

Nobelova nagrada za fiziko

Jože Rakovec, Žiga Zaplotnik, Tomaž Prosen

Nobelovo nagrado za fiziko za leto 2021 so dobili trije znanstveniki: dva meteorologa, Syukuro Manabe in Klaus Hasselmann, si delita polovico nagrade, teoretični fizik Giorgio Parisi pa je prejel drugo polovico.

Na spletni strani Kraljeve švedske akademije znanosti (Nobelov odbor, 2021) o njih piše: »Trije nagrajenci si letos delijo Nobelovo

nagrado za fiziko za svoje raziskave kaotičnih in očitno naključnih pojavov. Syukuro Manabe in Klaus Hasselmann sta postavila temelje našega znanja o podnebnju na Zemlji in kako človeštvo vpliva nanj. Giorgio Parisi je nagrajen za svoje revolucionarne prispevke k teoriji neurejenih materialov in naključnih procesov.



Syukuro Manabe je meteorolog japonskega rodu, ki je meteorologijo doštudiral v Tokiu in se po doktoratu leta 1959 preselil v Združene države Amerike. Tam se je priključil skupini, ki je razvijala tridimenzionalne numerične modele ozračja za preučevanje splošnega kroženja ozračja (pa tudi za napovedovanje vremena) in ki jo je tedaj v Vremenskem uradu Združenih držav Amerike vodil Joseph Smagorinsky (sedaj se ta Laboratorij za geofizikalno dinamiko tekočin – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL – vključen v Nacionalno upravo za oceane in atmosfero – National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA). Za štiri leta se je vrnil na Japonsko kot direktor oddelka za raziskave globalnega segrevanja. Od leta 2002 je bil gostujoči raziskovalni sodelavec na univerzi Princeton, kjer je sedaj meteorolog na univerzi, vmes pa je tudi gostoval na Univerzi v Nagoji. Že pred Nobelovo nagrado je prejel veliko priznanj in medalj: Carl-Gustaf Rossby Research Medal, Blue Planet Prize, Asahi Prize, Volvo Environment Prize, William Bowie Medal, Franklin Institute Awards, Crafoord Prize. Po Wikipediji: https://en.wikipedia.org/wiki/Syukuro_Manabe. Vir slike: CC BY 2.0, Bengt Nyman.



Klaus Hasselmann je fiziko in matematiko doštudiral na Univerzi v Hamburgu in leta 1957 doktoriral v Göttingenu iz preučevanja turbulence. Posvetil se je meteorologiji, pa tudi oceanografiji. Ustanovil je Inštitut Maxa Plancka za meteorologijo (Max-Planck-Institut für Meteorologie, MPI-M) v Hamburgu. Na tem inštitutu so v devetdesetih letih prejšnjega stoletja razvili sklopljeni model: atmosferski model Evropskega centra za srednjeročne vremenske napovedi (ECMWF) so povezali z MPI-jevim modelom oceanov LSG (Large-Scale-Geostrophic ocean general circulation model). Med januarjem leta 1988 in novembrom leta 1999 je bil tudi znanstveni direktor v Nemškem podnebnem računalniškem središču (Deutsches Klimarechenzentrum, DKRZ) v Hamburgu. Bil je podpredsednik in član upravnega odbora Evropskega podnebnega foruma (danes Svetovnega podnebnega foruma), ki sta ga leta 2001 ustanovila s Carlom Jaegerjem. Pred Nobelovo nagrado je prejel ogromno priznanj in medalj – tu navedimo le nekatere: Award of the American Geophysical Union, Sverdrup Medal of the American Meteorological Union, Nansen Polar Bear Award, Oceanology International Lifetime Achievement Award, Symons Memorial Medal of the Royal Meteorological Society, Vilhelm Bjerknes Medal of the European Geophysical Society in druga. Po Wikipediji: https://en.wikipedia.org/wiki/Klaus_Hasselmann. Vir slike: CC-BY-SA 4.0 iz wikidata.org Q109370#.



Giorgio Parisi je diplomiral na Rimski univerzi La Sapienza leta 1970 pod mentorstvom Nicole Cabibbo. Bil je raziskovalec v Nacionalnem laboratoriju v Frascatiju (1971–1981) in gostujoči znanstvenik na Univerzi Columbia (1973–1974), na Institut des Hautes Études Scientifiques (1976–1977) in na École Normale Supérieure (1977–1978). Od leta 1981 do leta 1992 je bil redni profesor teoretične fizike na Rimski univerzi Tor Vergata, zdaj pa je profesor kvantne teorije na Rimski univerzi La Sapienza. Je član Simons Collaboration on Cracking the Glass Problem (to je skupina na Čikaški univerzi, ki se ukvarja z neurejenimi sistemi, nelinearnostjo in sistemi, ki so zelo neravnovesni). Od leta 2018 do leta 2021 je bil predsednik Nacionalne akademije dei Lincei. Že pred Nobelovo nagrado je bil mnogokrat počaščen: z Boltzmannovo, Diracovo in Planckovo medaljo, s Fermijevo, Lagrangeovo in Onsagerjevo nagrado – če naštejemo samo tiste, ki nosijo imena najbolj slavnih znanstvenikov.

Po Wikipediji: https://en.wikipedia.org/wiki/Giorgio_Parisi.

Vir slike: CC BY-SA 4.0 iz Wikivand.com.

Za kompleksne sisteme je značilna naključnost in neurejenost in jih je težko razumeti. Letošnja nagrada se zaveda pomembnosti novih metod za njihovo opisovanje in napovedovanje njihovega dolgoročnega vedenja.«

Nekaj o podnebjju in njegovih spremembah

Glavni dejavniki podnebjja na Zemlji so sevanje Sonca, oddaljenost Zemlje od Sonca in infrardeče (IR) sevanje Zemlje, drugi vplivi, na primer tok toplote iz Zemljine notranjosti navzven, kozmično sevanje ter Lunin odboj Sončevega sevanja in izsev pa so zanemarljivi. Energija sevanja se od Sonca širi na vse strani in zato gostota energijskega toka j upada kvadratno z razdaljo od Sonca. Pri Zemlji znaša j dobrih 1361 W/m². Na njej je zato temperatura blizu 0 stopinj Celzija – pri tleh v letošnjem povprečju približno +15 stopinj Celzija, tam zgoraj, kjer letijo letala, pa približno –50 stopinj Celzija. Na Zemlji torej niti ni tako vroče niti tako mraz kot na nekaterih drugih planetih.

Če Zemlja ne bi imela ozračja, bi bilo njeno površje izpostavljeno neposredno vesoljskemu okolju. Sončevo sevanje bi Zemlja z radijem r_z prestrezala s svojim velikih krogom – presekom s površino πr_z^2 , toda en del – aj_0 – se od nje odbija. Odbojnost a pozna-

mo na podlagi raznih podatkov – med drugim pa jo tudi vidimo na slikah Zemlje iz vesolja: največ svetlobe odbijajo bela polarna območja in rumene puščave, zelena vegetacija in modra morja pa je odbijejo precej manj ... Zelo dobro odbijajo Sončevo sevanje tudi oblaki (njihov vpliv na odbojnost prav tako upoštevamo). Tisti del, ki se ne odbije, torej $(1 - a)j_0$, pa bi Zemlja prejela. Seveda bi bila Zemlja pri tem ogreta na neko ravnovesno temperaturo in bi tudi sama sevala – v infrardečem (IR) delu sevalnega spektra po Stefanovem zakonu – s svoje celotne površine $4\pi r_z^2$ torej $4\pi\sigma r_z^2 T^4$, kjer je σ Stefan-Boltzmanova konstanta. V sevalnem ravnovesju, torej ko je moč oddanega sevanja enaka moči prejetega sevanja, bi lahko izračunali njeno ravnovesno temperaturo $T = 1/\sigma \sqrt[4]{(1-a)j_0/4}$. Dokaj natančno vemo, da je odbojnost Zemlje za celotno območje Sončeve svetlobe $a = 0,31$. Ker sta Jožef Stefan in Ludwig Boltzmann tudi določila vrednost konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴, bi izračunali temperaturo površja Zemlje – približno –20 stopinj Celzija. Hudo mraz?

