

OHLAJANJE S SEVANJEM

MAJ LEANDRO KLANČNIK KUNSTELJ

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

Vse večji vpliv podnebnih sprememb na okolje podaja zahtevo po energetsko učinkovitejših hladilnih sistemih. V zadnjih letih je vedno pogostejši predmet raziskav ohlajanje s sevanjem; predvsem zato, ker dopušča oddajanje toplote z zemeljskega površja v hladni Kozmos brez potrebe po dovajanju energije. V prvem delu članka so predstavljeni zakoni, ki določajo termodinamiko seval v naravi. Z njihovo pomočjo so opredeljeni in matematično opisani vplivi tipične okolice na telo na zemeljskem površju. V nadaljevanju je predstavljen teoretičen model sevalnega hladilnega sistema, na osnovah katerega deluje večina obstoječih projektov, v zadnjem delu članka pa so postavljeni pod drobnogled še dosežki in inovacije raziskav na področju ohlajanja s sevanjem.

RADIATIVE COOLING

The ever increasing effect of climate change upon the environment calls for the use of more efficient cooling systems. Lately, research into radiative cooling as one of the possible solutions has been evermore frequent; cooling via radiation provides us a way to emit heat into the cold Cosmos without any energy input. In the first part of the paper the fundamental laws of physics pertaining to the thermodynamics of emitters in nature are presented. Thus, the effects a typical environment on Earth's surface has on an observed body are identified and mathematically described. Going forward, a theoretical model of a radiation-based cooling system, upon the principles of which most existing projects rely, is explored, ending with a deeper dive into the results and innovations of research made in the field of radiative cooling.

1. Uvod

V naravi se pri opisu stanja nekega telesa ali sistema dostikrat obregnemo v količino, ki ji pravimo temperatura. V vsakdanjem življenju je koncept temperature za nas ljudi samoumeven; predmeti z nižjimi temperaturami od naše so hladnejši in z višjimi – toplejši. Sicer pa je v splošnem temperatura merilo za notranjo energijo, prisotno v vsej snovi, katere nehomogenosti določajo smer toplotnih tokov. Toplota se prenaša na več različnih načinov, poglavitno preko konvekcije, prevajanja in sevanja. Mi se bomo pri obravnavi osredotočili na slednje.

Vsa snov pri neničelni temperaturi zaradi termičnega gibanja njenih gradnikov oddaja energijo preko sevanja. Po Stefanovem zakonu je v termodinamskem ravnovesju njen skupni sevalni tok sorazmeren četrti potenci temperature, njegova gostota pa je porazdeljena po valovnih dolžinah skladno s Planckovim zakonom [1]. Če je prispevek oddanega sevanja v primerjavi z vhodnim toplotnim tokom zadosti velik, pride do bistvenih temperaturnih padcev, to pa lahko merimo in koristimo.

Ohlajanje preko sevanja občutimo že na lastni koži, saj človeško telo, kakor vsa snov, tudi seva. Ne samo to, sevanje predstavlja največji delež našega izhodnega energijskega toka. Vrh prej omenjene sevalne porazdelitve je pri temperaturi okoli 300 K v infrardečem delu spektra, kar tudi pojasni, zakaj ljudje na pogled ne žarimo.

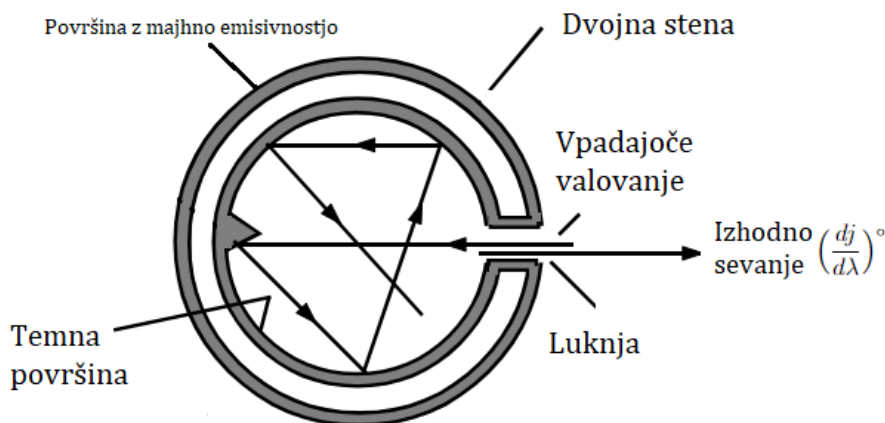
Človeštvo se je naučilo uporabljati sevanje za ohlajevanje že tisoče let nazaj. Stari Perzijci [2] so gradili plitke bazene, v katere so preko sistema podzemnih akvaduktov speljali vodo. Med jasnimi puščavskimi nočmi se je na površini teh bazenov nabral led, kljub temu, da temperatura ozračja v teh regijah redko seže pod 0 stopinj celzija. To se zaradi toplotnega prevajanja ali konvekcije ne bi moglo zgoditi, saj bi se tako voda ohladila kvečjemu na temperaturo okolice. Led so nato pred zoro nabrali in shranjevali v posebnih skladiščih. Za pridelavo ledu so sevanje toplote koristili tudi na Indijskem polotoku [3], kjer so z istim namenom ponoči nebu izpostavili velike, na spodnji strani s senom izolirane pladnje vode.

Ta pojav na razne načine koristimo tudi danes – v strehah, ki odbijajo sončevo svetlobo in preko sevanja pasivno ohlajajo gospodinjstva, do raznih premazov, ki služijo kot toplotni ščiti vojaškim letalom. Cilj tega članka je opredeliti glavne dejavnike, ki vplivajo na ohlajanje s sevanjem in predstaviti, kako se z izzivi njegove implementacije spopadajo dandanes.

2. Teoretične osnove

Preden se lotimo obravnave ohlajanja s sevanjem v praksi, si moramo približe ogledati temeljne zakone, ki določajo njegov potek in kaj jih povzročajo. Sprva moramo identificirati ustrezne fizikalne količine in kako so od njih odvisni ti zakoni, nato pa se opremljeni s tem znanjem lahko lotimo še ostalega.

Gradniki snovi so v danem trenutku v zapletenem naboru energijskih stanj. Skozi čas ti gradniki naključno prehajajo med različnimi stanji, pri čemer pride do izsevanega elektromagnetnega valovanja. Zanima nas porazdelitev gostote tega izseva po frekvencah ali valovnih dolžinah. Temeljni sevalni spekter, na katerega se bomo velikokrat sklicevali, je spekter sevanja črnega telesa. Črno telo definiramo kot telo, ki absorbira vso vpadajoče elektromagnetno valovanje. Pri iskanju njegovega spektra se je vredno ozreti na njegovo enakovrednico, fotonsko votlino. To je pravzaprav nekakšna prazna škatla z neprozornimi stenami in majhno luknjo. Skozi luknjo pošljemo elektromagnetno valovanje, ki se znotraj votline odbija od sten in se od časa do časa v njih absorbira. Če je luknja dovolj majhna, se bo znotraj ujelo vso poslano valovanje, votlina pa tako ustreza definiciji črnega telesa.



Slika 1. Model črnega telesa. Zunanja plast votline ima prevleko z majhno emisivnostjo ($\varepsilon \rightarrow 0$), da lahko zanemarimo njen izsev. $\left(\frac{dj}{d\lambda}\right)^\circ$ označuje spekter sevanja črnega telesa. Prevedeno z vira [4].

Izsevno valovanje sten, ki zapusti votlino skozi luknjo, naj bi bilo zato porazdeljeno v skladu s spektrom sevanja črnega telesa (Slika 1). Tega lahko izpeljemo iz principov statistične mehanike z upoštevanjem ustreznih robnih pogojev. Za model termičnega gibanja, kot so npr. vibracije gradnikov, vzamemo kvantne harmonske oscilatorje. Odtod sledi, da so energije prehodov med stanji kvečjemu večkratniki nekega kvanta: $\Delta E = nh\nu$. Ob teh predpostavkah je nemški fizik Max Planck leta 1900 kot prvi izpeljal Planckov zakon [1]:

$$\frac{dj}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k_B T \lambda}} - 1} \quad (1)$$

Tukaj j označuje gostoto izsevanega elektromagnetnega valovanja, λ je valovna dolžina, h Planckova konstanta, k_B Boltzmannova konstanta in T temperatura. Razmislek, da so energije prehodov kvečjemu večkratnik nekega kvanta $h\nu$, je posebej pomemben. Do sevanja pride namreč tudi v

klasični sliki (Rayleigh-Jeansov zakon [5]), a ta s svojimi predpostavkami napoveduje neskončen skupni sevalni tok, čemur pravimo ultravijolična katastrofa.

