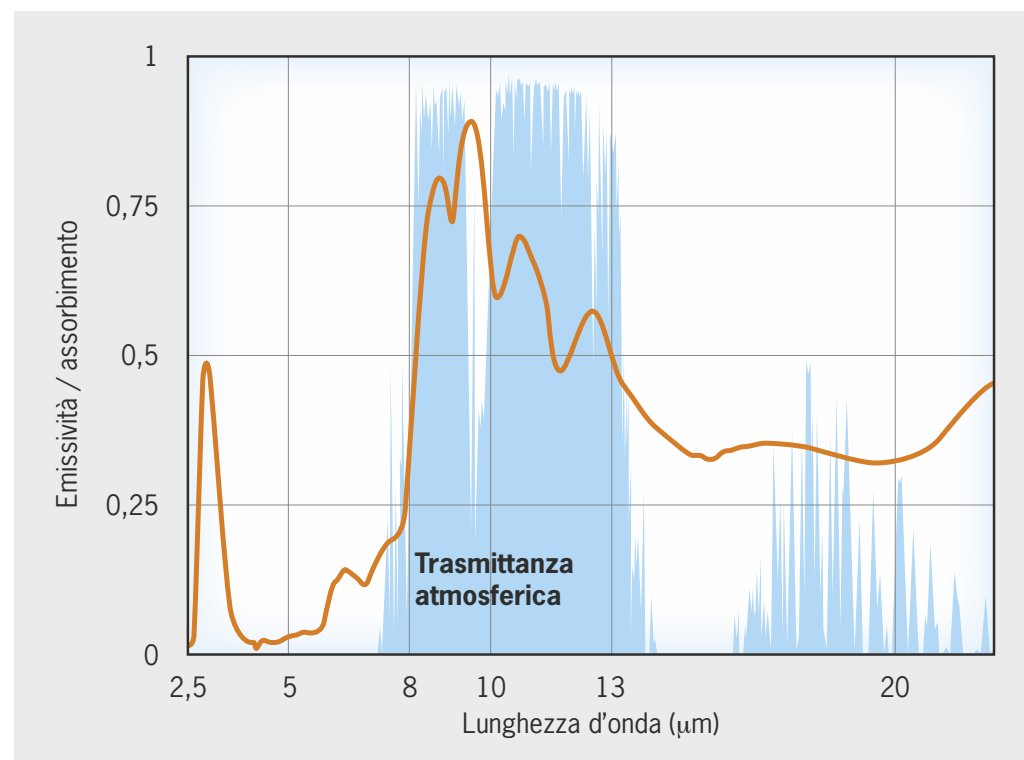


Fig. 4 - Finestra di trasmittanza della diversa lunghezza d'onda elettromagnetica nella atmosfera. Si noti che nell'intervallo compreso tra gli 8 mm e i 13 mm l'atmosfera non assorbe (trasparente) l'energia emessa.