K sreči ima Zemlja ozračje in v njem tudi tako imenovane toplogredne pline: vodno paro (H₂O), ogljikov dioksid (CO₂), metan (CH₄), ozon (O₃), didušikov oksid (N₂O) in druge. Ti plini so sposobni absorbirati

(vsrkati) infrardeče sevanje, infrardeče elektromagnetno valovanje, pri čemer njihove molekule pričnejo vibrirati (nihati), ker se del energije sevanja prenese v energijo vibracij (nihanj). Pogoji za to je, da se pod vplivom nihajočega električnega polja lahko težišči pozitivnega in negativnega naboja v molekuli prerazporedita. Do tega lahko pride le, če je molekula polarna (kot na primer molekula vodne pare) ali pa so polarne posamezne vezi v molekuli (obe vezi C-O v molekuli ogljikovega dioksida). S tem da absorbirajo približno sedemdeset odstotkov infrardečega sevanja, ki ga oddajajo tla (pri nekaterih valovnih dolžinah skoraj vse, pri drugih manj), povzročijo, da ta del ne gre neposredno v vesolje. K vplivu tople grede¹ daleč največ (približno šestdeset odstotkov) prispeva vodna para (v zraku je je med nekaj promili – odtisočki - in nekaj odstotki), sledi ogljikov dioksid (0,4 promila oziroma odtisočka) s približno eno četrtno vpliva, pa metan (slabi dve milijoninki) z nekaj manj kot desetino vpliva in tako dalje.

Molekule dušika in kisika, ki jih je v zraku največ, ne vsebujejo polarnih vezi in ta najbolj zastopana plina ozračja k topli gredi ne prispevata.

Seveda so na Zemlji precejšnje podnebne razlike. Omenili smo že razmere pri tleh in v višinah in že iz osnovne šole vemo, da je pri tleh ob ekvatorju topleje, v polarnih predelih pa mraz. Topleje je tudi ob zahodnih obalah celin kot ob vzhodnih, saj k zahodnim obalam oceanski tokovi prinašajo toplejšo vodo

od jugozahoda: k Evropi tako imenovani Zalivski tok, medtem ko je na drugi strani Atlantika precej bolj mraz, med drugim tudi zato, ker tja doteka hladni Labradorški tok. Pa še marsikaj bi lahko povedali.

Razmere pa se ne spreminjajo le iz kraja v kraj in z letnimi časi, ampak tudi v daljših časovnih obdobjih. S tem se ukvarja paleoklimatologija. Za primer: v obdobju jure (v obdobju dinosavrov in preslic pred 150 do 200 milijoni let) je bilo marsikje znatno topleje, kot je danes. Pa ne samo zaradi na splošno toplejšega podnebja, ampak tudi zato, ker so se celine v geoloških obdobjih preoblikovale in premikale ter tedaj niso bili tam, kjer so danes. Nekaj o metodah paleoklimatologije, tudi na podlagi vrtnanj globoko v oceanske sedimente in v led na Antarktiki in Grenlandiji ter glede na izotopsko sestavo elementov v njih, je poročal tudi že *Proteus* (Rakovec, 2009). Do približno leta 2000 so iz globokih vrtn v ledu razvozlali temperaturne razmere za približno 400 tisoč let v zgodovini in potrdili, da se glavne ledene dobe pojavljajo na vsakih 100 tisoč let, da se tedaj ohladi za kakih pet do šest stopinj, pa potem nazaj segreva, in da je bilo zadnje ledene dobe konec pred približno 11,7 tisoč leti.

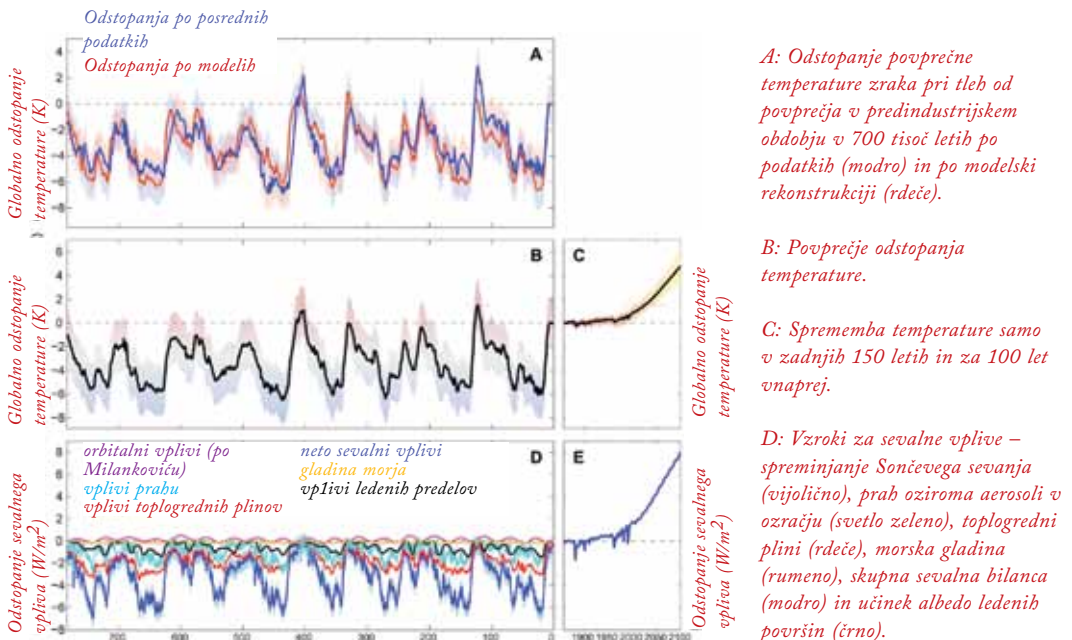
Sedaj, dvajset let kasneje, so iz še globljih vrtnin potegnili nove in dlje v geološko zgodovino segajoče vzorce, iz katerih so lahko določili prevladujočo temperaturo na Zemlji pri tleh v zadnjih 800 tisoč letih. Friedrich in sodelavci (2016) so preučili podatke o temperaturi morske površine, dobljene iz 63 globokih vrtn, podrobneje pa upoštevali tiste iz štirinajstih vrtn in dobili ocene za temperature na sliki 1. Do podobnih ugotovitev in slik so prišli s podatki iz vrtn v ledu, na primer na Antarktiki, tudi Haeberli in sodelavci (2021).

Zakaj nas torej skrbi sedanje segrevanje za dobro stopinjo v zadnjem stoletju in morda za še dve ali morda tri stopinje v naslednjih stotih letih? Ko malo bolj podrobno pogledamo sliki A ali B, vidimo, da so se v zgo-

1 Izraz »topla greda« je ponesrečen in tudi fizikalno netočen, ampak ga zaradi zgodovinskih razlogov zdaj uporabljamo. Izraz je namreč skoval Fourier po analogiji z de Saussurovo »vročo škatlo« (Horace Bénédicte de Saussure, 1740–1799), vendar pa je v njej fizikalni mehanizem, ki povzroči dvig temperature, precej drugačen. Plasti stekla v de Saussurovi škatli preprečujejo konvekcijo vročega zraka, ki tako ostane ujet med njimi. Infrardeče sevanje iz ogretega stekla je v njegovem eksperimentu drugotnega pomena, glavni učinek je, da se plasti zraka ne mešajo. Pri sevalni »topli gredi« pa je prav infrardeče sevanje bistveno za to, da je na Zemlji pri tleh topleje, kot če infrardeče absorpcije in emisije v ozračju ne bi bilo.

Slika 1 iz članka: Friedrich in sod., 2016: *Nonlinear climate sensitivity and its implications for future greenhouse warming.*

© avtorji, nekatere pravice pridržane; izključne pravice American Association for the Advancement of Science AAAS. Ponatisnjeno z dovoljenjem AAAS v okviru licence CC BY-NC 4.0.



A: Odstopanje povprečne temperature zraka pri tleh od povprečja v predindustrijskem obdobju v 700 tisoč letih po podatkih (modro) in po modelski rekonstrukciji (rdeče).

B: Povprečje odstopanja temperature.

C: Sprememba temperature samo v zadnjih 150 letih in za 100 let vnapij.

D: Vzroki za sevalne vplive – spreminjanje Sončevega sevanja (vijolično), prah oziroma aerosoli v ozračju (svetlo zeleno), toplogredni plini (rdeče), morska gladina (rumeno), skupna sevalna bilanca (modro) in učinek albedo ledenih površin (črno).

