

Tanulmányok

A KLÍMAFIZIKA ÚTJA STOCKHOLMTÓL STOCKHOLMIG – A 2021. ÉVI FIZIKAI NOBEL-DÍJAKRÓL

THE ROAD OF CLIMATE PHYSICS FROM STOCKHOLM TO STOCKHOLM – THE 2021 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

Vincze Miklós

PhD, tudományos főmunkatárs, MTA–ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport, Budapest
mvincze@general.elte.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A 2021. évi fizikai Nobel-díjazottak közül ketten, Syukuro Manabe és Klaus Hasselmann a globális éghajlatváltozás fizikai alapjainak feltárásával kapcsolatos úttörő kutatásaiért részesültek az elismerésben. Manabe a légköri üvegházhatás jelentőségét elsőként megértő svéd Svante Arrhenius 19. század végén alkotott, sugárzási egyensúlyon alapuló modelljét fejlesztette lényegesen tovább úgy, hogy magába foglalja a hőmérséklet hajtotta légköri fel- és leáramlások hatását is. Hasselmann pedig olyan módszereket dolgozott ki, amelyek lehetővé tették a megfigyelt éghajlati adatsorok és a különböző modelleredmények megfelelő statisztikai összehasonlítását. Eredményeik nagyban hozzájárultak a klímaváltozással kapcsolatos jelenlegi tudományos konszenzus kialakulásához.

ABSTRACT

Two of the three 2021 Nobel laureates in physics, Syukuro Manabe and Klaus Hasselmann, were recognized for their pioneering research yielding a better understanding of the ongoing global climate change. Manabe significantly extended the radiative equilibrium-based greenhouse effect model, proposed by the Swedish Svante Arrhenius back in the late 19th century, by incorporating the effects of thermally-driven vertical convection. Hasselmann's work was essential in the development of certain statistical fingerprinting methods which enabled researchers to contrast observational climate records with model predictions. Their results contributed markedly to the emergence of the present scientific consensus on climate change.

Kulcsszavak: éghajlatváltozás, globális felmelegedés, üvegházhatás, környezetfizika, nemlineáris dinamika

Keywords: climate change, global warming, greenhouse effect, environmental physics, non-linear dynamics

A svéd Királyi Tudományos Akadémia döntése a 2021. évi fizikai Nobel-díjakról nem kis meglepetést keltett szakmai körökben. Igaz, az irodalmi díjjal ellentétben – amellyel kapcsolatban évről évre olvashatunk arról, hogy a nagyobb fogadóirodáknál mekkora oddsszal lehet különböző írókra fogadni – a fizika területén előzetes tippelésre eleve nem is igen vállalkozik komolyan senki: egyszerűen túl sok az elismerésre méltó terület, ráadásul nem ritkán évtizedek telnek el az eredmények publikálása és a díj odaítélése között. Előfordulnak persze olyan áttörések, amelyekről rögtön borítékolható, hogy előbb-utóbb a Nobel-bizottság ingerküszöbét is átlépi; gondoljunk a Higgs-bozon vagy a gravitációs hullámok detektálására. A stockholmi telefonhívás nem érthette teljesen váratlanul az idei díj egyik felét elnyerő olasz statisztikus fizikust, *Giorgio Parisit* sem, aki többek között a spinűvek (összetett, rendezetlen rendszerek) dinamikájának elméleti feltárásában publikált úttörő, nagy hatású eredményeket. A másik két kutató azonban bizonyára őszintén megdöbben, amikor megcsörrent a telefonja.

A Nobel-díjjal járó tízmillió svéd korona fennmaradó részét ugyanis – negyed-negyed arányban megosztva – éghajlat-modellezéssel foglalkozó kutatók kapták: a német *Klaus Hasselmann*, illetve a japán származású amerikai *Syukuro Manabe*. A meglepetés fő oka, hogy a kettejük által művelt diszciplína – bár fontossága elvitathatatlan – olyan szakterület, ahol különösen nehezen szűkíthető le a „felelősök köre” két főre. A 20. század második felének klímakutatása ugyanis a folyamatosan finomodó műholdas távérzékelés és az egyre bonyolultabbá váló számítógépes modellek, vagyis rengeteg lelkiismeretes aprómunka története, amelyből nem lehetett könnyű heuréka-pillanatokat vagy paradigmaváltó publikációkat választani. Mégis, a Nobel-bizottság jó érzékkel emelt ki két olyan kutatási irányt, amelyek alapvetően járultak hozzá annak megértéséhez és alátámasztásához, hogy a jelenleg tapasztalható éghajlatváltozásban az emberi eredetű (antropogén) hatás nem elhanyagolható.

