

Nobelova nagrada 2021 za raziskave klime in klimatskih sprememb in kompleksnih sistemov nasploh

Jože Rakovec¹

Nobelovo nagrado za fiziko 2021 so podelili "za prelomne prispevke k našemu razumevanju kompleksnih sistemov". Dva meteorologa: Syukuro Manabe in Klaus Hasselmann – skupaj eno polovico nagrade, sta jo prejela "za fizikalno modeliranje klime na Zemlji, kvantificiranje variabilnosti in zanesljivo napovedovanje globalnega segrevanja". Drugo polovico pa prejel teoretični fizik Giorgio Parisi "za odkritje medsebojnega delovanja nereda in fluktuacij v fizičnih sistemih od atomske do planetarne skale" – in pri tej planetarni skali so se področja njihovih raziskav »srečala«. V članku predvsem opisujemo, kaj sta meteorologa odkrila in sta prišla do teh odkritij, o raziskavah teoretičnega fizika pa le na kratko.

Naj na začetku navedemo kar tekst s spletne strani Kraljeve Švedske akademije znanosti o letošnjih Nobelovih nagrajencih iz fizike

(<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/summary/>). Tam piše:

»Trije nagrajenci si letos delijo Nobelovo nagrado za fiziko za svoje študije kaotičnih in očitno naključnih pojavov. Syukuro Manabe in Klaus Hasselmann sta postavila temelje našega znanja o klimi na Zemlji in kako človeštvo vpliva nanj. Giorgio Parisi je nagrajen za svoje revolucionarne prispevke k teoriji neurejenih materialov in naključnih procesov. 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.

Eden od zapletenih sistemov, ki so ključnega pomena za človeštvo, je klima 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 klime in bil prvi, ki je raziskal interakcijo med sevalnim ravnovesjem in vertikalnim transportom zračnih mas. Njegovo delo je postavilo temelje za razvoj sedanjih klimatskih modelov.

Približno deset let pozneje je Klaus Hasselmann ustvaril model, ki povezuje vreme in klimo, s čimer je odgovoril na vprašanje, zakaj so klimatski modeli lahko zanesljivi, čeprav je vreme spremenljivo in kaotično. Razvil je tudi metode za prepoznavanje specifičnih 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 emisij ogljikovega dioksida.

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.«

¹ Upokojeni profesor meteorologije na UL FMF Fizika

Metode preučevanja klime

Za preučevanje klimatskih razmer na Zemlji so dokaj uporabni enodimenzionalni (1-D) konceptualni modeli, saj za Zemljo kot celoto uspejo zelo natančno napovedati npr. temperaturo pri tleh in prevladujočo temperaturo ozračja. Ker pa so le 1-D, seveda ne morejo razlikovati med razmerami v tropih, v zmernih geografskih širinah, v polarnih predelih, med kopnim, oceani, z ledom pokritimi predeli Zemlje, ipd. Za kaj takega je potrebno uporabiti tridimenzionalni (3-D) klimatski model, če je le mogoče, sklopljen z modelom oceanov. To so modeli, podobnimi tistim za napoved vremena, a z njimi računajo dolgo, tako dolgo, da dogajanje v njih že »pozabi« na razmere, od katerih so model pognali. Zato dogajanje ne določajo več začetni pogoji, ampak spreminjajoče se razmere glede sevanja, vegetacije itd. skozi letne čase. Dogajanje v modelih – in s tem simulacijo dogajanje v ozračju in oceanih – opisujejo nelinearne parcialne diferencialne enačbe: za gibalno količino, termodinamska energijska enačba (dodajanje topote, stiskanje/razpenjanje, fazne spremembe vode), pa zakon o ohranitvi mase (kontinuitetna enačba) in edina »lahka« enačba je enačba stanja. Temu je treba dodati še precej procesov, ki jih te enačbe ponavadi ali ne zajamejo eksplicitno, ker bi bile potem še precej bolj zahtevne, ali pa, ker so ti procesi prostorsko ali časovno predrobni, da bi jih zajeme metode reševanja teh enačb, ipd.