E: Sevalni vplivi samo v zadnjih 150 letih in za 100 let vnapij.

dovini temperature spreminjale na približno vsakih sto tisoč let, sedaj pa smo priča dvestokrat hitrejšemu ogrevanju v preteklem stoletju – ena stopinja na sto let. Sliki C in E pa napovedujeta še veliko hitrejše naraščanje temperature v naslednjem stoletju. Tako hitro ugotovimo, zakaj smo sedaj lahko zaskrbljeni!

Nobelovi nagrajenci za fiziko v letu 2021 si delijo nagrado za svoje raziskave kaotičnih in očitno naključnih pojavov. Meteorologa Syukuro Manabe in Klaus Hasselmann sta postavila temelje našega znanja o podnebnju na Zemlji in kako človeštvo vpliva nanj – torej predvsem s svojimi raziskavami v zvezi s tistim, kar kažeta sliki C in E. Teoretični fizik Giorgio Parisi pa je bil nagrajen za svoje revolucionarne prispevke k teoriji ne-

urejenih materialov in naključnih procesov na različnih področjih fizike ter najrazličnejših velikostih, od atomskih do planetarnih. Med drugim je nagrado dobil tudi za teorijo, na podlagi katere lahko razložimo prehode med ledenimi dobami in vmesnimi toplimi obdobji, ki so videti precej kaotični in jih prikazujeta sliki A in B.

Kako je raziskoval in kaj je ugotovil Syukuro Manabe

Na spletni stani Nobelovega odbora za fiziko o Manabeju piše med drugim:

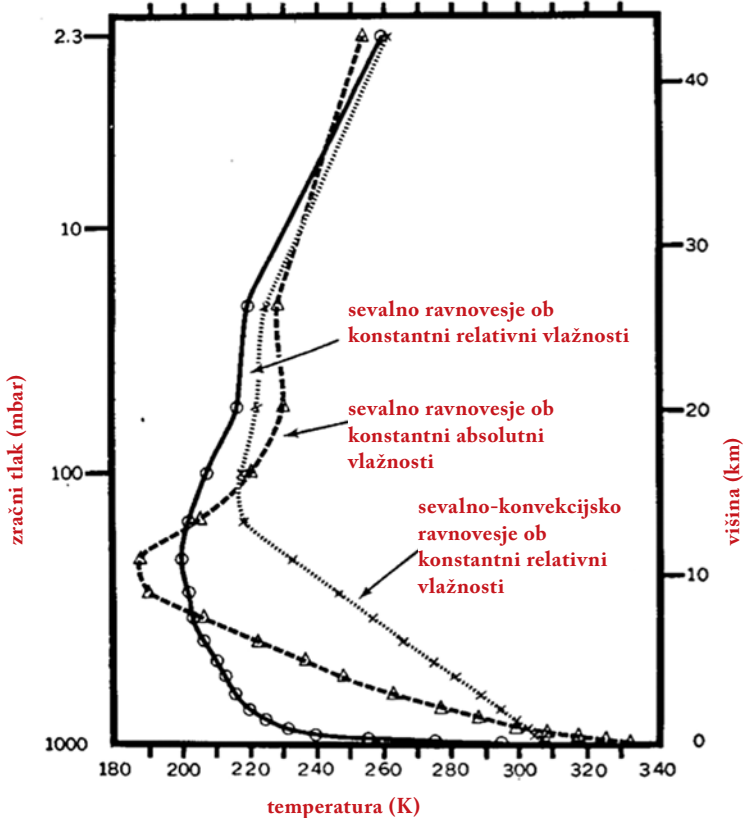
»Eden od zapletenih sistemov, ki so ključnega pomena za človeštvo, je podnebje Zemlje. Syukuro Manabe je pokazal, kako povečane ravni ogljikovega dioksida v ozračju vodijo do povišanja temperatur na površini

Zemlje. V šestdesetih letih prejšnjega stoletja je vodil razvoj fizikalnih modelov podnebja in bil prvi, ki je raziskal medsebojni vpliv med sevalnim ravnovesjem in vertikalnim transportom zračnih mas, to je konvekcijo. Njegovo delo je postavilo temelje za razvoj sedanjih podnebnih modelov.«

Syukuro Manabe je do nekaj svojih ugotovitev o podnebjju Zemlje prišel s povsem preprostimi modeli podobnega tipa, kot je omenjen v uvodu (ki daje na primer za tem-

peraturo rezultat $T = 1/\sigma \sqrt{(1-a)_0/4}$), ter z enodimensionalnimi modeli podnebja – torej takimi, ki preučujejo potek podnebnih spremenljivk v enem atmosferskem stolpcu navzgor skozi ozračje od tal proti vesolju, pa tudi s tridimensionalnim modelom ozračja, v katerem se lastnosti ozračja spreminjajo tudi s časom – torej z modelom splošnega kroženja ozračja. Da ne bi samo z besedami opisovali, kaj vse je Manabe ugotovil, bomo

Slika 2 iz članka Manabe in Wetherald (1967) kaže potek temperature z višino, če v ozračju približno linearno upada absolutna vlažnost (črtasta črta s trikotnički) ali pa linearno upada relativna vlažnost (polna črta s krogi). Pri prvem gre za linearni upad dejanske količine vodne pare v zraku, pri relativni vlažnosti pa gre tudi za vpliv temperature: neka količina vodne pare na primer v toplem zraku pri tleh lahko pomeni nizko relativno vlažnost, v mrzlem zraku tam zgoraj pa ta ista količina vodne pare pomeni visoko relativno vlažnost (ali celo prenasičenje in tvorbo oblakov). Tretji potek (pikčasta črta s križci) pa pove tudi – kar sta ugotovila že Manabe in Strickler –, da mešanje zraka po vertikali, kar močno pripomore k temu, da je pri tleh nekaj hladneje in zgoraj manj mraz v primerjavi z dogajanjem brez prenašanja toplote v višine s takim mešanjem. Ponatisnjeno z dovoljenjem Ameriškega meteorološkega združenja AMS - Published (1967) by the American Meteorological Society.

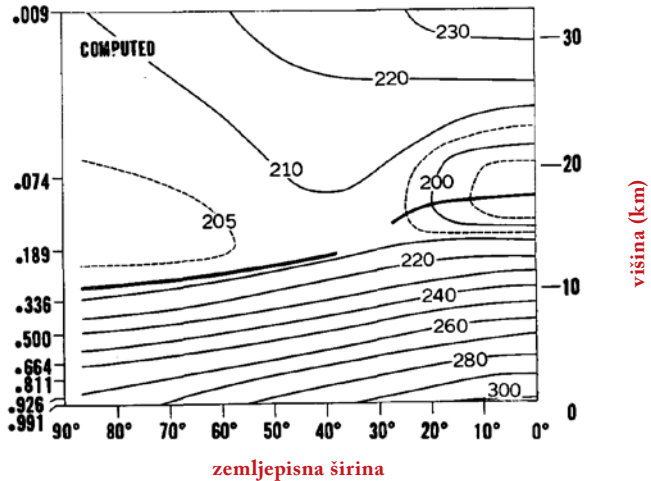


iz njegovih člankov povzeli kako sliko z rezultati. Večina zgodnejših Manabejevih izsledkov je temeljila na enodimenzionalnem modelu ozračja, s katerim sta Manabe in Strickler (1964) ozračje razdelila na osemnajst plasti. Opisala sta sevalni prenos toplote med vrhom ozračja, različnimi plastmi ozračja ter tlemi. Upoštevala sta dva najpomembnejša absorberja dolgovalovnega sevanja v ozračju – vodno paro in ogljikov dioksid – ter najpomembnejši absorber kratkovalovnega Sončevega sevanja – stratosferski ozon. V modelu sta opisala tudi konvektivni

prenos toplote, pri čemer sta upadanje temperature z naraščajočo višino (vertikalni temperaturni gradient) v troposferi omejila na 6,5 kelvina na kilometer, kolikšen je tudi povprečni vertikalni temperaturni gradient. Tako sta kot prva uspela približno opisati podoben potek temperature z višino, kot so ga izmerili z radiosondnimi meritvami in kar dotlej ni uspelo njunim predhodnikom, ki so uporabljali zgolj sevalne modele. V model sta uvedla tudi oblake in sklepała, da visoki cirusni oblaki najverjetneje prispevajo k toplejšemu površju, nizki oblaki pa k hladnejšemu.