NAP–FÖLD KÖLCÖNKHATÁSOK

Bolygónk éghajlati rendszerének elsődleges hajtóereje a napsugárzás. Ám ennek erőssége korántsem változatlan: a naptevékenység 11 éves (a mágneses polaritást is figyelembe véve 22 éves) ciklusai például többé-kevésbé szabályos, néhány ezreléknyi ingadozásként jelentkeznek az S_0 *napállandó* (vagyis a Naptól a Föld átlagos távolságában levő egységnyi merőleges felületre eső sugárzási teljesítmény) értékében. Szintén régóta ismert tény, hogy ezen oszcilláción felül, hosszabb időléptékeken is érzékelhető változásokat mutat központi csillagunk aktivitása. Habár kibocsátott összteljesítményének közvetlen, pontos mérésére csak az űrkorszak teremtett lehetőséget, Galilei 1612-es távcsöves vizsgálatai óta rendelkezünk például a napfoltok gyakoriságára vonatkozó megfigyelési adatokkal, amelyekből

kitűnik, hogy 1645 és 1715 között – az ún. Maunder-minimum idején – szinte egyáltalán nem észlelték ezeket a jellegzetes, bolygónyi méretű sötétebb területeket a Napon, holott ezek gyakorisága is a fentebb említett 11 éves ciklust szokta követni. Bár az ok-okozati viszonyok nem egyértelműek, figyelemre méltó, hogy a Maunder-minimum éppen a 16–19. századi kis jégkorszakba esik (Rácz, 2016), amelyet az észak-atlanti térségben a mostaniaknál és a középkoriaknál lényegesen hidegebb telek jellemeztek. A befagyott Temze jegén például 1608 és 1814 között majdnem minden évben piacot tarthattak a londoniak, s az idősebb Brueghel által megfestett számos téli zsánerkép is olyan időjárási helyzeteket örökít meg, amelyek a mai Hollandiában már egyáltalán nem jellemzőek (1. ábra).



1. ábra. id. Pieter Brueghel: Korcsolyázók madárcsapdával, 1565
(A bécsi Kunsthistorisches Museum gyűjteményéből; Wikipedia, közkincs, URL1)

Az 1957–1958-as Nemzetközi Geofizikai Év kiemelt feladatai közé tartozott a Nap–Föld-rendszer fizikai kapcsolatainak vizsgálata. Az első műholdak startját is eredményező kampány sikerén felbuzdulva aztán 1964–1965-re meghirdették a Nyugodt Nap Nemzetközi Évét is, lehetőséget teremtve arra, hogy fél napciklussal később megismételjék a hét évvel korábban, a naptevékenységi maximum környékén végzett méréseket. Az eredmények alátámasztani látszottak azt az általános vélekedést, hogy a Föld hőmérséklete jól követi a naptevékenység válto-

kozását: a hatvanas évek közepének globális átlagértéke valóban alacsonyabbnak adódott az ötvenes évek végénél, ráadásul az egész évtized jóval hidegebb volt, mint az addig rekordmeleg negyvenes évek, olyannyira, hogy számos kutató az adatok alapján már a következő jégkorszak közeledtét vizionálta.

Ekkor, tudásunk ilyen állása mellett lépett színre Syukuro Manabe, aki az elsők között alkotott olyan számítógépes minimálmodellt, amely a légkör energiamérlegének vizsgálatához a sugárzási hatásokon kívül tekintetbe vette a konvekció hatását is, vagyis a melegített felszínről induló függőleges irányú áramlásokat, amelyek a vízgőz felszállítása révén a felhőképződést is előidézik.