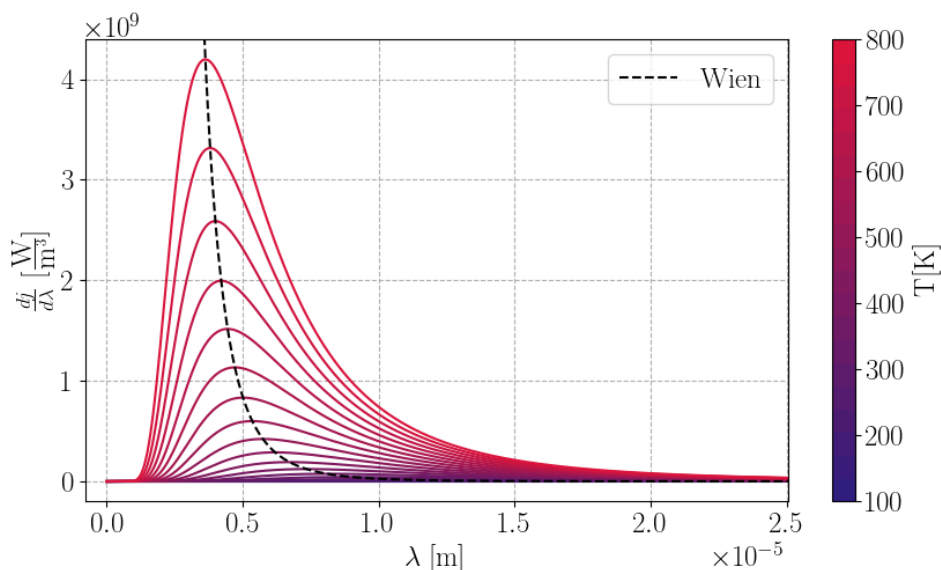
Planckov zakon v celoti določa spekter sevanja črnega telesa in s tem večino obnašanja, ki nas bo zanimalo. Neposredno iz njega sledita še Stefanov zakon [1] (gostota celotnega toka):

$$j = \sigma T^4, \quad \sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2}$$

in Wienov zakon kot rešitev transcendentne enačbe za položaj maksimuma:

$$\lambda_{\max} = \frac{\lambda_0}{T}, \quad \lambda_0 \approx 0.2014 \frac{hc}{k_B}$$

Primeri spektrov po valovnih dolžinah so prikazani na sliki 2.



Slika 2. Sevalni spekter po valovnih dolžinah za nekaj različnih temperatur

Pri raziskavi uporab sevalnega ohlajanja bomo videli, da ni pomemben le celoten izsevani tok, temveč tudi njegova porazdelitev po valovnih dolžinah, zato se bomo kasneje ozirali tudi nanjo. Tako vemo, kako seva črno telo, a vendar niso vsa telesa črna telesa. Definirajmo tri parametre: emisivnost, absorpcijski faktor in odbojnost (ε, α, r). Parameter emisivnosti ε_λ podaja razmerje med gostoto sevalnega toka obravnavanega telesa in črnega telesa:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{j_\lambda}{j_\lambda^\circ} \quad (2)$$

in je v splošnem odvisen od frekvence/valovne dolžine (označili smo $j_\lambda = \frac{dj}{d\lambda}$). Čeprav pride prav pri opisu poljubne snovi, ga lahko pri določeni temperaturi v neki zožitvi frekvenčnega spektra običajno vzamemo kot konstantnega. Emisivnost se od snovi do snovi lahko drastično razlikuje, kot je razvidno iz tabele 1.

Material	ε
Srebro (polirano)	0.02
Aluminijasta folija	0.03
Asfalt	0.88
Led	0.97
Koža	0.97 - 0.999

Tabela 1. Nekaj meritev emisivnosti v IR spektru. Vir: [6]

Absorpcijski faktor (\neq absorpcijski koeficient) nam pove, kolikšen delež vpadnega sevanja telo absorbira. Dobimo ga lahko iz emisivnosti. Nemški fizik Gustav Kirchhoff je to zvezo našel še pred odkritjem Planckovega zakona. Predpostavil je, da obstaja nek univerzalni zakon, ki določa sevanje črnega telesa $f(\lambda, T)$. Odtod je trdil, da mora biti razmerje med izsevanim tokom predmeta poljubnega materiala in njegovim absorpcijskim faktorjem enako prej omenjeni univerzalni funkciji:

$$\frac{j_{\lambda}(T)}{\alpha_{\lambda}} = f(\lambda, T).$$

To je zapis Kirchhoffovega zakona o termičnem sevanju [7], kjer je absorpcijski faktor α_{λ} v bistvu enakovreden definiciji parametra emisivnosti v enačbi 2. Za skico dokaza si predstavljajmo neko neprozorno telo z emisivnostjo ε in absorpcijskim faktorjem α . Obdamo ga z vseh strani z neko črno površino in zahtevamo, da sta telo in površina v termodinamskem ravnovesju pri neki temperaturi T . Energijska bilanca telesa se glasi: $j_{\text{vh}} - j_{\text{iz}} = \sigma T^4(\alpha - \varepsilon) = 0$, od koder sledi, da morata biti oba koeficienta enaka.

Iz ohranitve energije sledi še zveza, ki povezuje absorpcijski faktor in odbojnost, delež odbitega valovanja: $r + \alpha = 1$. Dobro sevalo je torej tudi dober absorber in slabo zrcalo, kar je še posebej očitno pri črnem telesu. Po drugi strani pa je dobra odbojna površina slab emitor, kot je recimo polirano srebro, omenjeno v tabeli 1. Pri prozornih materialih navajamo še parameter prepustnosti τ , za katerega velja $r + \alpha + \tau = 1$.

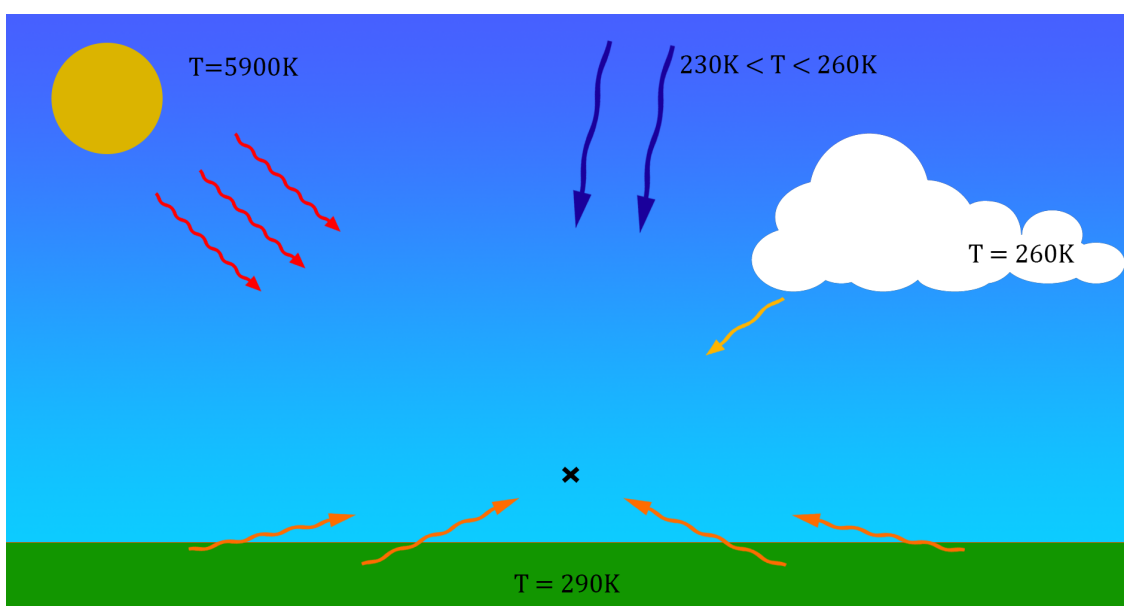
Poleg sevanja pa bodo v nadaljnji obravnavi pomembni tudi drugi načini prenosa toplote. Prvi od teh je prevajanje toplote, do katerega pride zaradi trkov delcev na mikroskopski skali. Ta je od vseh načinov prenosa toplote nam še najbolj intuitiven, saj ga zaznavamo z dotikom. Temperaturne profile pri prevajanju znotraj snovi določa difuzijska enačba, toplotne tokove pa se dobi kot $\mathbf{j} = -\lambda \nabla T$ [8]. V glavnem nas bo zanimal toplotni tok na stičnih površinah, kjer bomo vzeli poenostavitev difuzijske enačbe za plast.

Še en pomemben način prenosa toplote je konvekcija, do katerega pride zaradi lastnega gibanja tekočine. Ta je dostikrat posledica nehomogenosti v njenem temperaturnem profilu, v tem primeru ji pravimo naravna konvekcija. Dejanski časovni razvoj le-tega je nato odvisen od hidrodinamskih načel.

Prenos toplote poteka še preko faznih prehodov, pri katerih se toplota troši/sprošča brez temperaturnih sprememb. Izkaže se, da je ta ob prisotnosti vode (na primer pri ohlajanju z znojenjem) kar bistven, čeprav ne pomislimo takoj nanj.