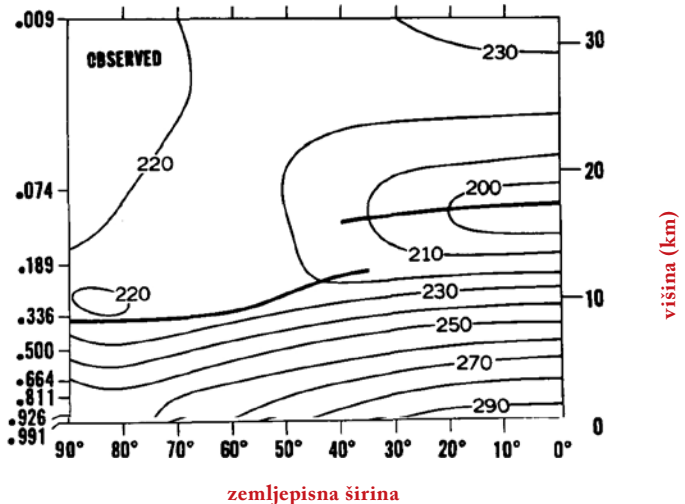
Slika 3 iz članka Manabe, Smagorinsky in Strickler (objava National Weather Service, 1965): Izračunane razporeditve temperature v ozračju od ekvatorja (desni rob) do tečaja (levi rob) ter od tal do približno 32 kilometrov višine se zelo dobro ujemajo z opazovanimi na naslednji, spodnji sliki. Ponatisnjeno z dovoljenjem Nacionalne agencije za oceane in ozračje (NOAA). Published (1965) by the National Weather Service.

zračni tlak p , normiran s tlakom p^* pri tleh

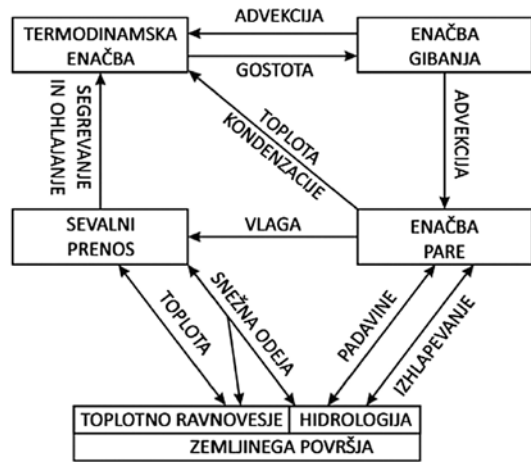


Slika 4 iz istega članka: Izmerjene razporeditve temperature na istem območju ozračja. Ponatisnjeno z dovoljenjem NOAA. Published (1965) by the National Weather Service.

zračni tlak p , normiran s tlakom p^* pri tleh



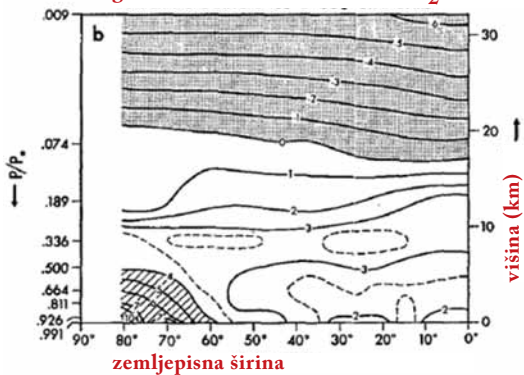
Slika 5 iz članka Manabe in Wetherald, 1975: V tridimenzionalnem modelu so upoštevali gibanje zraka, termodinamske procese, sevalne prenose energije, izhlapevanje, spremembe med različnimi oblikami vode (led, voda, para) ter dogajanja pri tleh. Published (1975) by the American Meteorological Society. Prevedana verzija slike je povzeta po Rakovec in Prosen, 2022: Nobelova nagrada 2021 za fiziko. Obzornik za matematiko in fiziko, 69 (1).



Slika 6 iz istega članka: Če bi se količina ogljikovega dioksida v ozračju podvojila, bi se pri tleh najmočnejše ogrelo blizu tečaja, celo do deset stopinj, drugod pa za dve do tri stopinje. Precej pa bi se ohladila stratosfera: na višini približno 20 kilometrov za kako stopinjo, še višje pa tudi za pet, šest stopinj. Published (1975) by the American Meteorological Society.

zračni tlak p , normiran s tlakom p^* pri tleh

Razlika temperature pri dvojni količini CO_2 glede na standardno količino CO_2



Ker je vodna para v zraku najmočnejši toplogredni plin, je Manabe z Wetheraldom (1967) preučil še, kako razporeditev tega plina v ozračju vpliva na podnebje, kar Nobelov odbor posebej poudarja.

Rekli smo že, da je Syukuro Manabe do mnogih ugotovitev prišel tudi z modeliranjem s trirazsežnim časovno odvisnim modelom za splošno kroženje ozračja. Najprej je bilo treba pripraviti model za simulacije. V skupini Smagorinskega so ga dobili tako, da so Phillipsov model za splošno kroženje ozračja predelali. Norman Phillips je namreč (1956) tak model uporabil za prvo numerično podnebno simuliranje splošnega kroženja na planetu, a ga je moral pošteno oklestiti, saj tedaj računalniki pač še niso

bili kaj prida zmogljivi. Desetletje kasneje pa so Manabe, Smagorinsky in Strickler ter Smagorinsky, Manabe in Holloway (v dveh člankih leta 1965) od poenostavljenih enačb že lahko prešli nazaj na prvotne enačbe (kaj vse upošteva ta sistem enačb, je shematično prikazano na sliki 5) in od samo dveh nivojev v ozračju na devet. V vsakem stolpcu so uporabili tudi enak model sevanja in konvekcije, kot smo ga na kratko že opisali. Procese v ozračju so simulirali na horizontalno omejenem območju med 0 in 120 stopinj zemljepisne dolžine na eni polobli z zelo poenostavljenim spodnjim robnim pogojem. Da je bil tak model vseeno uspešen, kažeta sliki 3 in 4 iz prvega od naštetih člankov.

Ko se je pokazalo, da je trirazsežni časovno odvisni model dovolj zanesljiv, je Manabe lahko nadaljeval z drugimi testiranjmi tega ali onega vpliva na podnebne razmere na Zemlji. Pokažimo samo še en rezultat: kaj bi se zgodilo, če bi se količina ogljikovega dioksida v ozračju podvojila (slika 6)? Ugotovil je, da bi se globalna povprečna temperatura zraka pri tleh pri podvojitvi koncentracije ogljikovega dioksida s 300 na 600 ppm povečala za 2,35 stopinje Celzija, kar je nekje na spodnji meji današnje najboljše ocene za ravnovesno občutljivost podnebnega sistema (angleško *equilibrium climate sensitivity*), ki znaša s 66-odstotno verjetnostjo med 2,3 in 4,7 stopinje Celzija. Ravnovesna občutljivost podnebnega sistema nam pove, za koliko bi se ozračje blizu tal ogrelo po dolgem času (dokler ne bi dosegli ravnovesja), če bi podvojili koncentracijo ogljikovega dioksida v zraku iz predindustrijskih vrednosti (270 ppm), torej na 540 ppm. Za te in še mnoge druge ugotovitve je Syukuro Manabe dobil del Nobelove nagrade za fiziko za leto 2021.

Raziskave Klause Hasselmanna

Zanj Nobelov odbor za fiziko poudarja: »Klaus Hasselmann je približno deset let za Manabejem ustvaril model, ki povezuje vreme in podnebje, s čimer je odgovoril na vprašanje, zakaj so podnebni modeli lahko zanesljivi, čeprav je vreme spremenljivo in kaotično. Razvil je tudi metode za prepoznavanje značilnih signalov, »prstnih odtisov«, ki jih tako naravni pojavi kot človekove dejavnosti vtisnejo v podnebje. Njegove metode so bile uporabljene kot dokaz, da je povišana temperatura v ozračju posledica človeških izpustov ogljikovega dioksida.«

Klaus Hasselmann je teoretično utemeljil, zakaj so podnebni modeli lahko zanesljivi kljub spremenljivemu in kaotičnemu vremenu (Hasselmann, 1976). Ugotovil je, da se robustni, počasni podnebni sistem prilagaja hitrim, dokaj neurejenim vremenskim dogodkom podobno, kot se pri Brownovem gibanju neki večji delec naključno sprehaja

sem in tja (angleško *random walk*), ker se vanj zaletava množica drobnih delcev, hitrih molekul v plinu ali kapljevini, ki se povsem neurejeno gibljejo.