Manabe és *Richard Wetherald* (ő tíz éve elhunyt, így nem részesülhetett a Nobel-díjban) 1967-es és 1975-ös úttörő munkáinak értékeléséhez azonban viszsza kell mennünk a svéd akadémia egyik korábbi, 1903-as kitüntettjéhez, *Svante Arrhenius* gondolat kísérleteihez. Ismertebb, fizikai kémiai munkássága mellett ő volt ugyanis az első, aki a légköri összetevők frissen megmért spektrális (sugárzáselnyelési) tulajdonságainak felhasználásával lényegében helyes matematikai modellt alkotott az üvegházgázak éghajlat-szabályozó szerepéről (Arrhenius, 1896). Arrhenius első közelítésként egy légkörmentes (erre a továbbiakban az I_m alsó index utal) bolygóból indult ki. Atmoszféra hiányában a bolygó T_{lm} felszíni átlaghőmérsékletét a Naptól ráeső besugárzási teljesítmény – vagyis az S_0 napállandó – és a felszín a albedója határozza meg; utóbbi egy 0 és 1 közötti érték, amely azt számszerűsíti, hogy az égitest a ráeső sugárzás mekkora részét veri vissza (egy abszolút fekete bolygóhoz $a = 0$, egy tökéletesen tükröződőhöz $a = 1$ tartozna). Sugárzási egyensúly esetén az alábbi egyenlet érvényes:

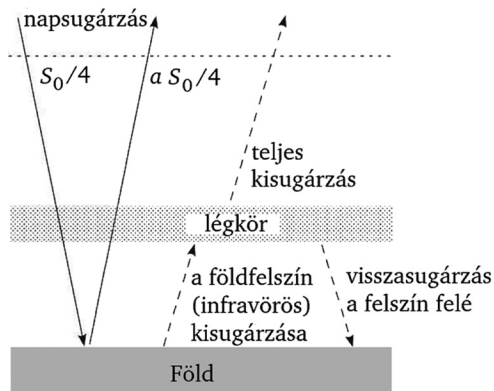
$$\sigma T_{lm}^4 = S_0(1 - a)/4,$$

ahol σ a Stefan–Boltzmann-féle sugárzási állandó. Ennek, illetve a realisztikus $S_0 \approx 1370 \text{ W/m}^2$ és $a \approx 0,3$ értékek felhasználásával az egyenletből $T_{lm} \approx 256 \text{ K} \approx -16^\circ \text{C}$ adódik, azaz fagyponthoz alatti átlaghőmérséklet. A Földön azonban nagy szerencsénkre ennél lényegesen melegebb van.

Arrhenius úgy módosította hát a modellt, hogy tekintetbe vette a bolygó körüli gázburkot is, amelynek bizonyos összetevői elnyelik, majd hőmérsékleti sugárzásként fölfelé és lefelé is kisugározzák az energia egy részét (2. ábra), amelyet az ε emisszivitással (szintén 0 és 1 közötti arányszám) paraméterezett. Ő már tudta ugyanis, hogy bár a Nap sugárzása számára a légkör szinte teljesen átlátszó, egyes gázok a felmelegített földfelszín által kisugárzott infravörös sugárzás ε -nyi részét képesek elnyelni majd kibocsátani (a realisztikus effektív érték $\varepsilon \approx 0,75$).

Egy ilyen üvegházszerű modellben a légkör lefelé irányuló visszasugárzása miatt a felszínen jóval magasabb átlaghőmérsékletet, ez esetben $T_{\text{felszín}} = T_{lm}(1 - \varepsilon/2)^{-1/4} \approx 288 \text{ K} \approx 15^\circ \text{C}$ -ot kapunk, jó egyezésben a valósággal. Természetesen az ilyen nagyságrendi becsléseknél pontosabb eredményekre is juthatunk,

ha figyelembe vesszük, hogy a különböző üvegházgázok (vízgőz, szén-dioxid, metán, ózon) koncentrációja és az elnyelőképeséget befolyásoló hőmérséklet is nagyban függ a magasságtól.