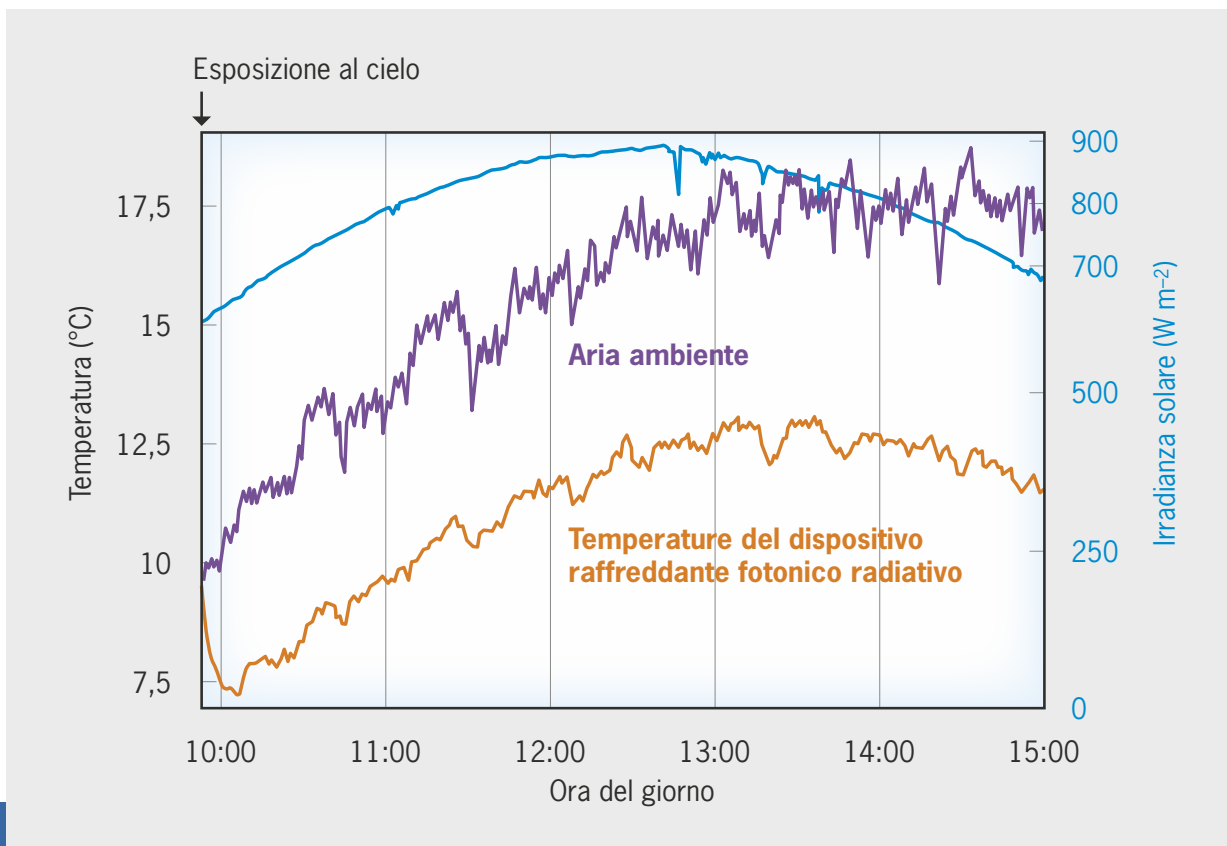


Fig. 5 - La temperatura del dispositivo raffreddante fotonico radiativo risulta mediamente nell'arco della giornata inferiore di quasi 5 °C rispetto alla temperatura dell'aria ambiente.

incidente. In figura 4, si osserva come il dispositivo risulti notevolmente selettivo nella finestra atmosferica tra gli 8 mm e i 13 mm.

### I risultati

Il team dei ricercatori ha “testato” le prestazioni del sistema di raffreddamento radiativo fotonico in una limpida giornata invernale a Stanford, in California. Il dispositivo è stato posizionato sul tetto dell'edificio ed così esposto alle radiazioni solari durante le ore diurne.

Confrontando la temperatura del suo stato-stazionario con quella dell'ambiente, come indicato nei dati riportati nel grafico di figura 5, il prototipo quasi immediatamente (poco prima delle 10 del mattino), ha diminuito la propria temperatura di circa 4° - 5° Celsius al di sotto della temperatura dell'aria ambiente, nonostante si era già in pre-

senza di un significativo irraggiamento solare incidente.

Durante tutta la giornata, con un irraggiamento solare che è rimasto compreso tra gli 800 - 870 Wm<sup>2</sup>, il prototipo ha mantenuto la propria temperatura mediamente di 4.9 °C ± 0,15 °C al di sotto della temperatura dell'aria ambiente circostante.

Per confronto sono stati testati due ulteriori dispositivi rivestiti con vernici nero carbonio e di alluminio. Nel primo caso la temperatura nell'arco della giornata è salita fino a 80 °C, mentre con l'alluminio si è stabilizzata sui 40 °C (figura 6). Questi due casi stanno a dimostrare quanto la temperatura del tetto aumenti nell'arco della giornata, anche in presenza di materiale con forte riflessione solare come l'alluminio.