Podnebje določa skupek procesov v ozračju, oceanih, kriosferi in na kopnem, ki so med seboj združeni. Ti imajo različne značilne dolžine trajanj ali ponovitev. Turbulentni vrtinci v ozračju trajajo na primer značilno le nekaj minut, nevihte ali pa obalni veter nekaj ur, orkani in tropske nevihte nekaj dni, barične tvorbe (cikloni in anticikloni) od nekaj dni do nekaj tednov. Bistveno počasnejši so procesi v oceanih, kriosferi in na kopnem. Vremenske procese so zato pri opisu podnebnega sistema pogosto povprečili. Hasselmann pa je leta 1976 (članek v *Tellusu*) uporabil povsem nov pristop k analizi spremenljivosti podnebja: vremensko spremenljivost je opisal kot naključno dogajanje (stohastični šum), ki sili podnebje, da se tem naključnim »motnjam« ves čas prilagaja. Naključno siljenje torej povzročajo hitra »vremenska« dogajanja, nanje pa se počasi odzivajo robustni deli podnebnega sistema, kot so ledene plošče, oceani ali vegetacija Zemljinega površja, ki tako delujejo kot povezovalci teh naključnih vplivov. To je podobno kot pri Brownovem gibanju, kjer se težji delci odzivajo na sile, ki jih nanje povzročajo trki veliko lažjih delcev. Težji delec pri tem napravi naključni »sprehod« in se vse bolj oddaljuje od začetnega stanja – v povprečju sorazmerno s kvadratnim korenem časa. Podnebni sistem pa vsebuje tudi negativne povratne vplive na naključne odklone zaradi vremena, ki podnebni sistem ves čas silijo nazaj proti ravnovesnemu stanju. Tako pri Hasselmannovi raziskavi ni bil cilj odkrivanje pozitivnih povratnih vplivov (ki bi podnebje oddaljevali od ravnovesnega stanja), ampak prepoznavanje procesov negativnih povratnih vplivov, ki so nujni, da kljub naključnim »vremenskim« gonilnim vplivom podnebje kljub vsemu ostane blizu ravnovesja. Izpeljal je enačbo, ki opisuje posledice naključnega premikanja, kar ga

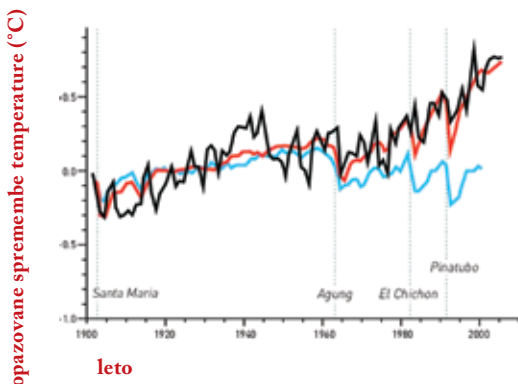
je pripeljalo do osnovne Fokker-Planckove enačbe, ki pove, kako se stohastični sistem spreminja s časom. Izpeljal je še posebne rešitve za linearne povratne vplive, kar omogoča spoznanja glede podnebne napovedljivosti. To sta potem naprej preučila Frankignoul in Hasselmann (tudi v *Tellusu*, 1977). Že ta dokaj zapleteni opis pokaže, da so Hasselmannove teoretične utemeljitve precej zahtevne – Hasselmann je v intervjuju za *Die Welt* celo sam rekel, da je njegova teoretična razlaga iz leta 1976 »neberljiva« (glej Max-Planck-Gesellschaft, 2021).

Hasselmann je kasneje (1993) tudi teoretično raziskal, kako izluščiti »prstne odtise« takih in drugačnih vplivov na podnebje. Lažje kot ta njegov teoretični članek je opisati, kar je s sodelavkami in sodelavci razložil (Hegerl, Hasselmann in sod., 1997) ali pa so sodelavci razložili sami (Hegerl in sod., 2011) na podlagi konkretnih podatkov o podnebnih spremembah. Bistvo »metode prstnih odtisov« je razločiti od človeštva povzročene spremembe od naravnih, na primer od spreminjajočega se Sončevega obseva ali pa vulkanske aktivnosti, torej kako na optimalni način izluščiti signal sistematičnih podnebnih sprememb iz močne spremenljivosti podnebja. Uporabili so zelo podroben model ozračja in oceanov in z različnimi simulacijami dobili različne razporeditve temperature na Zemlji pri tleh in spreminjanje teh razporeditev v času. Pri eni simulaciji so vključili samo toplogredne

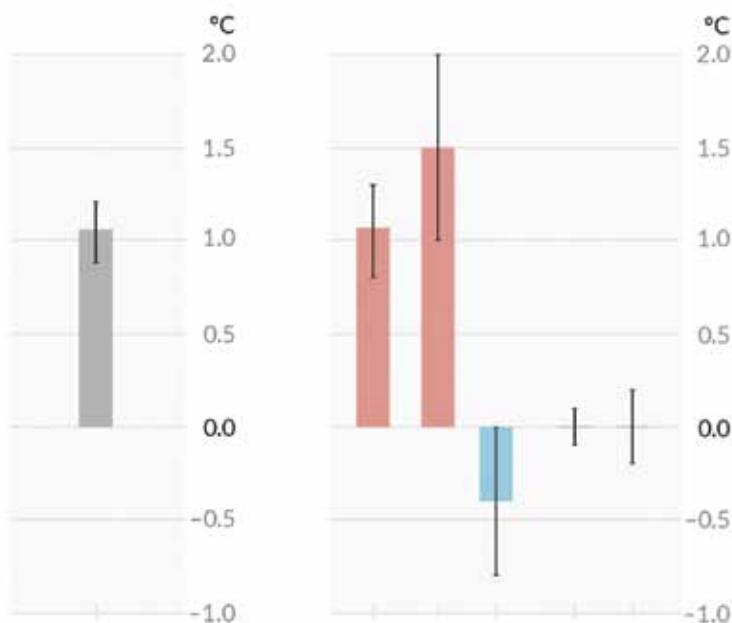
pline v ozračju, pri drugi pa so dodali še sulfatne aerosole v ozračju – porast koncentracije obojega naj bi bil posledica človekovih dejavnosti od začetka industrijske revolucije. Še druge simulacije pa so upoštevale spremenljivost Sončevega obseva – kot povsem naravni pojav. Z empiričnimi ortogonalnimi funkcijami so nato poiskali prostorske vzorce temperature, ki čim bolj opišejo izmerjene prostorske razporeditve temperature. Glede sprememb v času pa so z analizo glavnih komponent poiskali prevladujoči opis časovnih sprememb. Potem so poiskali tisti del prostorskega vzorca, ki kar najbolj predstavi razlike med vplivom samo toplogrednih plinov ter toplogrednih plinov skupaj z aerosolom. To je bi njihov poskusni »prstni odtis« toplogrednih plinov, potem pa so ga še izboljšali, tako da so (z uporabo kovariančne prostorske funkcije) upoštevali še, kako so razmere na nekem območju statistično povezane z razmerami na nekem drugem območju.

Ker so raziskave Klause Hasselmana izrazito teoretične, je v njegovih objavah res težko najti kako tako sliko, da bi bila zanimiva za široko občinstvo. So pa njegovi sodelavci objavili – skupaj z njim – tudi splošno zanimive slike (Hegerl in sod., 1997; Bruckner in sod., 2003, oba članka sta dostopna na svetovnem spletu) ali pa so njegova spoznanja povzeta na slikah, kot sta sliki 7 in 8.

Pri sliki 7 naraščanje v zadnjih desetletjih



Slika 7, povzeta iz obrazložitve Nobelovega odbora za fiziko, kaže naraščanje temperature v obdobju od leta 1960 dalje glede na povprečje obdobja od leta 1901 do leta 1950 (črna črta), izračunane naravne in človekove prispevke k temu naraščanju (rdeča črta) in posebej naravne prispevke (modra črta). Ponatisnjeno z dovoljenjem Kraljeve švedske akademije znanosti. ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences.