2. ábra. A Nap–Föld–légkör rendszer sugárzási egyensúlyának vázlata Arrhenius modellje szerint.
(a szerző által készített ábra, Cushman-Roisin–Beckers, 2011 alapján)

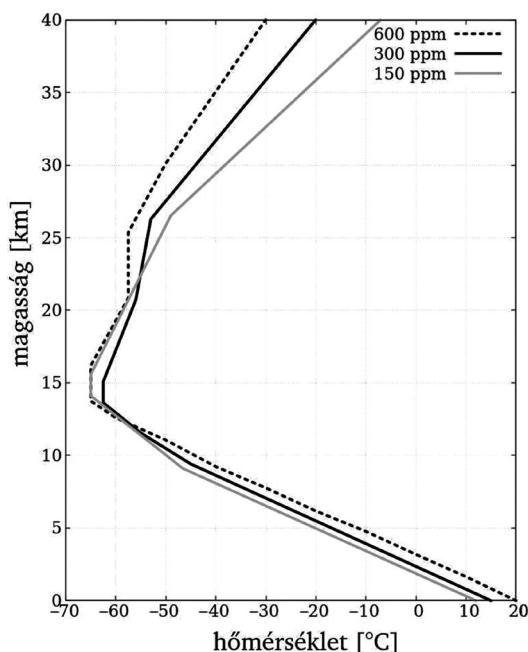
Már Arrhenius is pontosan tudta, hogy a légkörben a legjelentősebb üvegházgáz a *vízgőz*, amelynek koncentrációja helyenként akár az 1%-ot is megközelítheti (amikor is minden századik részecske egy vízmolekula lenne). Azt is helyesen megsejtette viszont, hogy a vízkörzés éghajlati hatásainak feltárása rendkívül nehéz probléma az egymással versengő, ellenkező előjelű visszacsatolások jelenléte miatt. A felszín melegedése egyfelől az óceánok még intenzívebb párolgását vonja maga után, ami növeli a légkör vízgőz-koncentrációját, tovább fokozva a megszaladó üvegházhatást. A mindezzel együtt járó felhőképződés azonban fehéríti is a bolygót, növelve az a albedó értékét, ezzel viszont csökkenne az egyensúlyi hőmérséklet. A két hatás akár ki is egyenlítheti egymást: ennek teljes megértése még ma is várat magára, hiszen a felhőképződés fizikájában rengeteg a nyitott kérdés. A vízgőzhelyzet komplexitását helyesen felmérve tehát már Arrhenius figyelme is a második legfontosabb üvegházgáz, a szén-dioxid felé fordult, amelynek koncentrációja jelenleg mintegy 400 ppm (parts per million, vagyis a légkör egymillió részecskéjére ennyi CO_2 -molekula jut), 1903-ban pedig 300 ppm alatt volt.

A stockholmi tudós mérési adatok hiányában még nem mérhette föl helyesen a légkör függőleges szerkezetét, sem a konvekcióval járó függőleges hőtranszportot, így arra a következtetésre jutott, hogy a szén-dioxid-koncentráció megkettőződése $T_{\text{felszín}}$ értékének mintegy 6 °C-os növekedését eredményezné. Ma ezt a mérőszámot, vagyis a felszíni hőmérsékletnek a szén-dioxid-koncentráció

duplázódására adott válaszát éghajlati érzékenység (climate sensitivity) néven elterjedten használják a klímakutatásban, és jelenlegi becslései 2,5 °C és 4 °C között szórnak.

Manabe és Wetherald (1967) először alkotott olyan modellt, amely az Arrhenius-féle sugárzási egyensúlyon alapuló számításokon túl a hőmérséklet-különbség hajtotta áramlásokat is valamelyest tekintetbe vette – igaz, csupán egy egydimenziós levegőoszlopban, vagyis oldalirányú térbeli szerkezet nélkül –, továbbá modelljük továbbfejlesztett változatában (Manabe–Wetherald, 1975) a különböző légrétegek páratartalmát már változóként, nem pedig előírt paraméterként kezelték. Megállapították, hogy amikor kizárólag a sugárzási tagokat vették figyelembe, az egyensúlyi megoldás egy olyan légköri rétegződéshez vezetett, amelyben a hőmérséklet fölfelé haladva átlagosan 15 °C-kal csökken kilométerenként, ám, ha a felszállított és a párakicsapódás által leadott látens hőt is tartalmazó teljes változatot futtatták, már megkapták a valósághű, 6 °C/km-es csökkenést. (A fentebb említett éghajlati érzékenységre pedig mintegy 2,4 °C-os értéket becsültek.)