Sodoben 3-D klimatski model je načeloma tak, kot model za napoved vremena, toda najpopolnejši vključujejo še mnoga dogajanja, ki jih pri simulaciji vremena skozi dva tedna lahko zanemarimo, pri klimi skozi mesece in leta pa jih ne smemo; npr. podrobno sestavo in kemijo ozračja, podrobnosti izmenjav z vegetacijo, s planktonom, itd. Ponavadi je njihova ločljivost po horizontali okrog 25 km krog in krog Zemlje, po vertikali imajo skozi ozračje do 80 in več plasti, v oceanih pa med 30 in 60 plasti in s tem računskih nivojev, po nekaj nivojev v kopnih tleh... Ker klimatske modele poganjajo skozi mesece, leta, desetletja, torej – kot smo že rekli – pozabijo svoje začetno stanje in se obnašajo predvsem glede na kemijsko sestavo ozračja in sončno obsevanje posameznih predelov Zemlje ter s tem glede na letne čase. Računanje za tako dolgo obdobje seveda pomeni tudi, da zahtevajo ogromno računskega časa, ker pa imajo tudi skoraj tako ločljivost, kot modeli za napoved vremena, pa je tudi zahtevana računska moč zelo, zelo velika (več sto Tflops).

Kako sta raziskovala meteorologa in kaj sta odkrila

Syukuro Manabe je meteorolog japonskega rodu, ki je meteorologijo doštudiral v Tokiu in se po doktoratu 1959 preselil v Združene države, kjer se je vključil v raziskovanje splošnega kroženja ozračja.

Nobelovo nagrado 2021 je dobil predvsem za to, ker je razložil vpliv toplogrednih plinov na klimo na Zemlji. Z predelanim Phillipsovim numeričnim modelom za splošno kroženje ozračja (general circulation model GCM) je s sodelavci raziskal ne samo sevalno energijsko bilanco ozračja in tal, ampak je v energijsko bilanco vključil tudi vodni cikel (1965), razporeditve vlažnosti v ozračju in vpliva količine CO₂ v ozračju (1967), leta 1969 povezal model ozračja z modelom oceanov ter ker je 1975 s 3-D modelom, kako podvojitve količine CO₂ v ozračju na dogajanje in spremenljivke v modelu splošnega kroženja ozračja vpliva na gibalno količino, temperaturo, količino padavin, debelino snežne odeje itd. Tu prikažimo samo, kaj sta z Wetheraldom ugotovila glede razporeditve temperature skozi ozračje.

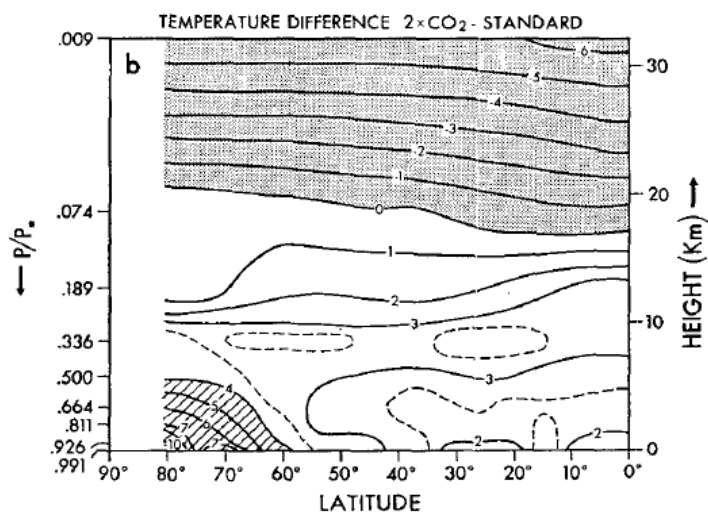


FIG. 4. Latitude-height distribution of the zonal mean temperature (K) for the standard case (a) and of the increase in zonal mean temperature (K) resulting from the doubling of CO₂ concentration (b). Stippling indicates a decrease in temperature.

Slika kaže, kako se spremeni zonalno povprečna temperatura v ozračju, če se v model splošne cirkulacije ozračja vstavi podvojeno količino CO₂. Temperatura naj bi se po tej simulaciji pri tleh zvišala okrog ekvatorja za kaki dve stopinji, v visokih geografskih širinah pa tudi do 10 stopinj. Znatno pa naj bi se ohladila stratosfera. Iz članka S. Manabeja in R. T. Wetheralda v J. Atm. Sci. 32, 1975.