Slika 8, izrez iz prikaza IPCC 2021 deležev k ogretju ozračja v desetletju 2010–2019 glede na predindustrijsko obdobje: Od leve proti desni: opazovano ogretje (sivo), vsi človekovi vplivi in vplivi toplogrednih plinov (oboje rdeče), drugi človekovi vplivi, predvsem žvepleni aerosol (modro), vplivi osonečenja in vulkanov ter na koncu notranja spremenljivost podnebne/klimatskega sistema. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf, Prosto dostopno po licenci CC BY 4.0.

lahko pripišemo človekovemu vplivu (rdeča črta), kajti naravni vzroki (modra črta) vzdržujejo temperaturo na približno isti ravni. Glavne naravne fluktuacije naj bi povzročili močni vulkanski izbruhi. Po sliki 8 pa naj bi človekovi vplivi prispevali k ogrevanju ozračja zaradi izpustov toplogrednih plinov, pa tudi zavirali to ohlajanje zaradi svetlega, skoraj belega žveplovega aerosola, ki odbija Sončevo svetlobo.

Giorgio Parisi je v zelo naključnih dogajanjih kljub vsemu našel nekaj reda

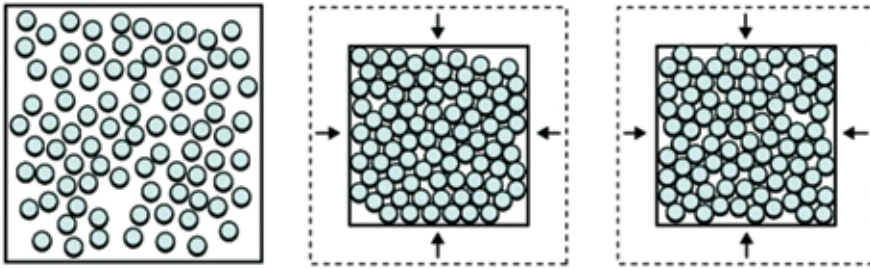
O Giorgiu Parisiju je Nobelov odbor za fiziko med drugim zapisal:

»Okoli leta 1980 je Giorgio Parisi odkril skrite vzorce v neurejenih kompleksnih materialih. Njegova odkritja so med najpomembnejšimi prispevki k teoriji kompleksnih sistemov. Omogočajo razumevanje in opis številnih različnih in na videz povsem naključnih pojavov in neurejenih sistemov, ne le v fiziki, ampak tudi na drugih, zelo različnih področjih, kot so matematika, biologija, nevroznanost in strojno učenje.«

Teoretični fizik Giorgio Parisi se je veliko

ukvarjal z na videz povsem neurejenimi, stohastičnimi in zelo kompleksnimi pojavi, pa vendar je približno leta 1980 odkril nekaj splošnih lastnosti kompleksnih sistemov, ki usmerjajo taka dogajanja. Preprosti primer, ki ga na svoji spletni strani navaja tudi Nobelov odbor za fiziko, je množica kroglic, ki ponazarja molekule plina (slika 9). Če se plin počasi ohlaja, se plin najprej utekočini, potem pa vedno uredi v urejeni kristal trdne snovi. Če pa se vse skupaj zgodi hitro, lahko nastane ne povsem urejena trdna snov, in to vsakič malce drugačna. To je model za obnašanje steklastih snovi. Posebej zanimivo je to, da se ob sicer povsem enako hitrih ohlajanjih molekule zgostijo na nekoliko drugačne načine – torej je zgoščevanje ob hitrem ohlajanju stohastični pojav.

Parisi je sicer obravnaval malo drugačen sistem: spinsko steklo. Primer zanj je na primer zlitina, pri kateri so v kristal železa sem in tja vključeni posamezni atomi bakra. Ti dodatki povzročijo, da so magnetne lastnosti takega kristala drugačne od kristala čistega železa in precej nenavadne. Pri obravnavi takih snovi je Giorgio Pari-



Slika 9 s spletne strani Nobelovega odbora za fiziko. *Molekule se pri hitrem ohlajanju lahko zgoščujejo na različne načine, vsakič malce drugače.* Ponatisnjeno z dovoljenjem Kraljeve švedske akademije znanosti, ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences.

si odkril, da se navidezno naključni pojavi podrejajo nekaterim pravilom, ki jih do tedaj niso poznali. Ta pravila so mnogi fiziki tedaj iskali z matematično metodo, imenovano »trik replik«, pri kateri hkrati obravnavajo množico identičnih kopij sistema, a vsi so prišli do fizikalno napačnih rezultatov svojih izračunov. Parisi pa je odkril, da se pri mnogih različnih kopijah (replikah) simetrija med ponovljenimi kopijami spontano zlomi, in to objavil v dveh člankih (Parisi, 1979a in 1979b). Spontani zlom simetrije lahko razumemo takole: kljub temu, da je problem povsem simetričen glede na zamenjavo replik, pa se v rešitvi, ki minimizira prosto energijo sistema replik, te med seboj razlikujejo. V replikah je Parisi odkril skrito strukturo in našel matematično smiselni (in pravilni) način, kako z opisom faznega prehoda zloma simetrije n replik korektno izvesti limito, ko gre n proti 0 , kar na koncu omogoča konkretni izračun proste energije in drugih termodinamskih količin sistema². Morda ni presenetljivo, da so bili mnogi do Parisijeve rešitve in razlage zelo skeptični, in kar dolgo je trajalo, da so ju tudi drugi spoznali za pravilni. Šele četrto stoletja ka-

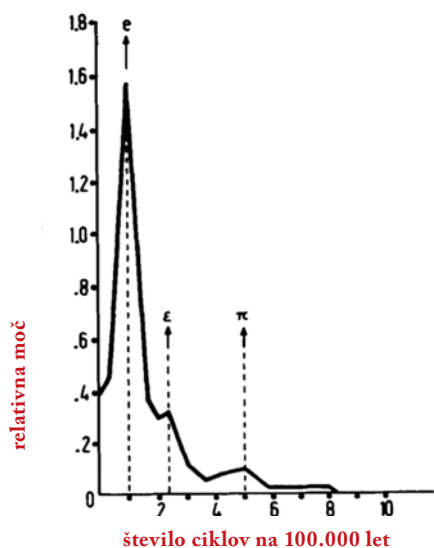
sneje je Tallagrand (2006) v članku, objavljenem v najprestižnejši matematični reviji *Annals of Mathematics*, Parisijevo rešitev tudi formalno dokazal in jo razglasil za »temeljni izrek matematične analize«. In danes se je pravilnost pokazala tudi pri nekaterih primerih praktične uporabe, na primer pri neurejenih laserjih (Ghofraniha in sod., 2015). Na povsem teoretičnem področju velja omeniti vsaj še eno Parisijevo odkritje – kako na univerzalni način rastejo neurejene površine na mejah med različnimi snovmi, kar opisuje Kardar-Parisi-Zhangova stohastična parcialna diferencialna enačba. Zanj so zadnje čase našli kar nekaj primerov uporabe na najrazličnejših področjih – od že omenjene rasti površin ob naključnem nalaganju snovi preko modeliranja prometa na avtocestah do nenavadnega prenosa snovi, učinkovitejšega od difuzije, ter do v Ljubljani odkrite povsem nepričakovane veljavnosti Kardar-Parisi-Zhangove enačbe v kvantnem magnetizmu v modelih z neobičajnimi simetrijami (Ljubotina in sod., 2019).