3. Okolica

Ker smo sami Zemljani, nas bodo zanimala okoliščine na površju našega planeta. Nahajamo se torej na nekakšni grobi krogli, v naši direktni bližini pa ima ta neko približno konstantno temperaturo (običajno $270\text{ K} \pm 40\text{ K}$). Zemlja je seveda obdana z Vesoljem, ki je na temperaturi približno 3 K [9] (Prásévanje), podnevi pa moramo upoštevati še sevalni tok Sonca. Gostota energijskega toka, ki ga prejmemo od sevanja, je torej odvisna predvsem od prostorskega kota. Zemlja in nebo zavzameta vsak po približno polovico celotnega zornega kota. S strani neba nas doseže sevanje Sonca, Vesolja, oblakov in atmosfere, z druge strani pa še sevanje zemeljskega površja (Slika 3). Na slednje je treba še posebej paziti, saj ga je največ, pri odsotnosti Sonca pa največji delež vpadnega sevanja predstavljajo zemljino površje in objekti na njej. Ker sta Zemlja in Sonce pri zelo različnih temperaturah, sevata pri različnih valovnih dolžinah. Valovne dolžine sončevega sevanja so večinsko porazdeljene med 0.25 in $2\text{ }\mu\text{m}$ (vrh v vidni svetlobi), zemljinega pa v IR delu spektra med 5 in $50\text{ }\mu\text{m}$.



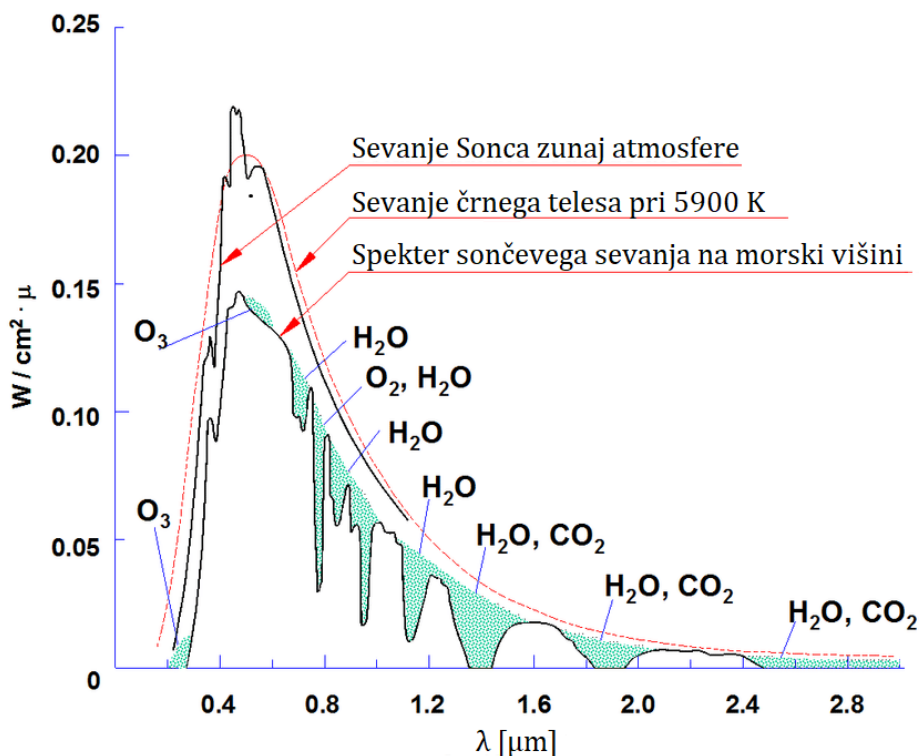
Slika 3. Ilustracija raznih virov sevanja iz okolice

Matematično opišimo sevanje okolice. Označimo kot od zenita s θ , tako da Zemljino površje zavzame zorne kote med $\pi/2 < \theta < \pi$, nebo pa $\theta < \pi/2$. Opis sevanja površja Zemlje je sorazmerno preprost, saj ima v naši bližini približno konstantno temperaturo in emisivnost, ki znaša v povprečju okoli 0.93 [10]. Sevanje z neba si razdelimo na prispevek Sonca in na prispevek atmosfere ter oblakov. Sončevo sevanje lahko opišemo kar kot vpadajoče ravno valovanje z gostoto reda velikosti $10^3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Po drugi strani pa imajo atmosfera in oblaki raznolike emisivnosti in temperature, ki so odvisne od različnih faktorjev in jih bomo bolj podrobno opisali kasneje. Radi bi povzeli vpliv sevanja ozračja z enim parametrom, nekakšno efektivno temperaturo ozračja. V ta namen definirajmo T_o , za katerega velja:

$$T_o^4 = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta < \pi/2} T(\Omega)^4 \varepsilon(\Omega) d\Omega \quad (3)$$

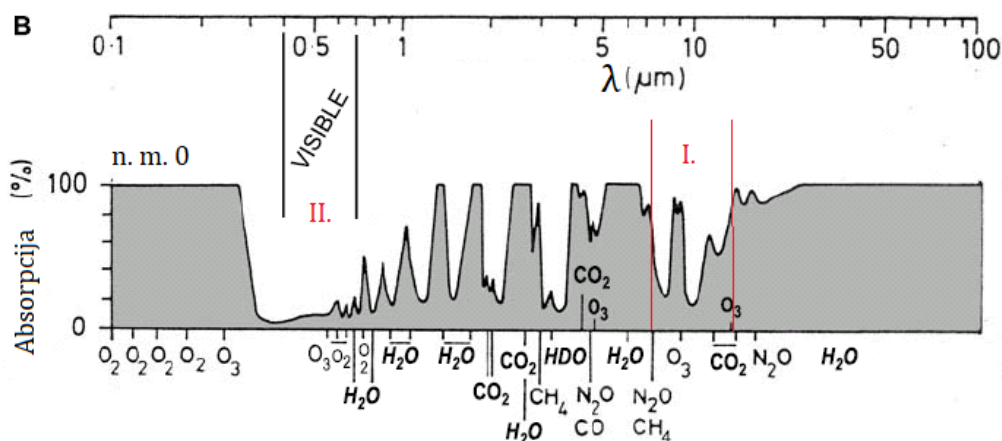
To nam služi kot nekakšna efektivna temperatura ozračja, s katero bi lahko sevanje neba brez Sonca opisali kot sevanje nekakšne kupole velikih razsežnosti. V nadaljnjih računih bomo to količino ocenili z upoštevanjem podatkov iz literature.

Atmosfera predstavlja pomemben dejavnik med drugim tudi zato, ker ne prepusti vsega elektromagnetnega valovanja. Njena absorpcija ima odvisnost po valovnih dolžinah – zanima nas njen absorpcijski spekter α_λ . Atmosfera sestoji iz nabora različnih plinov, vsak od teh pa absorbira različne valovne dolžine. Deloma ga lahko izluščimo iz meritev Sončevega spektra s površja Zemlje, katere primerjamo s spektrom črnega telesa ustrezne temperature ($j_\lambda^{\text{mer}} = \alpha_\lambda j_\lambda^\circ$). To je skupaj z prispevki posameznih plinov prikazano na sliki 4.



Slika 4. Primerjava izmerjenega Sončevega sevalnega spektra in napovedi Planckovega zakona. Prevedeno iz vira [11].

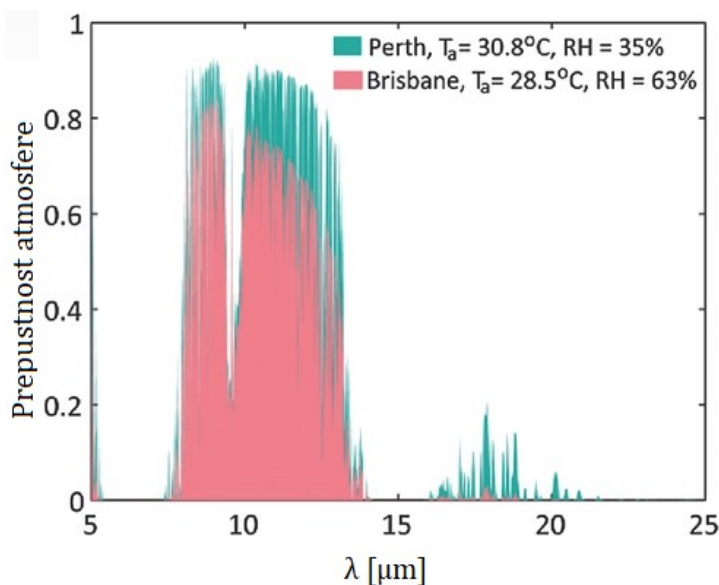
Kot posledica raznolike strukture atmosfere opazimo nekakšna okna prepuščenih valovnih dolžin. Eno večjih takih oken se nahaja na spektru vidne svetlobe (na sliki 5 označeno z II.), še eno pa v IR spektru v okolici $\sim 8\text{-}15\ \mu\text{m}$ (na sliki 5 označeno z I.). To bo kasneje posebej pomembno, saj pri takih valovnih dolžinah sevajo telesa pri temperaturah, tipičnih za površje Zemlje.