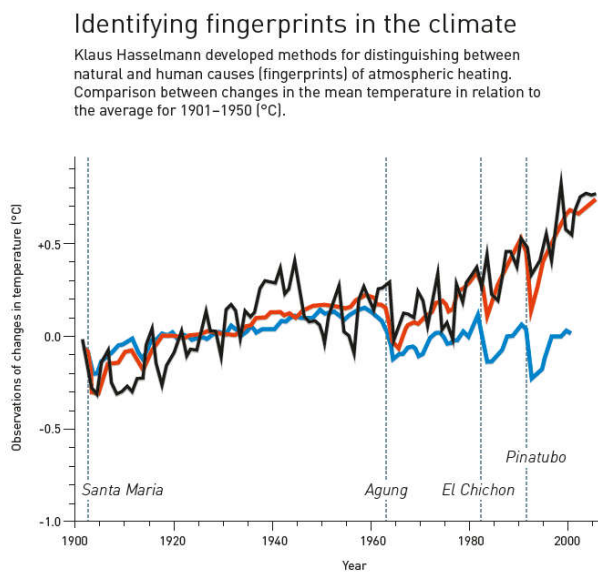
Slika kaže, kako se spremeni zonalno povprečna temperatura v ozračju, če se v model splošne cirkulacije ozračja vstavi podvojeno količino CO₂. Temperatura naj bi se po tej simulaciji pri tleh zvišala okrog ekvatorja za kaki dve stopinji, v visokih geografskih širinah pa tudi do 10 stopinj. Znatno pa naj bi se ohladila stratosfera. Iz članka v J. Atm. Sci. 32, 1975.

Syukuro Manabe je torej raziskoval predvsem tako, da je z modelom za splošno kroženje ozračja numerično raziskoval, kako razni dejavniki v modelu (suho ozračje/vlažno ozračje, konvekcija da/konvekcija ne, več CO₂/manj CO₂,...) vplivajo na procese v ozračju po daljšem času – na simulirano klimo.

Klaus Hasselmann je raziskoval nekoliko drugače – po eni strani na bolj teoretični način, pa tudi s pomočjo sklopljenega modela ozračja in oceanov. Ustanovil je Inštitut Maxa Plancka za meteorologijo (IMP) v Hamburgu in bil od leta 1975 do novembra 1999 tudi njegov direktor. Na tem inštitutu so v 90. letih prejšnjega stoletja razvili sklopljeni model - model Evropskega centra za srednjeročno napoved vremena (ECMWF) so povezali s svojim modelom oceanov.

Hasselmann je teoretično je pomagal odgovoriti na vprašanje, zakaj so klimatski modeli lahko zanesljivi kljub spremenljivemu in kaotičnemu vremenu. Ugotovil je, da spremenljivi drobnejši in hitri vremenski procesi vplivajo na stabilnejšo in »počasnejšo« klimo na podoben način, kot pri Brownovem gibanju drobni, naključno premikajoči se delci skupaj porivajo nek večji delec sem in tja. Ta vpliv vremena na klimo je uspel tudi opisati z enačbami in sicer tako, da je raziskoval hitra in počasna dogajanja in spektre teh dogajanj ter enim in drugim dogajanjem priredil pripadajoče vrednosti v spektru. S tem, ko jim je priredil ustrezne vrednosti, je lahko nadaljeval analizo z metodami statistične mehanike in dobil orodje za študij klime in njenih sprememb. Kasneje je tudi teoretično raziskal, kako razločiti »prstne odtise« antropogeno povzročenih klimatskih sprememb od naravnih, npr. od vpliva izbruhov ognjenikov – kako na optimalen način izluščiti signal sistematičnih klimatskih sprememb iz močne spremenljivosti klime. Za izluščenje od človeka povzročene signala je predlagal uporabo empiričnih ortogonalnih funkciji in optimalnih

linearnih filtrov. To metodo so nekaj let kasneje na dejanskih podatkih uporabili in dobili prikaz takega razločitve vplivov, kot je prikazan na sliki.



Source: Hegerl and Zwiers (2011) Use of models in detection & attribution of climate change

Globalne spremembe temperature od leta 1900 dalje glede na povprečje 1901-1950. Črno – po izmerjenih podatkih,

rdeče – naravni in človeški vplivi, modro – samo naravni vplivi.