Poleg omenjenih je treba spomniti na številne druge temeljne Parisijeve prispevke v statistični fiziki, ki danes navdihujejo tisoče raziskovalcev. Parisijevi prispevki k razumevanju dinamičnih procesov v kompleksnih sistemih in dinamičnih sistemov na splošno ga tematsko približajo tudi delu meteorologov Manabeja in Hasselmanna. Za

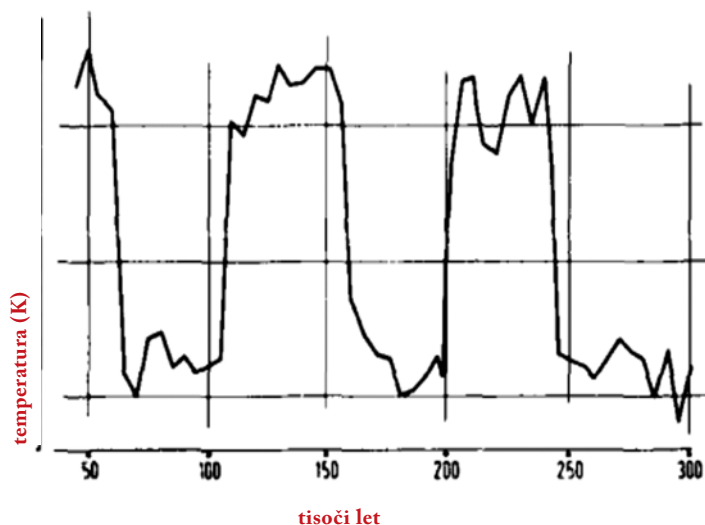
2 Ideja te nenavadne limite pride iz računa termodinamskega povprečja logaritma neke količine, na primer Z , ki ga lahko zapišemo kot $\ln Z = \lim_{n \rightarrow 0} (Z^n - 1)/n$. Pokaže se, da je za izračun limite običajno dovolj poznati funkcijo na desni strani enačbe za vsa naravna števila n .

potrditev te teze samo omenimo članek o stohastični resonanci v klimatologiji. Tu je Parisi sodeloval z italijanskim teoretičnim fizikom Benzijem in še dvema sodelavcema (Benzi in sod., 1982). Skušali so razložiti periodične prehode med ledenimi dobami in medledenimi toplimi obdobji. Že skoraj stoletje vemo, da je glavna perioda ledenih dob približno 100.000 let in da se ta ujema s periodo ekscentričnosti Zemljine eliptične orbite okrog Sonca, kar je izračunal srbski geofizik in astronom Milanković že okrog leta 1920, objavil najprej leta 1930 v berlinskem *Handbuchu der Klimatologie*, razširjeno pa kot monografijo med drugo svetovno vojno (Milanković, 1941). Poleg glavnega vpliva ekscentričnosti sta še manjša astronomska vpliva pri periodah približno 41.000 let zaradi spreminjanja nagiba Zemljine osi glede na ravnino ekliptike in 20.000 let zaradi precesije (opletanja) smeri Zemljine osi (glej sliko 10). Orbitalni cikli torej določajo glavno periodiko sprememb temperature. Vendar pa po ugotovitvah Benzija in sodelavcev spremembe energije sevanja Sonca, ki jo prejme Zemlja, zaradi sprememb ekscentričnosti lahko razložijo zgolj spreminjanje

globalne povprečne temperature okrog 0,2 stopinj Celzija oziroma do največ 1 stopinje Celzija, če vključimo še povratno zanko zaradi albeda ledenih površin (višja temperatura, manj ledu, manj odbitega sevanja, še višja temperatura in tako naprej). Nikaikor pa spremembe ekscentričnosti same ne morejo razložiti temperaturne razlike 10 stopinj Celzija med ledeno dobo in toplim obdobjem. Avtorji so se zato naslonili na delo Hasselmanna (1976) in v preprost konceptualni model energijske bilance Zemlje, kakršnega smo opisali že v uvodu članka, uvedli dve predpostavki. Predpostavili so dva, za 10 stopinj različna stabilna temperaturna režima ter kot drugo predpostavko uvedli še šibek naključni (stohastični) šum z varianco (povprečje kvadratov odklonov posameznih vrednosti od povprečja $0,15 K^2$, ki predstavlja majhne naključne spremembe globalne povprečne letne temperature od enega leta do drugega). Da takšen šum v resnici obstaja, so vedeli iz podnebnih modelov. Z uvedbo šuma so končno lahko simulirali preskoke temperature velikosti 10 stopinj Celzija med ledeno dobo in toplim obdobjem (kot je prikazano na sliki 11).



Slika 10 iz članka Benzi in sod., 1982: Spektralna gostota moči časovne vrste (časovna vrsta je zaporedje podatkov, ki si drug za drugim sledijo v času – ponavadi v enakih časovnih intervalih), ki opisuje razmerje koncentracij kisikovih izotopov ^{18}O in ^{16}O v sedimentih fosilnega planktona iz globokomorske vrtnice v ekvatorialnem Tibeem oceanu. Najmočnejši je vpliv enega cikla na sto let (ϵ), manj pomembna pa sta cikla na 41 tisoč (ϵ) in na 20 tisoč let (π). Mera je značilna za temperaturo morja. Več kot je izotopa ^{18}O v sedimentih, hladnejše je podnebje. Za več o tem glej na primer v članku Rakovca v Proteusu iz oktobra leta 2009. Prosto dostopno, ponatisnjeno v okviru licence CC BY-NC 4.0.



Slika 11 iz istega članka: *Simulacija periodičnih prehodov med ledeno dobo in toplim obdobjem s periodo približno 100.000 let, ki so jih spodbudile variacije ekscentričnosti. Prosto dostopno, ponatisnjeno v okviru licence CC BY-NC 4.0.*

Verjetnost za takšen skok iz ledene dobe v medledeno dobo, ki ga vzbudi naključen proces, se namreč drastično poveča v primeru zunanje siljenja, torej na primer zaradi sprememb ekscentričnosti. Benzi, Parisi, Suter in Vulpiani so torej potrdili stohastično resonanco, pojav, kjer šum (majhne naključne spremembe temperature) v kombinaciji z zunanjim siljenjem (ekscentričnost Zemljine orbite) lahko povzroči prehode dinamičnega sistema iz enega stabilnega stanja v drugo stabilno stanje. Njihovo odkritje je razložilo tudi prehode med drugačnimi ravnovesnimi stanji, na primer v bioloških in drugih dinamičnih sistemih.

Kljub vsemu pa moramo bralce opozoriti, da to ni edina razlaga, kako pride do prehoda iz enega stabilnega podnebne stanja v drugega. Pomemben vpliv imajo namreč tudi biogeokemični procesi na Zemljini površini, na primer ogljikov cikel. Pri višji temperaturi namreč biosfera v ozračje izpušča nekaj naprednega ogljikovega dioksida in poveča toplogredni učinek, kar vodi v še višje temperature in tako naprej. Ogljikov dioksid torej v tem primeru učinkuje kot ojačevalec orbitalnih sprememb. A kot že rečeno, trenutno so spremembe temperature

in koncentracije ogljikovega dioksida v zraku prehitre, da bi jih lahko pripisali naravnim dejavnikom.

Za konec

Nobelova nagrada za fiziko za leto 2021 je prvič podeljena za preučevanje dogajanj, ki določajo vreme in podnebje, in za preučevanje neurejenih, stohastičnih sistemov. Za raziskave o ozračju je sicer dobil nagrado leta 1947 Edward Victor Appleton, in sicer za odkritje ionosfere visoko v ozračju, kar pa ni neposredno povezano s podnebjem. Tudi za raziskavo stohastičnih pojavov nagrade še ni bilo. Pojav turbulentnosti, ki je eden od zadnjih nerešenih problemov klasične fizike, še ni rešen – če bi ta oreh kdo morda strl, bi skoraj zagotovo dobil Nobelovo nagrado. Blizu pojavom stohastičnosti – čeprav je v resnici obravnaval deterministično dogajanje – je bil morda Edward Lorenz s svojim odkritjem determinističnega kaosa v makrosvetu. A njemu je Kraljeva švedska akademija podelila Crafoordovo nagrado, ki jo podeljujejo za matematiko in astronomijo, geoznanosti in biologijo – torej za področja, ki jih Nobelova nagrada ne pokriva. Že desetletja je intenzivno področje raziskovanja

tudi kvantni kaos – za pomemben preboj na tem področju pa utegne biti kdaj podeljena tudi fizikalna Nobelova nagrada.