Slika 5. Celoten absorpcijski spekter atmosfere. Označeni sta okni visoke prepustnosti. Prevedeno iz vira [12].

Atmosferska absorpcija je v glavnem spremenljiva glede na nekaj parametrov. Eden od teh bo očitno nadmorska višina (v limiti $h \rightarrow \infty$ nad nami atmosfere ni). Višje kot se nahajamo, več sevanja z zunanosti doseže naš položaj; del atmosfere nad nami je zmerom tanjši in v povprečju tudi redkejši. Zato bi, recimo v visokogorju, pričakovali veliko večjo prepustnost atmosfere.

Atmosfera ima v glavnem povsod podobno sestavo (z izjemo ozona, ki vpliva na prepustnost UV svetlobe), se pa pogosto spreminja delež vodne pare v zraku, čemur pravimo vlažnost. Za veliko prepustnost atmosfere želimo čim manjšo vlažnost zraka, saj vodna para bistveno prispeva k njenemu absorpcijskemu spektru.



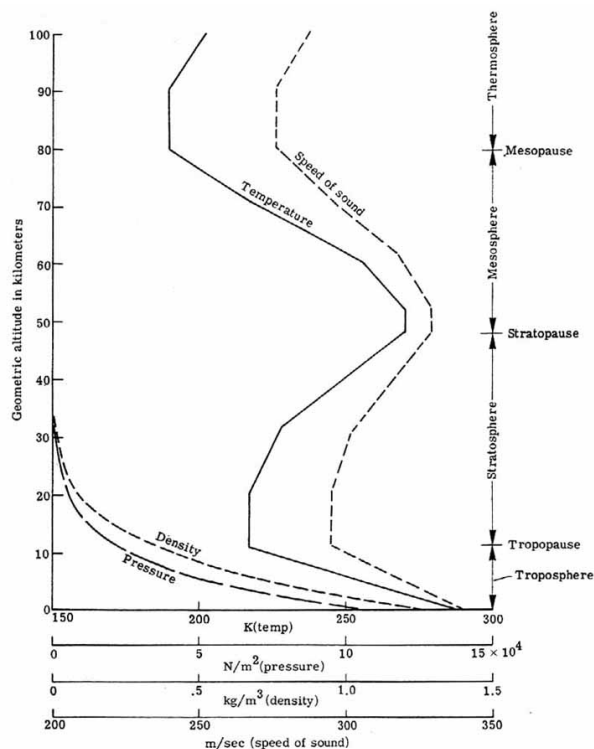
Slika 6. Modelirana prepustnost atmosfere po valovnih dolžinah pri dveh različnih vlažnostih (označeno z RH). Prevedeno iz vira [13].

Vpliv vlage se pozna še posebej na IR delu spektra, ki je pomemben zaradi svojega okna. To je razvidno s slike 6, kjer je prikazano prepustno okno (na sliki 5 označeno z I). Vlažnost zraka se spreminja glede na množico podnebnih in vremenskih faktorjev in v veliki meri v odvisnosti od temperature.

Temperatura, na kateri se nahaja večina atmosfere, je običajno med 230 K in temperaturo površja [14]. Po gostoti obteženo povprečje (če privzamemo linearno padanje gostote pri temperaturi površja 280 K, slika 7) nam da povprečje okoli 260 K. Iz Kirchoffovega zakona lahko sklepamo, da bo atmosfera emitirala pri valovnih dolžinah, podanih z njenim absorpcijskim spektrom (na sliki 5), njena povprečna emisivnost (kot normaliziran integral α_λ po λ) pa je v tem približku okoli 0.6.

Še eno pomembno sevalo na nebu so oblaki. Ti so si med seboj zelo raznoliki; različni tipi se nahajajo na različnih nadmorskih višinah, imajo razne debeline in temperature. Njihova temperaturna odvisnost ni odvisna le od okoliškega ozračja, ampak tudi od njihove sestave – bolj natančna obravnava tega je izven področja našega članka. Vzemimo, da je temperatura na njihovih površinah bolj ali manj podobna atmosferski. Literatura za emisivnost oblakov navaja različne vrednosti za različne vrste, pri debelejših, nižje ležečih je to okoli 1, srednje do višje nahajajočih (altokumulus) v povprečju 0.8 in visoko ležečih (cirrus) okoli 0.35 [15].

Seveda si bo nek predmet z okolico izmenjeval toploto še preko ostalih mehanizmov, katerih vpliva ne smemo zanemariti. Izmenjave preko toplotnega prevajanja potekajo preko površin stika, kar so običajno tla. Podobno je tudi pri zraku, le da je zrak tekočina in toploto sproti prenaša še preko konvekcije (posledica vzgona ali vetra).

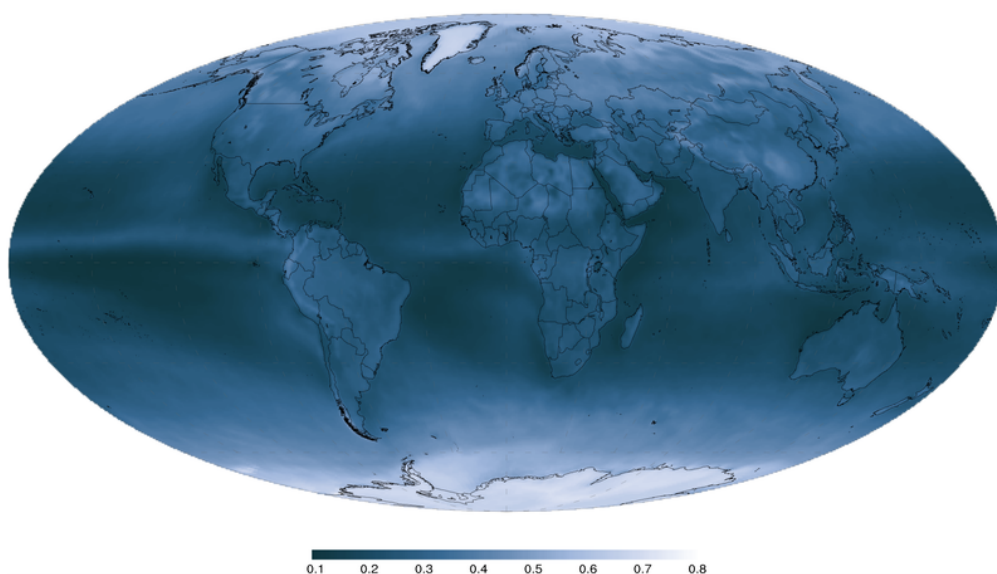


Slika 7. Tipične višinske odvisnosti gostote, tlaka, temperature in hitrosti zvoka. Vir: [14]

3.1 Zemlja in učinek tople grede

Obravnavajmo še Zemljo kot termodinamski sistem. Na tem primeru si lahko pogledamo učinke odbojnosti in emisivnosti, lastnosti, ki bodo postale posebej pomembne v naslednjih poglavjih. Zemlja je planet, ki kroži okrog Sonca v vakuumu Vesolja. Takoj lahko izključimo prevajanje, saj Zemlja ni v direktnem stiku z nobenim drugim (zunanjim) telesom. Ovoj plinov okrog Zemlje, se pravi atmosfero, štejemo kot del nje (zaradi gravitacijske vezanosti ne bo šla nikamor), tako da tudi konvekcija ne pride v poštev, takisto izguba toplote preko faznih prehodov. Zemlja torej izmenjuje toploto s svojo okolico izključno preko sevanja. Zemlja seveda ni črno telo, poleg tega pa moramo upoštevati prisotnost atmosfere. Pogosto je naveden pojem "albedo" (iz lat. za belino), ki je merilo za odbojnost za sončevo sevanje:

$$\alpha = \frac{\int r_{\lambda} j_{\lambda\odot} d\lambda}{\int j_{\lambda\odot} d\lambda}$$



Slika 8. Povprečen albedo na površju Zemlje (skupaj z oblaki), izmerjen v letih 2003-2004. Vir: [16]

Različne površine imajo različne albede, povprečje čez celotno zemljino površino upoštevajoč oblake pa naj bi bilo okoli 0.3 [17] (Slika 8).

Nekaj sevanja se torej že s spočetka odbije nazaj v Vesolje, nekaj pa se absorbira bodisi v atmosferi bodisi na površju. Atmosfera in površje nato sevata pri svojih temperaturah v IR delu spektra, delež česar se zopet absorbira ali pa uide v Vesolje. Celokupno ujetje toplote v sistem Zemlje povzamemo s pojmom "učinek tople grede" (Slika 9).