Prikazani so tudi časi najmočnejših vulkanskih izbruhov.

Slika je iz obrazložitve Nobelovega odbora za fiziko

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/summary/> in je rezultat

ugotovitev v člankih Klauza Hasselmann iz leta 1993,

G. C. Hegerl, K. Hasselmann, U. Cubasch, J. F. B. Mitchell, E.

Roeckner, R. Voss, J. Waszkewitz iz leta 1997

in iz članka G. Hegerl, F. Zwiers and C. Tebaldi iz leta 2011.

Hasselmann je torej raziskoval precej teoretično, s sodelavci pa seveda teoretično pridobljene metode tudi preskusil na podatkih o klimi skozi različna obdobja.

Za kaj je bil nagrajen teoretični fizik

Polovico fizikalne nagrade 2021 je dobil italijanski teoretični fizik Giorgio Parisi. Šolal se je na La Sapienzi v Rimu, raziskuje pa na področjih kvantne teorije polja, statistične mehanike in kompleksnih sistemov.

Okoli leta 1980 je Giorgio Parisi predstavil svoja odkritja o tem, kako navidezno naključne pojave urejajo skrita pravila. Posebej temeljno pomemben je njegov prispevek k razumevanju obnašanja spinskih stekel na osnovi rešitve problema spontanega zloma simetrije med replikami. Parisijevo delo danes velja za enega najpomembnejših prispevkov k teoriji kompleksnih sistemov.

Sodobne študije kompleksnih sistemov temeljijo na statistični mehaniki, ki so jo v drugi polovici 19. stoletja razvili James C. Maxwell, Ludwig Boltzmann in J. Willard Gibbs, ki so to področje tako poimenovali leta 1884. Statistična mehanika zagotavlja mikroskopsko razlago za makroskopske lastnosti plinov in tekočin, kot sta temperatura in tlak.

Preprost primer iz stohastičnosti in kompleksnosti: delce plina obravnavamo kot kroglice in ko temperatura pade ali se tlak poveča, se kroglice najprej kondenzirajo v tekočino in nato v trdno snov. Ta trdna snov je pogosto kristal, kjer so kroglice organizirane v pravilnem vzorcu. Če pa se ta sprememba zgodi hitro, se lahko kroglice združijo v nepravilen oziroma neurejen vzorec, ki se ne

spremeni, tudi če se tekočina dodatno ohladi ali dodatno stisne skupaj. Pri ponovljenem poskusu bodo kroglice prevzele spet nov, malce drugačen vzorec, kljub temu, da se sprememba (znižanje temperature) zgodi na popolnoma enak način. Te stisnjene kroglice so eden od preprostih modelov za navadno steklo ali za zrnate materiale, kot sta pesek ali gramoz. Vendar je bil predmet Parisijevega prvotnega dela drugačen sistem - spinsko steklo. To je teoretičen model, ki opisuje posebno vrsto kovinske zlitine, v kateri so npr. atomi železa naključno pomešani v mrežo atomov bakra. Čeprav je v mreži le nekaj atomov železa, spremenijo magnetne lastnosti materiala na radikalen in zelo neurejen način. Vsak atom železa se obnaša kot majhen magnet oz. ima magnetni moment, na katerega vplivajo drugi atomi železa v bližini. Pri navadnem magnetu so vsi magnetni momenti ob prisotnosti zunanega polja usmerjeni v isto smer, v spinskem steklu pa so frustrirani: nekateri pari se usmerijo v isto smer, drugi pa v nasprotno smer – kako torej najdejo optimalno orientacijo? Giorgio Parisi je odkril skrito strukturo v tako zapletenih neurejenih sistemih in našel način, kako jih matematično opisati. Tako je našel pomemben ključ za obravnavo kompleksnih sistemov. V sedemdesetih letih prejšnjega stoletja so številni fiziki, vključno z več Nobelovimi nagrajenci, iskali način, kako opisati skrivnostna in frustrirajoča spinska stekla. Leta 1979 pa je Parisi torej naredil odločilen preboj, ko je z genialnim svežim pristopom pokazal, kako je mogoče trik velikega števila – n - replik (n ponovitev primerov dogajanja) uporabiti za reševanje problema spinskih stekel. V replikah je odkril skrito strukturo in našel matematično smiseln način kako to popisati fazni prehod zloma simetrije replik s pomočjo neskončnodimenzionalnega parametra ureditve, nekakšnega tenzorja v abstraktnem vektorskem prostoru, katerega dimenzijo n določa število replik. Ključna ideja metode je korektno izvesti limito, ko gre n proti 0, ki na koncu omogoča konkreten izračun proste energije in drugih termodinamskih količin.