Viri:

- Benzi, R., Parisi, G., Sutera, A., Vulpiani, A., 1982: *Stochastic resonance in climatic change*. *Tellus*, 34: 1, 10-15. DOI: 10.3402/tellusa.v34i1.10782. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3402/tellusa.v34i1.10782>. Dostop 17. februarja 2022.
- Bruckner, Th., Hooss, G., Füssel, H.-M., Hasselmann, K., 2003: *Climate system modeling in the framework of the tolerable windows approach: the ICLIPS climate model*. *Climatic Change*, 56: 119-137. DOI: 10.1023/A:1021300924356. https://www.researchgate.net/publication/226524566_Climate_System_Modeling_in_the_Framework_of_the_Tolerable_Windows_Approach_The_ICLIPS_Climate_Model. Dostop 17. februarja 2022.
- Frankignoul, C., Hasselmann, K., 1977: *Stochastic climate models. Part II, Application to sea-surface temperature anomalies and thermocline variability*. *Tellus*, 29 (4): 289-305. DOI: 10.3402/tellusa.v29i4.11362, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3402/tellusa.v29i4.11362>. Dostop 17. februarja 2022.
- Friedrich, T., Timmermann, A., Tigchellar, M., Timm, O., Ganopolski, A., 2016: *Nonlinear climate sensitivity and its implications for future greenhouse warming*. *Science Advances*, 2 (11). DOI: 10.1126/sciadv.1501923. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1501923>. Dostop 17. februarja 2022.
- Ghofraniha, N., Viola, I., Di Maria, F., Barbarella, G., Gigli, G., Leuzzi, L., Conti, C., 2015: *Experimental evidence of replica symmetry breaking in random lasers*. *Nature Communications*, 6: 6058. <https://www.nature.com/articles/ncomms7058>. Dostop 17. februarja 2022.
- Haerberli, M., Baggenstos, D., Schmitt, J., Grimmer, M., Michel, A., Kellerbals, Th., Fischer, H., 2021: *Snapshots of mean ocean temperature over the last 700 000 years using noble gases in the EPICA Dome C ice core*. *Climate of the Past*, 17 (2): 843. DOI: 10.5194/cp-17-843-2021. <https://www.researchgate.net/publication/344689911>. Dostop 17. februarja 2022.
- Hasselmann, K., 1976: *Stochastic climate models. Part I, Theory*. *Tellus*, 28: 473-485. DOI: 10.3402/tellusa.v28i6.11316. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v28i6.11316>. Dostop 17. februarja 2022.
- Hasselmann, K., 1993: *Optimal Fingerprints for the Detection of Time-dependent Climate Change*. *Journal of Climate*, 6 (10): 1957-1971. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1957:OFFTDO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1957:OFFTDO>2.0.CO;2). Dostop 17. februarja 2022.
- Hegerl, G. C., Hasselmann, K., Cubasch, U., Mitchell, J. F. B., Roeckner, E., Voss, R., Waszkewitz, J., 1997: *Multi-fingerprint detection and attribution analysis of greenhouse gas, greenhouse gas-plus-aerosol and solar forced climate change*. *Climate Dynamics*, 13 (9): 613-634. <https://link.springer.com/article/10.1007/s003820050186>. Dostop 17. februarja 2022.
- Hegerl, G., Zwiers, F., Tebaldi, C., 2011: *Patterns of change: whose fingerprint is seen in global warming?* *Environmental Research Letters*, 6 (4): 044025. Doi:10.1088/1748-9326/6/4/044025. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/6/4/044025>. Dostop 17. februarja 2022.
- IPCC 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 31 str. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf. Dostop 1. februarja 2021.
- Kopp, G., Lean, J. L., 2011: *A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance*. *Geophysical Research Letters*, 38 (1): L01706. Doi:10.1029/2010GL045777. <https://www.researchgate.net/publication/251438362>. Dostop 17. februarja 2022.
- Ljubotina, M., Žnidarič, M., Prosen, T., 2019: *Kardar-Parisi-Zhang physics in the quantum Heisenberg magnet*. *Physical Review Letters*, 122: 210602. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.122.210602>. Dostop 17. februarja 2022.
- Manabe, S., Strickler, R., 1964: *Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Convective Adjustment*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 21 (4): 361-385, (ametsoc.org). Dostop 17. februarja 2022.
- Manabe, S., Smagorinsky, J., Strickler, R. F., 1965: *Simulated Climatology of General Circulation with a Hydrologic Cycle*. *Monthly Weather Review*, 93 (12): 769-798, (ametsoc.org). Dostop 17. februarja 2022.
- Manabe, S., Wetherald, R., 1967: *Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24 (3): 241-259. https://journals.ametsoc.org/view/journals/at/24/3/1520-0469_1967_024_0241_teotaw_2_0_co_2.xml. Dostop 17. februarja 2022.
- Manabe, S., Wetherald, R. T., 1975: *The Effects of Doubling the CO₂ Concentration on the climate of a General Circulation Model*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32 (1): 3-5. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2). Dostop 17. februarja 2022.
- Max-Planck-Gesellschaft, 2021: <https://www.mpg.de/17673145/klaus-hasselmann-nobel-prize-physics-2021-background>.
- Milanković, M., 1941: *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. *Königlich Serbische Akademie, Belgrad*, 633 str. Dostop 17.

februarja 2022.

Nobelov odbor, 2021: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/>. Dostop 17. februarja 2022.

Parisi, G., 1979a: *Toward a Mean Field Theory for Spin Glasses*. *Physics Letters A*, 73 (3): 203–205.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0375960179907084>. Dostop 17. februarja 2022.

Parisi, G., 1979b: *Infinite number of order parameters for spin-glasses*. *Physical Review Letters*, 43, 1754.

<https://journals.aps.org/prl/issues/43/23>. Dostop 17. februarja 2022.

Phillips, N. A., 1956: *The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment*.

Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 82 (352): 123–164. <https://doi.org/10.1002/qj.49708235202>. Dostop 17. februarja 2022.

Rakovec, J., 2009: *Metode paleoklimatologije*. *Proteus*, 72 (2): 54–64. <http://www.proteus.si/wp-content/uploads/2016/11/proteus-oktober-09-low.pdf>. Dostop 17. februarja 2022.

Smagorinsky, J., Manabe, S., Holloway, J. L.,

1965: *Numerical Results from a Nine-Level General Circulation Model of the Atmosphere*. *Monthly Weather Review*, 93 (12): 727–768. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1965\)093<0727:NRFANL>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1965)093<0727:NRFANL>2.3.CO;2). Dostop 17. februarja 2022.

Stephens, G. L., O'Brien, D., Webster, P. J.,

Pilewski, P., Kato, S., Li, J., 2015: *The albedo of Earth*. *Reviews of Geophysics*, 53 (1): 141–163. doi: [10.1002/2014RG000449](https://doi.org/10.1002/2014RG000449). <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014RG000449>. Dostop 17. februarja 2022.

Talagrand, M., 2006: *The Parisi Formula*. *Annals of Mathematics*, 163: 221–263. <http://annals.math.princeton.edu/wp-content/uploads/annals-v163-n1-p04.pdf>. Dostop 17. februarja 2022.

Dostop 17. februarja 2022.

Dostop 17. februarja 2022.

Dostop 17. februarja 2022.

Dostop 17. februarja 2022.

Hidrogeli kot sistemi za ciljno dostavo zdravilnih učinkovin na tarčno mesto • Medicina in farmacija

Hidrogeli kot sistemi za ciljno dostavo zdravilnih učinkovin na tarčno mesto

Tilen Kopač, Aleš Ručigaj, Matjaž Krajnc

Ciljna dostava zdravilnih učinkovin v želenih koncentracijah na tarčno mesto delovanja v človeškem telesu je eno izmed najpomembnejših raziskovalnih področij v medicini in farmaciji. Danes poznamo mnogo učinkovin za zdravljenje najrazličnejših bolezni, vendar pa je glavni problem dostava učinkovin na zeleno mesto delovanja (Chai in sod., 2017). Različne bolezni najpogosteje zdravimo z zdravili v obliki tablet, kar pomeni, da se tablete začnejo raztapljati že v ustih. Željeno mesto učinkovina zato doseže v bistveno nižji koncentraciji. Da bi se temu izognili, povečujejo začetno koncentracijo zdravilne učinkovine, kar pa ima lahko številne nezaželene stranske učinke, saj učinkovina med transportom (potovanjem) skozi požiralno votlino vpliva na zdrava

tkiva. Ob previsoki začetni koncentraciji zdravilne učinkovine v tableti lahko pride do negativnega delovanja na zdrave dele v človeškem telesu, kar zdravstveno stanje le še poslabša. Natančno odmerjanje je še posebej težavno ali nemogoče pri zelo močnih zdravilih. Vnašanje zdravil v telesne votline (rektalno, vaginalno) je pogosto nepraktično ali neizvedljivo, saj se učinkovine na mestu delovanja lahko razgradijo (na primer zaradi nizkega pH v želodcu) in povzročijo lokalno draženje ali poškodbe, zlasti ko je koncentracija zdravila visoka (Vashist in sod., 2013). Zaradi navedenih negativnih lastnosti klasičnih načinov apliciranja (vnašanja) zdravil je ključnega pomena, da zdravilno učinkovino dostavimo izključno na mesto delovanja. Pri tem zaščitimo učinkovino