Ennél is nagyobb jelentőségű azonban ezeknek a modelleknek a sztratoszféra hűlésére vonatkozó jóslata. A kutatók azt találták, hogy a szén-dioxid-szint



3. ábra. A légkör hőmérsékletének magasságprofilja a szén-dioxid-koncentráció három különböző értéke esetén. Jól látható az „átkereszteződés”: növekvő koncentráció esetén a troposzféra melegszik, ám a sztratoszféra felsőbb része hűl (a szerző által szerkesztett ábra, az adatok forrása: Manabe–Wetherald, 1967)

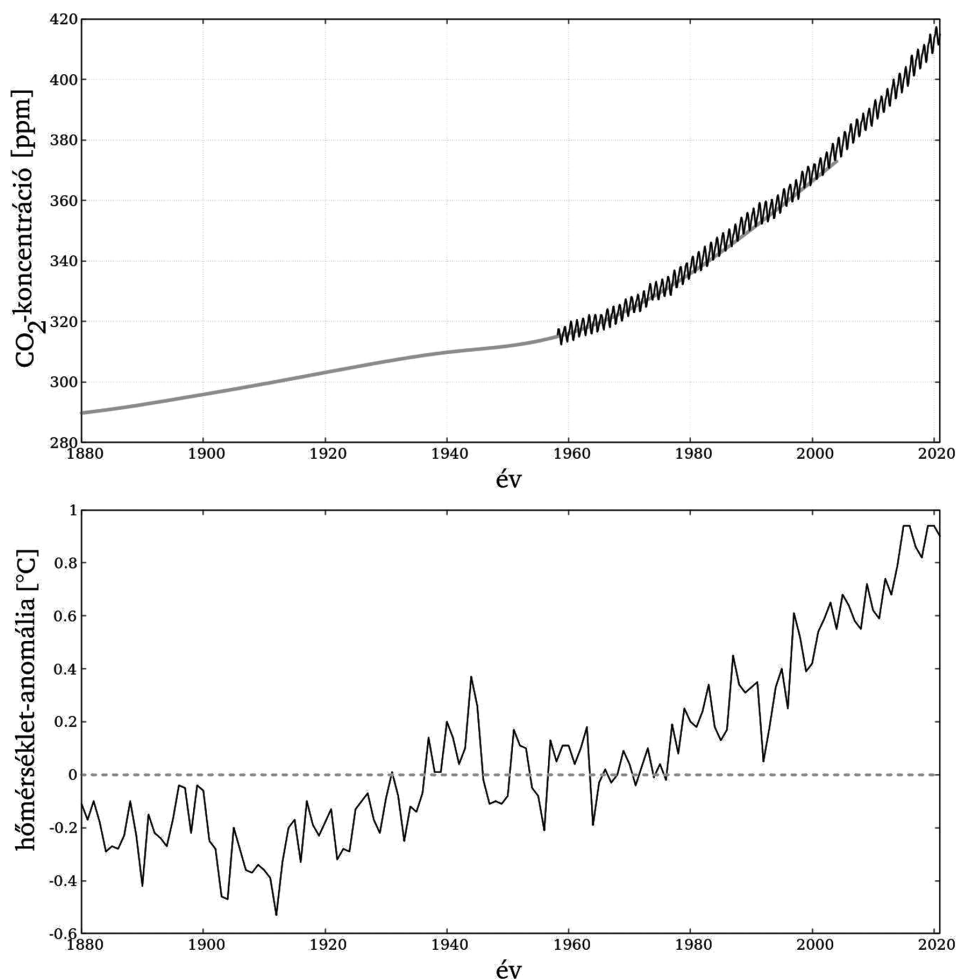
növekedése a légkör legalsó 12 km-es tartományában melegedéshez, ám az a fölötti régióban a koncentráció növelésével egyre markánsabbá váló lehűléshez vezet (3. ábra). Mindez éles kontrasztban állt azokkal az eredményekkel, amelyeket a kizárólag sugárzási egyensúlyon alapuló korábbi elméleti modellek, vagy akár Manabéék saját szén-dioxid nélküli kontrollfuttatásai adtak. Ezek esetében ugyanis ilyen jellegű átkereszteződés sohasem mutatkozott. Amennyiben a korabeli paradigmával összhangban a földfelszín hőmérsékletének változásaiért (színte) kizárólag a naptevékenység volna felelős, a besugárzás növekedtével a légkör *minden rétegében* növekednie kellene a hőmérsékletnek is; szén-dioxid hiányában az energiamodellben megfigyelt, lefelé „pumpálása” nem volna lehetséges.