Segrevanje oz. hlajenje Zemlje je zelo povezano s sestavo njene atmosfere. Večja, kot je njena absorpcija, več toplote bo v povprečju ostalo znotraj zemljinega sistema, k temu pa največ prispevajo tako imenovani toplogredni plini (vodna para, CO₂...). Zadnjih nekaj sto let smo pričča Zemljinemu pospešenemu segrevanju, v veliki meri zaradi človekovega vpliva. To nas motivira k iskanju načinov, s katerimi bi lahko čim bolj zmanjšali gretje Zemlje. Mi se bomo osredotočili na dva dela. Prvi je povečanje odbojnosti Zemlje, s čimer zmanjšamo njeno gretje kot posledica sončevega sevanja, drugi pa je povečanje Zemljinega izseva v Vesolje.



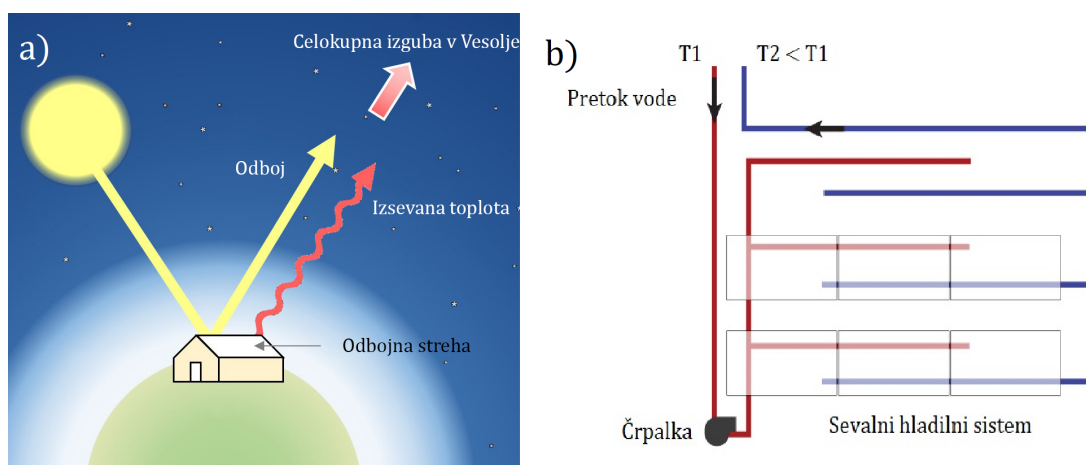
Slika 9. Ilustracija učinka tople grede. Prevedeno iz vira [18].

4. Hladilni sistemi

Večina obstoječih hladilnih sistemov zahteva dovajanje energije. S tem običajno pride do odvečne toplote, ki jo oddamo v ozračje in s tem prispevamo k nepotrebnemu gretju atmosfere. Sevalni hladilni sistemi se temu izognejo, saj temeljijo na procesu, intrinzičnemu za vso snov. Hlajenje lahko dosežemo neposredno ali pa posredno.

Do neposrednega hlajenja nekega objekta pridemo tako, da mu priredimo željene značilnosti. Primer tega bi bil uporaba strehe z visoko odbojnostjo v UV/vidni svetlobi na gospodinjstvu. S tem bi drastično zmanjšali vhodni energijski tok Sonca, gospodinjstvo bi pa izgubljalo toploto preko sevanja (prikazano v a) na sliki 10).

Po drugi strani bi lahko izgradili učinkovitejši sistem na manjši skali, v katerega bi dovajali toploto od drugod. Primer tega bi bil hlajenje npr. podatkovnih baz s pomočjo vode, kot ga opisuje projekt [19]. Segreto vodo bi nato hladili s pomočjo sevalnih plošč (prikazano v b) na sliki 10) in jih vrnili v tokokrog.



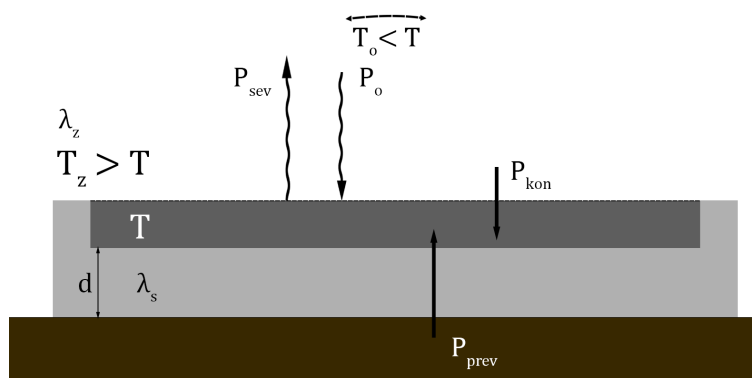
Slika 10. Primera a) neposrednega hlajenja (Vir: [20]) in b) posrednega hlajenja (Vir: [19])

Najprej bomo predstavili teoretični model sevalnega hladilnega sistema, nato pa bomo govorili o njegovih izboljšavah preko dodatnih komponent.

4.1 Teoretični model

Razsežnosti hlajenega telesa naj bodo poljubne in predpostavimo, da to seva kot črno telo. Hladilni sistem naj bo ploščate kvadraste oblike. Tako velika večina površine izpostavljena okolici sestoji iz dveh vzporednih ploskev – ena izpostavljena nebu, druga pa tlem. Iz tega razloga zanemarimo izmenjavo toplote skozi stranske ploskve. Zgornja ploskev naj bo zaenkrat odkrita, kar sicer omeji uporabo opisanega sistema na noč.

Hlajeno telo torej izmenjuje toploto preko konvekcije in sevanja skozi zgornjo ploskev ter prevajanja skozi spodnjo. Zanima nas, pri kateri temperaturi T bo sistem v termodinamskem ravnovesju z okoliškim zrakom in tlemi, za katera recimo, da sta pri temperaturi T_z . Takoj vidimo, da bo T nižja od T_z . Če bi telo izmenjevalo toploto le preko konvekcije in prevajanja, bi to bilo pri enaki temperaturi kot zunanost. Če pa upoštevamo še sevanje kot pozitivni prispevek k izhodnemu toku, dobimo manjšo temperaturo ravnovesja. Pogoj za to je seveda $T > T_o$, ki je zaradi narave računa T_o vedno izpolnjen – to izhaja iz predpostavke, da je temperatura ozračja pri $h = 0$ enaka temperaturi tal in da se z višino manjša.



Slika 11. Ilustracija hladilnega sistema z označenimi energijskimi tokovi.

Na sliki 11 smo z d in λ_s označili debelino in toplotno prevodnost izolacijske plasti, z λ_z toplotno prevodnost zraka in z P_o sevalni tok ozračja (oblakov in atmosfere) skladno z definicijo efektivne temperature ozračja T_o .

Spomnimo se enačbe 3 in računajmo za primer neba, polovično prekrita s srednje ležečemi oblaki pri temperaturi -10°C . Odtod pri izboru za temperaturo površja $T_z = 280 \text{K}$ dobimo za parameter $T_o = 240 \text{K}$ ($T_o^4 = \frac{1}{2}(0.8(263 \text{K})^4 + 0.6(260 \text{K})^4)$). Enačba za termodinamsko ravnovesje se glasi:

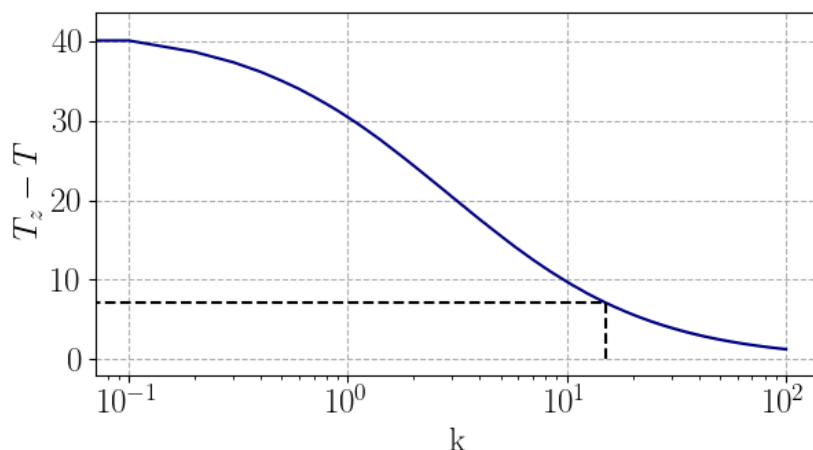
$$\sigma S(T^4 - T_o^4) = -q(T - T_z) \quad (4)$$

Levi del ustreza sevalnim tokovom, z desnim delom pa smo povzeli prispevke kondukcije in naravne (vzgonske) konvekcije. Faktor q je vsota:

$$q = q_{\text{prev}} + q_{\text{konv}} = \frac{\lambda_s S}{d} + \frac{\lambda_z 0.27 \text{Ra}_L^{\frac{1}{4}} S}{L} \quad (5)$$

Koeficient za toplotno prevajanje pride iz difuzijske enačbe, za konvekcijo pa uporabimo empirično določeno enačbo [21], ki velja za laminarni tok pri navzgor obrnjeni hladni plošči. Rayleighjevo število Ra_L je brezdimenzijsko število, odvisno od raznih lastnosti tekočine (v našem primeru zraka), kot so gostota, dinamična viskoznost, toplotna prevodnost, difuzijska konstanta itd., vrednosti teh pa so tabelirane (pri naših izračunih iz [22]).