Morda ni presenetljivo, da so v začetku matematiki in bolj strogo misleči matematični fiziki ob tej metodi zmajevali z glavo. Trajalo je kar nekaj let, da se je Parisijeva rešitev izkazala za matematično pravilno in dokazljivo. Tallagrand jo je tako leta 2006 utemeljil v najprestižnejši matematični reviji *Annals of Mathematics* kot »temeljni izrek matematične analize«. Od takrat naprej oziroma že prej pa je bila Parisijeva metoda uporabljena v številnih neurejenih sistemih in je postala temelj teorije kompleksnih sistemov.

Parisijevi prispeki k razumevanju dinamičnih procesov v kompleksnih sistemih in dinamičnih sistemov na splošno ga tematsko tudi približajo delu meteorologov Manapeja in Hasselmanna. Za potrditev te teze samo omenimo Parisijev članek o stohastični resonanci v klimatologiji.

Na koncu še opozorimo, da je podrobnejša razlaga o tem prejeta v objavo v *Obzorniku za matematiko in fiziko* (Rakovec in Prosen, v tisku).

Zahvala

Prof. dr. Tomažu Prosen, UL FMF Fizika, se zahvaljujem za nekatere poudarke glede raziskav in odkritij Giorgia Parisija.

Viri

- Wikipedia Manabe: https://en.wikipedia.org/wiki/Syukuro_Manabe
- S. Manabe, J. Smagorinsky, and R.F. Strickler, 1965: Simulated Climatology of General Circulation with a Hydrologic Cycle, *Monthly Weather Rev.* 93, 769-798.
- S. Manabe and R. Wetherald, 1967: Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity, *J. Atmos. Sci.* 24, 241-259.
- S. Manabe and K. Bryan, "Climate Calculations with a Combined Ocean-Atmosphere Model," *J. Atmos. Sci.* 26, 786-789.
- S. Manabe and R. T. Wetherald, 1975: The Effects of Doubling the CO₂ Concentration on the climate of a General Circulation Model. *J. Atmos. Sci.* 32(1), 3-5.

- N. A. Phillips, 1956: The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 82, 123-164.
- J. Smagorinsky, S. Manabe, and J.L. Holloway, 1965. Numerical Results from a Nine-Level General Circulation Model of the Atmosphere, *Monthly Weather Rev.* 93, 727-768.
- Wikipedia Hasselmann: https://en.wikipedia.org/wiki/Klaus_Hasselmann
- K. Hasselmann, 1976: Stochastic climate models Part I. Theory, *Tellus*, 28, 473-485, DOI: 10.3402/tellusa.v28i6.11316.
- K. Hasselmann, 1993: Optimal Fingerprints for the Detection of Time-dependent Climate Change. *J. of Climate* 6, 1957-1971.
- G. C. Hegerl, K. Hasselmann, U. Cubasch, J. F. B. Mitchell, E. Roeckner, R. Voss, J. Waszkewitz, 1997: Multi-Fingerprint detection and attribution analysis of greenhouse gas, greenhouse gas-plus-aerosol and solar forced climate change. *Climate Dynamics* 13, 613-634.
- G. Hegerl, F. Zwiers and C. Tebaldi, 2011: Patterns of change: whose fingerprint is seen in global warming? *Environ. Res. Lett.* 6, 044025 (6pp).
- Wikipedia Parisi: https://en.wikipedia.org/wiki/Giorgio_Parisi
- G. Parisi, 1979: Toward a Mean Field Theory for Spin Glasses, *Phys. Lett. A* **73**, 203.
- G. Parisi, 1979: Infinite number of order parameters for spin-glasses, *Phys. Rev. Lett.* **43**, 1754.
- R. Benzi, G. Parisi, A. Sutera, A. Vulpiani 1982: Stochastic resonance in climatic change, *Tellus* **34**, 10.
- M. Talagrand, 2006: The Parisi Formula, *Annals of Mathematics*, **163**, 221.