1967-ben mindez szembement az elfogadott, „heliocentrikus” klímaértelmezéssel, ám az azóta bekövetkezett markáns koncentrációnövekedés lehetőséget adott ezen eredmények mérésekkel történő igazolására. Ahogy a Nobel-díj odaítélése is jelzi: az előrejelzés helyesnek bizonyult, s ma már tapasztalati ténynek tekinthető, hogy *a felszín globális felmelegedésével egyidejűleg a sztratoszféra hűl*. Ennek megállapítása azért is különösen fontos, mert időről időre jogos kételemek merülnek fel azzal kapcsolatban, hogy mennyire megbízhatóak a műholdas (és még inkább az azelőtti) adatok a Napból érkező felületegységre jutó sugárzási teljesítmény S_0 értékéről, illetve annak időbeli változásairól (Kopp–Lean, 2011). Minden mérési bizonytalanság ellenére azonban a Manabe és Wetherald által megjósolt sztratoszférahűlés arra hívja fel a figyelmünket, hogy helytelenül járnánk el, ha a jelenleg megfigyelt éghajlatváltozásért teljes egészében a Napot tennénk felelőssé.

A VÁLTOZÉKONYSÁG UJJLENYOMATAI

A klímakutatás egyik központi kérdése, hogy milyen bizonyossággal jelenthetjük ki, hogy az elmúlt fél évszázad trendszerű változásaiért az emberiség által kibocsátott, megközelítőleg exponenciális ütemben növekvő mennyiségű légköri szén-dioxid (is) felelős (4. ábra). Az alternatív hipotézis az lehetne, hogy a megfigyelt jelenségek egy nagy, de természetes fluktuáció következményei. Jól tudjuk ugyanis az elmúlt évmilliókra vonatkozó paleoklimatológiai rekonstrukciókból, hogy az éghajlati változók minden időskálán folyamatosan, sokszor rendszertelenül változnak: miért ne lehetne így mostanában is?

Első ránézésre nem tűnik úgy, hogy ez a kérdés eldönthető lenne, ha arra gondolunk, hogy már a 3-4 napnál hosszabb távú időjárás-előrejelzések is rendszerint teljesen megbízhatatlanok. Ennek oka a légköri folyamatok turbulenciájában keresendő. Ez szorosan összefügg a sokat emlegetett „pillangóeffektussal”, vagyis a rendszer rendkívüli érzékenységevel a külső gerjesztések változásaira és a saját pillanatnyi állapotára. Ha viszont a jövő heti időjárást nem vagyunk képesek



4. ábra. Felül: az 1880–2021 közötti időszak globális szén-dioxid-rekonstrukciója jégfuratok (szürke görbe), illetve 1960-tól kezdve a Mauna Loa Obszervatórium (Hawaii, USA) adatai alapján (adatok forrása: URL2, illetve Frank et al., 2010)

Alul: a globális földfelszíni átlaghőmérséklet alakulása ugyanezen időszakra nézve az 1910–2000 közötti időszakra vett átlaghoz (zérus szint, szaggatott szürke vonal) képest (adatok forrása: URL3)

megjósolni, miért kellene hinnünk a több évtizedes távlatú éghajlati projekcióknak? S ha jóslni sem tudunk, hogyan remélhetnénk, hogy szét tudjuk szálazni a bonyolult ok-okozati kapcsolatokat?