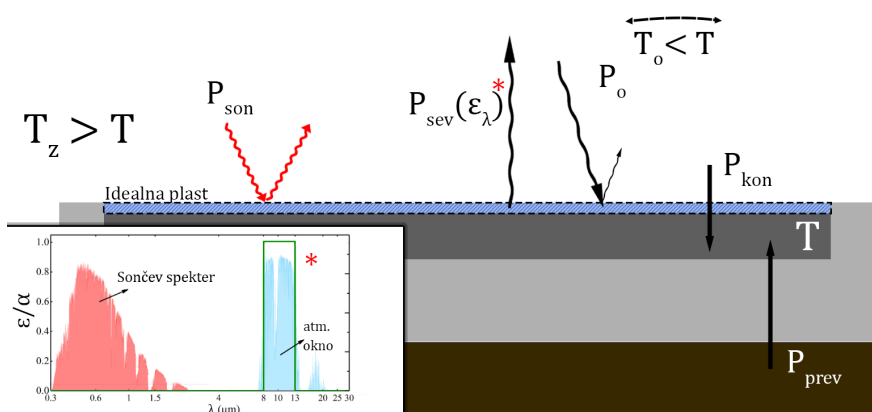
Definirajmo brezdimenzijski $k = \frac{q/S}{\sigma T_z^3}$, ki je nekakšno merilo moči sevanja napram ostalima mehanizmoma. Rešitve za končno temperaturo v odvisnosti od k so podane na sliki 12.



Slika 12. Numerično izračunana odvisnost končne temperature od k pri našem izboru T_z in T_o . Označen rezultat našega računa.

Naš izračun pri $\lambda_z = 0.25 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$ dene vrednost $\text{Ra}_L = 3 \cdot 10^7$. Za ploščo dimenzij reda velikosti 1 meter in izolacijsko plastjo z $\lambda_s = 1 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$ po enačbi 5 tako definirani k znaša ≈ 15 , za ravnovesje pa dobimo padec temperature velikosti $\Delta T = T_z - T \approx 7 \text{ K}$. To je kar znatna razlika, a se je za doseganje takih vrednosti v realnem svetu treba malo bolj potruditi, kar bomo videli pri obravnavi že obstoječih projektov. Kljub temu nam da nekakšno idejo reda velikosti padca temperature.

Hladilni sistemi v praksi večinoma temeljijo na istih principih kot naš model, zato se izboljšave ozirajo predvsem na njihove sevalne in odbojne značilnosti. Praviloma bi za učinek hlajenja zadostovali le dobra odbojnost za sončevo sevanje in visoka emisivnost v drugih delih spektra. Če pa želimo poslati sevanje ne samo ven iz predmeta, ampak v Vesolje (po motivacijah s konca podpoglavja 3.1), želimo visoko emisivnost le na območju atmosferskega absorpcijskega okna. Ne samo to, na ta način se znebimo učinka velikega deleža sevanja atmosfere. Sevalu, ki seva pri določenih željenih valovnih dolžinah v angleščini pravimo "Selective radiator" oziroma lepše slovensko "Izbirno sevalo". To lahko dosežemo z dodatnimi plastmi, ki te lastnosti imajo. Ta plast bi bila postavljena na mestu, kjer je bila v prejšnjem modelu odkrita stranica. Vpliv idealne take plasti in njen emisijski/absorpcijski spekter sta prikazana na sliki 13.



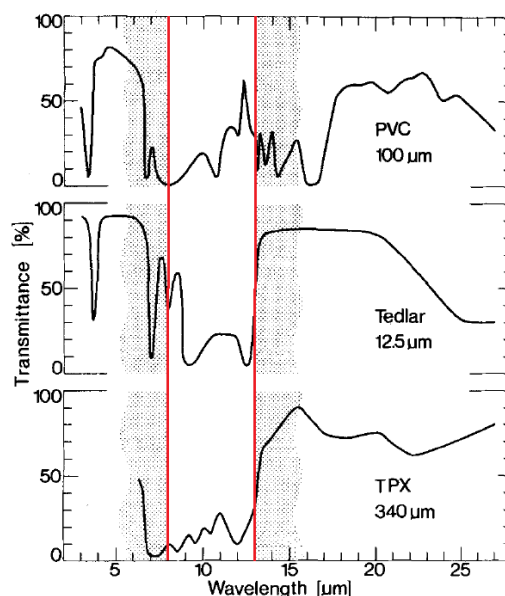
Slika 13. Ilustracija vpliva idealne plasti (v modri) z odbojnimi in izbirno-sevalnimi lastnostmi. Idealni emisijski spekter levo spodaj.

4.2 Polimerne plasti

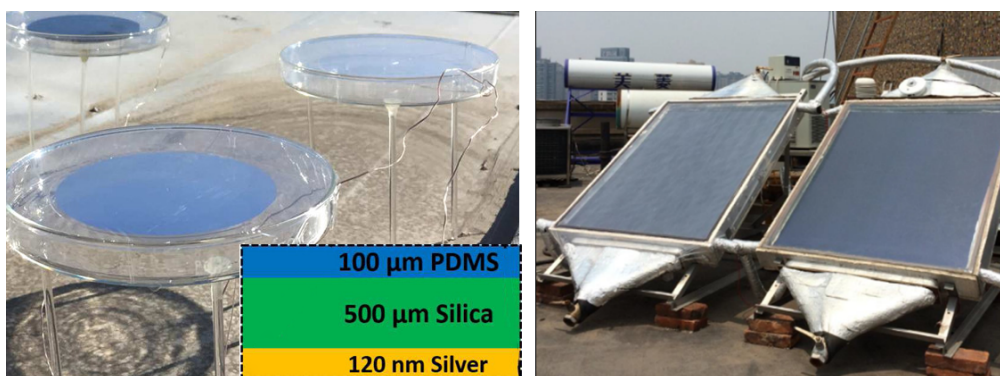
Popularno področje raziskav v smeri sevalnega ohlajanja so polimerne plasti, katerih gradniki so ogromne molekule – polimeri. Njihove ugodne kemijske lastnosti so že dalj časa pod drobnogledom, saj jih zaznamujejo izbirno-sevalne značilnosti. V šetdesetih in sedemdesetih letih prejšnjega stoletja so raziskovalci začeli preučevati prepustne in emisijske lastnosti raznih polimerov, spočetka PVC (polivinilklorid), PVF (polivinilfluorid), TPX (polimetilpenten) (prikazano na sliki 14). S plastmi iz teh materialov, debelimi le nekaj 100 μm , se da doseči emisije željenih lastnosti. Majhne prepustnosti in odbojnosti na valovnih dolžinah atmosferskega okna kažejo na tamkajšnjo veliko emisivnost, kar sledi iz zvez $\alpha = \varepsilon$ in $\tau + \alpha = 1$, kjer smo zanemarili odbojnost.

Kasneje se je za potrebe dnevnega ohlajanja pojavila uporaba polimernih plasti v večplastovnih sistemih, v katerih dodatne odbojne plasti (zrcala) poskrbijo za odboj sončevega sevanja.

Zgodaj je nastopila uporaba plasti PVC v kombinaciji s ploščo neparjenega aluminija [23], zadnja leta pa so s pomočjo plasti iz PDMS (polidimetilsiloksan) [24] in PET (polietilenptereftalat) [25] na odbojnih podlagah iz srebra dosegli dnevne temperaturne padce do 8 stopinj.