Il bilancio termico complessivo dell'esperimento ha dunque dimostrato che il dispositivo con rivestimento fotonico è in grado di generare una potenza raffreddante di circa di 40,1 Wm<sup>2</sup>

### Altre possibili applicazioni

La tecnologia sviluppata dai ricercatori della Stanford University ha trovato

subito immediata applicazione nella possibilità di migliorare le prestazioni energetiche dei pannelli solari.

Infatti le celle fotovoltaiche, esposte ad un accentuato riscaldamento dovuto alle radiazioni solari, sono soggette ad una diminuzione della loro efficienza nel convertire i fotoni solari in energia elettrica.

La tecnologia fotonica sperimentata a Stanford viceversa aiuta ad espellere il calore generato sui pannelli solari e raffreddandoli, consente di recuperare una maggior efficienza nel processo di produzione dell'energia elettrica.

È infatti sufficiente ricoprire la cella fotovoltaica tradizionale con i sottili strati fotonici trasparenti per far sì che il calore solare incidente sulla cella venga rimesso nello spazio sotto forma di radiazione infrarossa. Questo processo raffredda la cella.

La soluzione ha mostrato che il rivestimento termico consente alla luce visibile di passare attraverso le celle solari, raffreddando l'assorbitore sottostante di ben 12 °C. Un tale abbassamento della temperatura comporta un miglioramento dell'efficienza della