Slika 14. Prepustnosti PVC, PVF in TPX. Z rdečo označene približne meje okna v absorpcijskem spektru atmosfere. Vir: [23]

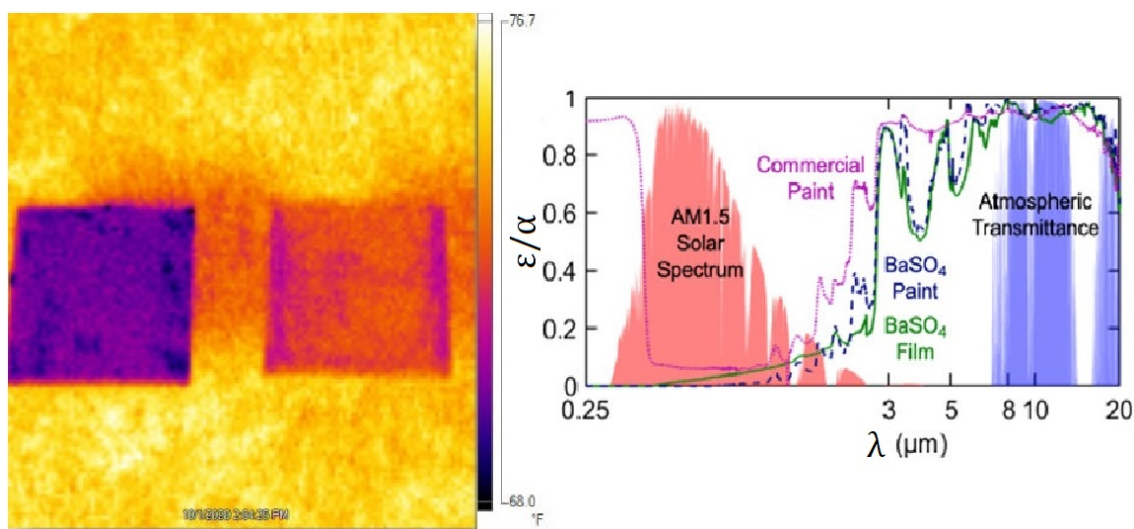


Slika 15. Primera hladilnih sistemov, uporabljajočih polimerne plasti. Vira levo: [24], desno: [25]

Dobra plat polimernih slojev je tudi njihova cenovna ugodnost, kar jih naredi primerne za množično izdelavo. Imajo tudi svoje slabosti, polimerski materiali imajo omejeno življenjsko dobo, kar oteži njihovo trajno uporabo. Poleg tega pa jih zaznamuje mehanska šibkost, zaradi česar bi na primer ob hujših vremenskih pogojih tvegali poškodbo [26].

4.3 Barvni premazi in nanodelčne strukture

Še ena rešitev leži v raznih barvnih premazih, s katerimi se da doseči visoke odbojnosti sončeve svetlobe in veliko emisivnost v atmosferskem oknu. S pojmom "barvni premaz" označujemo premaze, sestavljene iz nekega veziva (običajno dodatno redčeno) in pigmenta. Odbojni spekter barve določajo predvsem uporabljene pigmenti, majhni drobcici snovi reda velikosti od nekaj do nekaj sto μm . Bele barve nudijo veliko odbojnost proti sončevemu sevanju in so v bolj vročih podnebnjih že dolgo v uporabi. En slaven primer so ikonične belo-modre hiše v nekaterih grških vasicah, kjer so pogoste visoke temperature, prav tako pa je iz tega razloga uporaba bele barve pogosta tudi drugod po Južni Evropi in Severni Afriki. Prednost njihove relativne pogostosti je tudi v tem, da je njihova množična uporaba že dokumentirana. Raziskava [27] je v zvezni državi Arizoni tekom enega leta izmerila prihranke energije do $7.69 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ kot posledica prepleskanja temnih streh (odbojnost $\sim 20\%$) s svetlejšimi barvami (odbojnost $\sim 55\%$). To je kar bistven prihranek, še posebej v primerjavi s povprečno porabo energije za klimatske naprave: za Arizono je to $\approx 5000 \text{ kWh}$ [28] (tako je prihranek za npr. 200 m^2 strehe $\approx 1500 \text{ kWh}$). Učinek lahko seveda še izboljšamo z barvami večje odbojnosti. Tipične vrednosti za odbojnosti za bele barve na trgu so okoli 70% (skozi čas se ta zaradi poškodb itd. manjša), emisivnosti pa okoli 0.8 [29]. Zadnja leta se pojavljajo nove barve, zasnovane prav s sevalnim ohlajanjem v mislih. Njihove odbojnosti se gibljejo med 85 in 90% [30], leta 2021 pa je bila izumljena barva, osnovana na BaSO_4 , ki ima odbojnost 97.6% [31].

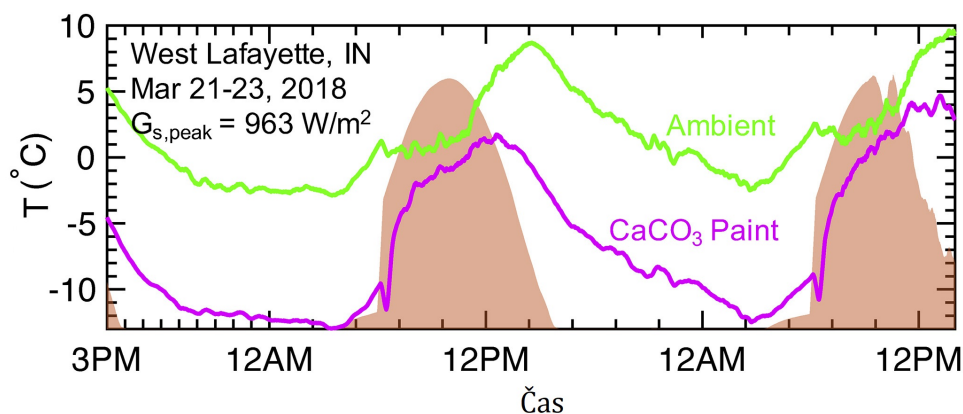


Slika 16. IR slika površin z dvema premazoma bele barve različnih odbojnosti (levo, vir: [32]). Emisijska spektra barve in primera komercialno dobavljive bele barve (desno, vir: [31])

Ustrezni barvni premazi tako omogočajo ne le odboj vpadnega sevanja, ampak tudi visoko emisivnost. Eksperiment [33] javlja bistveno ohlajanje površin, premazanih z barvo iz CaCO_3 , pod temperaturo okolice. Potek skozi čas je prikazan na sliki 17.

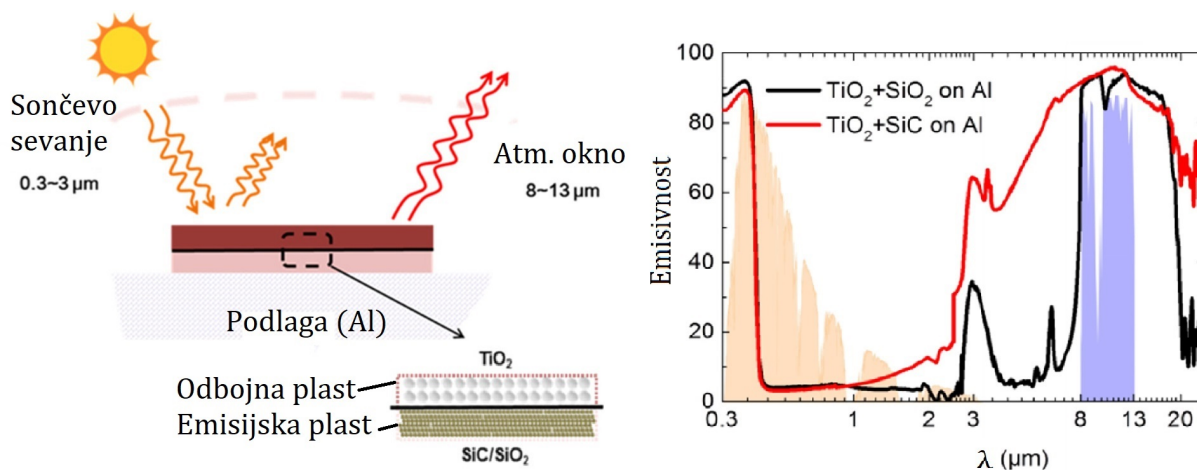
Zaradi svoje trpežnosti in relativne cenovne ugodnosti so visoko odbojne barve posebej primerne za množično uporabo. Po drugi strani pa z njimi težje dosežemo idealne izbirno-sevalne lastnosti. To je razvidno s slike 16, kjer opazimo velike emisivnosti ne samo v atmosferskem oknu, ampak tudi v nižjem delu IR spektra. Posledično se nekaj izseva ujame v atmosferi, hkrati pa se na površini absorbira večji delež sevanja atmosfere. Včasih je tudi pod vprašanje postavljena ekološka primernost nekaterih barv, kar omeji raznolikost uporabnih sestavin.

Ohlajanje s sevanjem



Slika 17. Časovni potek temperature površine, premazane z barvo iz CaCO_3 (vijolična) in temperature okolice (zelena). Vir: [33]

Nekakšna nadgradnja tega koncepta so strukture, osnovane na nanodelcih – koščkih snovi, velikih do nekaj 100 nm. Zaradi tega se na njih dobro siplje svetloba v UV in vidnem delu spektra. Take strukture zato zaznamuje velika odbojnost sončevega sevanja in prepustnost IR dela spektra. Ti delci so običajno uporabljeni v kombinaciji s plastjo iz snovi z izbirno-sevalnimi lastnostmi, kot je na primer SiO_2 . Med uporabljenimi materiali in vrstami nanodelcev je od projekta do projekta več variacij. Velikokrat je predmet raziskave tudi odvisnost odbojnosti od same velikosti uporabljenih nanodelcev. Leta 2017 je na primer bil predlagan dvoplastni sevalni sistem z odbojno plastjo iz TiO_2 nanodelcev in emisijsko plastjo iz SiO_2 na podlagi iz aluminija. Za velikost nanodelcev so izbrali vrednost 300 nm. Na sliki 18 je na levi viden shematski prikaz strukture sistema, na desni pa emisijska spektra sistema pri uporabi dveh različnih emisijskih plasti; v črnem iz SiO_2 , v rdečem pa iz SiC .



Slika 18. Primer dvoplastne strukture sevalnega sistema z uporabo nanodelcev (levo) in meritve emisijskega spektra takšne strukture (desno). Vir: [34]

V tem primeru so napovedali temperaturne razlike med sistemom in okolico do 17 stopinj ponoči in 5 stopinj podnevi. Prav tako pa so že bili izvedeni uspešni eksperimenti, leta 2017 je bil izumljen in preizkušen metamaterial iz po plasti TPX naključno porazdeljenih nanodelcev SiO_2 , ki je v kombinaciji s srebrno podlago doseglo hlajenja do $93 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ [36]. Podobno kot predhodna primera so nanodelčne strukture dosti cenovno ugodne in tako tudi dober kandidat za širšo uporabo.

5. Zaključek

Sevanje predstavlja velik del izmenjane toplote v vsakem termodinamskem sistemu, tako pri nečem velikim, kot je Zemlja, kot pri človeku. Človeštvo izkorišča sevanje kot mehanizem hlajenja že vrsto let, še posebej danes, ko je fizika za njegovim delovanjem dobro poznana. Pri njegovi implementaciji imamo veliko svobode, saj si lahko pomagamo z znanjem iz različnih znanosti o materialih in njihovih sevalnih lastnostih. Do optimizacije sevalnega ohlajanja prihajamo tako po več različnih poteh, na katerih smo že prišli do bistvenih dosežkov. To nam je lahko vir optimizma – v časih negotovosti glede prihodnosti zaradi globalnega segrevanja se zdi sevalno ohlajanje eden od kandidatov za njegovo reševanje.

LITERATURA

- [1] Strnad, J., *Fizika 4. del*, 3. izdaja, DMFA – založništvo, Ljubljana, 2018.
- [2] Erika Alatalo, *The Persian ice house, or how to make ice in the desert*, <https://www.fieldstudyoftheworld.com/persian-ice-house-how-make-ice-desert/>, 2016, Zadnje obiskano: 25. 7. 2022.
- [3] Philosophical Transactions of the Royal Society of London, *XXII. The process of making ice in the East Indies. By Sir Robert Barker, F. R. S. in a letter to Dr. Brocklesby*, <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstl.1775.0023>, Zadnje obiskano: 25. 7. 2022.
- [4] Maharashtra state board, *Draw a neat labeled diagram of Ferry's blackbody*, https://www.shaalaa.com/question-bank-solutions/draw-a-neat-labeled-diagram-of-ferry-s-black-body-perfect-blackbody_201092, Zadnje obiskano: 25. 3. 2022.
- [5] Wikipedia, *Rayleigh-Jeans law*, https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh%E2%80%93Jeans_law, Zadnje obiskano: 25. 3. 2022.
- [6] Wikipedia, *Emissivity*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Emissivity>, Zadnje obiskano: 19. 3. 2022.
- [7] Wikipedia, *Kirchhoff's law of thermal radiation*, https://en.wikipedia.org/wiki/Kirchhoff%27s_law_of_thermal_radiation, Zadnje obiskano: 19. 3. 2022.
- [8] Kuščer, I. in Kodre, A., 3. izdaja, *Matematika v fiziki in tehniki*, DMFA – založništvo, Ljubljana, 2016.
- [9] Wikipedia, *Cosmic microwave background*, https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background, Zadnje obiskano: 19. 3. 2022.
- [10] NASA, project ISSCP, *Emissivity of Earth's surface*, <https://isccp.giss.nasa.gov/pub/data/surface/>, Zadnje obiskano: 19. 3. 2022.
- [11] Ortenberg F., *Ozone: Space Vision (Space monitoring of Earth Atmospheric Ozone)*, 1. izdaja, Asher Space Research Institute, Technion, 2002. Uporabljena slika na strani 23.
- [12] Mackenzie F. T., *Carbon in the Geobiosphere — Earth's Outer Shell*, 1. izdaja, Springer Science Business Media, London, 2006. Uporabljena slika 3.A.
- [13] Hossain Md. M., Gu M., *Radiative Cooling: Principles, Progress, and Potentials*, *Advanced science* **3** (2016), št. 6, 1500360. Uporabljena slika št. 4.
- [14] NASA, *Geometric altitude vs. temperature, pressure, density, and the speed of sound derived from the 1962 U.S. Standard Atmosphere.*, https://web.archive.org/web/20120402021855/http://www.centennialofflight.gov/essay/Theories_of_Flight/atmosphere/TH1G1.htm, Zadnje obiskano: 19. 3. 2022.
- [15] Allen, J. R., *Measurements of cloud emissivity in the 8-13 μm waveband*, *Journal of Applied Meteorology* **10** (1971), št. 2, 260-265.
- [16] *Albedo*. Wikipedia. Dostopno na <https://en.wikipedia.org/wiki/Albedo> Zadnje obiskano: 22. 3. 2022.
- [17] Stephens G. L., O'Brien D., Webster P. J., Pilewski P., Kato S., Li J., *The albedo of Earth*, *Reviews of Geophysics* **53** (2015), št. 1, 141-163.
- [18] U. S. Environmental Protection Agency, *Climate Change Indicators in the United States Fourth Edition*, https://19january2017snapshot.epa.gov/climate-indicators/downloads-indicators-report_.html, Zadnje obiskano: 24. 7. 2022. Uporabljena slika na strani 3.
- [19] SkyCool systems, *SkyCool Systems Data Center Case Study*, <https://www.skycoolsystems.com/data-center-cooling-case-study/>, Zadnje obiskano: 29. 3. 2022.
- [20] Zhao B., Hu M., Ao X., Pei N. C., *Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects*, *Applied energy* **236** (2019), št. 1, 489-513.
- [21] McAdam, W. H., *Heat transmission*, 3. izdaja, McGraw - Hill Book Company, inc., New York-London, 1954, Navedena enačba (7-8b) na str. 180.
- [22] *The Engineering Toolbox*, <https://www.engineeringtoolbox.com/>, Zadnje obiskano: 25. 7. 2022.
- [23] Granqvist, C. G., Hjortsberg, A., *Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting SiO films*, *Journal of applied physics* **52** (1981), št. 6, 4205-4221.

- [24] Kou J. L., Jurado, Z., Chen Z., Fan S., J. Minnich A. J., *Daytime Radiative Cooling Using Near-Black Infrared Emitters*, ACS Photonics **4** (2017), št. 3, 626-630.
- [25] Hu M., Pei G., Wang Q., Li J., Wang Y., Jie Ji J., *Field test and preliminary analysis of a combined diurnal solar heating and nocturnal radiative cooling system*, Applied energy **179** (2016), št. 1, 899-908.
- [26] Wikipedia, *Polymer*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer>, Zadnje obiskano: 21. 3. 2022.
- [27] Levinson R., Akbari, H., *Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants*, Energy Efficiency **3** (2010), št. 1, 35-109.
- [28] U.S. Energy Information Association, *Household energy in Arizona*, https://www.eia.gov/consumption/residential/reports/2009/state_briefs/pdf/AZ.pdf, Zadnje obiskano: 20. 3. 2022.
- [29] *Solar reflectivity of bridge steel products*, <https://www.bridgesteel.com/sri-values>, Zadnje obiskano: 20. 3. 2022.
- [30] Pockett, J., Belusko M., *A Review of Heat-reflective Paints*, Solar2010 Conference (Canberra, ACT, Australia), 2010.
- [31] Li X., Peoples J., Yao P., Ruan X., *Ultrawhite BaSO₄ Paints and Films for Remarkable Daytime Subambient Radiative Cooling*, ACS Applied Materials & Interfaces **13** (2021), št. 18, 21733–21739.
- [32] Sarah Cascone, *Scientists Claim This New Paint Is the Whitest White Ever Made—and It Could It Help Combat Global Warming*, <https://news.artnet.com/art-world/whitest-white-paint-global-warming-1918498>, Zadnje obiskano: 22. 3. 2022. Uporabljena slika.
- [33] Li X., Peoples J., Huang Z., Zhao Z., Qiu J., Ruan X., *Full Daytime Sub-ambient Radiative Cooling in Commercial-like Paints with High Figure of Merit*, Cell Reports Physical Science **1** (2020), št. 10, 100221.
- [34] Bao H., Yan C., Wang B., Fang X., Zhao C. Y., Ruan X., (2017), *Double-layer nanoparticle-based coatings for efficient terrestrial radiative cooling*, Solar Energy Materials and Solar Cells **168** (2017), št. 1, 78-84.
- [35] Yalçın R. A., Blandre E., Joulain K., Drévilon J., *Colored Radiative Cooling Coatings with Nanoparticles*, ACS Photonics **7** (2020), št. 5, 1312–1322.
- [36] Zhai Y., Ma Y., David S. N., Zhao D., Lou R., Tan G., Yang R., Yin X., *Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling*, Science **355** (2017), št. 6329, 1062-1066.