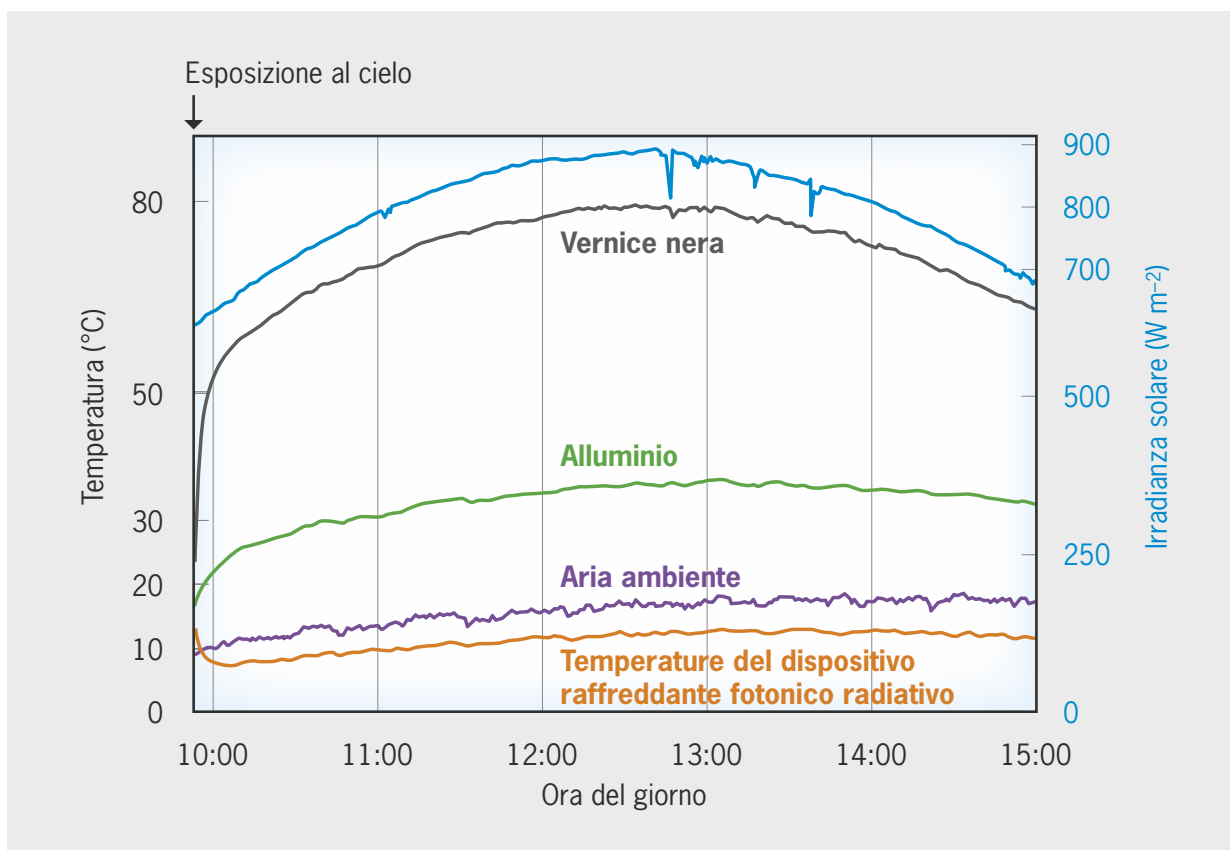


Fig. 6 - Confronto tra le temperature raggiunte da rivestimenti con vernice nero carbone, alluminio e dispositivo raffreddante fotonico radiativo. A differenza dei rivestimenti in vernice e alluminio, il dispositivo fotonico assicura costantemente una temperatura minore rispetto all'aria ambiente circostante.

singola cella dell'1%, che nonostante sembri un valore esiguo, porta ad un aumento significativo nella produzione totale di energia di ciascun impianto.

I ricercatori sostengono che i rivestimenti termici trasparenti funzionano meglio in ambienti asciutti e luminosi, situazioni ideali per qualsiasi impianto fotovoltaico, per questo motivo ritengono di poter riprodurre il modello in scala ed applicarlo per esempio a centri commerciali e siti industriali utilizzando la nanostampa litografica, una tecnica comune per la produzione di modelli su scala nanometrica. Vi sono poi altri significativi potenziali utilizzi su qualsiasi dispositivo da esterno che richieda raffreddamento e la conservazione dello spettro visibile della luce solare, sia per motivi pratici che estetici.

Un esempio è dato anche dal colore delle automobili, che una volta rivestite con questa speciale pellicola termica, pur restando soggetto ad un raffreddamento passivo, non viene modificata la percezione del colore dell'auto in quanto risulta differente lo

spettro elettromagnetico su cui agisce il rivestimento.

Infatti il rivestimento fotonico termico, ottimizza l'uso delle porzioni termiche dello spettro elettromagnetico, senza influenzare la luce visibile.

## Conclusioni

Il raffreddamento passivo degli ambienti posti al di sotto di coperture esposte all'irraggiamento solare, è ora reso possibile attraverso un approccio fotonico termico.

Grazie ad un riflettore solare fotonico integrato con un emettitore termico è possibile assicurare un raffreddamento radiativo alla struttura di circa 4,9 °C al di sotto della temperatura ambiente, producendo una potenza di raffreddamento stimata in 40.1 Wm<sup>-2</sup>

Il risultato dell'esperimento dimostra che è possibile "sfruttare" la fredda oscurità dell'universo come una speciale risorsa termodinamica, anche nelle ore più calde della giornata.

Questo risulta maggiormente valido nelle aree più isolate del pianeta o nei paesi in via di sviluppo, dove non sempre risulta fruibile agevolmente

dell'energia elettrica, e dove il raffreddamento radiativo durante le ore diurne offre la possibilità nella conservazione delle derrate alimentari o dei farmaci.

Un'analisi preliminare indica che il sistema potrebbe risultare competitivo in termini economici rispetto ad altre soluzioni che utilizzano l'energia rinnovabile come i pannelli fotovoltaici, ma anche di una possibile e ampia sinergia con essi. ■

© RIPRODUZIONE RISERVATA

## Bibliografia

Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight – Aswath P. Raman, Marc Abou Anoma, Linxiao Zhu, Eden Rephaeli, Shanhui Fan – Nature vol. 515 – Novembre 2014, USA