Edward N. Lorenz az 1960-as években felfedezte, hogy a konvekció, illetve a mérsékelt égövi légkörzés számítógépes „játékmodelljei” (Lorenz, 1963, 1984), amelyek mindössze három közönséges differenciálegyenlettel közelítették a va-

lós fizikai problémákat, teljesen determinisztikus jellegük ellenére látszólag előre jelezhetetlen, *kaotikus* viselkedést mutathatnak. Lorenz vizsgálatai egy új tudományterület, a nemlineáris dinamika előhírnökei voltak, s egyszerű modelljei az ilyen rendszerek egy nagyon fontos, általános tulajdonságára világítottak rá. Ez pedig a következő: habár a pillanatnyi állapot hosszú távon előre jelezhetetlen lehet, ám az *eloszlás*, vagyis annak a mértéke, hogy elegendően hosszú idő után milyen gyakorisággal találjuk rendszerünket egy adott állapotban (például a hőmérséklet milyen valószínűséggel vesz fel egy adott értéket) az egyenletek ismeretében tökéletesen megadható, még a mérési bizonytalanságok ellenére is. Ez egy nagyon erős és fontos állítás, ráadásul párhuzamba állítható a 20. századi fizika másik nagy világnézet-formáló forradalmának, a kvantummechanikának szemléletmódjával. Ott a Schrödinger-egyenlet megoldásával egyértelműen megkaphatjuk a részecskék megtalálhatósági valószínűségének tér- és időbeli eloszlását, de nem lehetséges pontos előrejelzést adni arra vonatkozóan, hogy egy adott mérés során hol bukkan fel az elektron. Mindez némi megnyugvásra ad okot: még ha nem is vagyunk képesek az időjárást megjósolni, de az egyes helyzetek bekövetkezésének valószínűségi eloszlását, vagyis a klímát attól még elvileg képesek lehetünk megismerni. Közkeletű példával élve: nem tudunk sokat mondani arról, hogy egy kockával dobva milyen értéket kapunk legközelebb, de arról igenis lehet fogalmunk, hogy a kocka különböző oldalai mennyire vannak cinkelve.

A dobálás hasonlatoknál maradva képzeljük el, hogy az egymást követő évek globális átlaghőmérséklet-változásának irányát (csökkenés vagy növekedés) egy pénzérme feldobásával választjuk ki. Ha fejet dobunk, akkor növeljük, írás esetén viszont csökkentjük az előző időponthoz képest valamilyen véletlenszerű értékkel: ezzel a játékszabállyal egyfajta véletlen bolyongást definiáltunk a számenyenesen (vagy a hőmérőn). Érezhető, hogy ha az így előállított adatsor sok-sok dobás után egyértelműen növekvő trendet mutat, akkor nagyon valószínű (bár sosem lehet teljesen biztos), hogy a pénzérménk egyik oldala cinkelt: valamivel gyakrabban lesz „fej” a kimenet. Vegyük észre, hogy a kapott számsor megkülönböztethetetlen egy olyantól, amelyben egy eleve előírt, determinisztikus, növekvő sorozathoz szimmetrikus eloszlású (vagyis cinkeletlen) véletlen lépéseket adogatunk hozzá, más szóval, szétválasztható a viselkedés jósolható és véletlenszerű része. Hasonló jellegű elkülöníthetőség nemcsak a driftet (sodródást) leíró előző példa esetén mutatkozik meg, hanem például a relaxációt tartalmazó alábbi Langevin-egyenletben is:

$$dx/dt = -\lambda x + \kappa \eta(t),$$

ahol t az idő, dx/dt a sorozat x értékének időegység alatti megváltozása, $\lambda > 0$ a rendszer stabilitási paramétere, $\eta(t)$ pedig egy korrelálatlan fehér zaj, vagyis véletlenszerű járulékok, amelyek nagyságát a konstans κ amplitúdó adja meg.

E (sztochasztikus) differenciálegyenlet segítségével előállított $T(t) = T_0 + x(t)$ hőmérséklet-idősor – ahol T_0 például lehet egy sugárzási-konvekciós légkörmodell egyensúlyi megoldása – egyrészt tehát tartalmazza a véletlenszerűnek tűnő fluktuációkat (amit megfeleltethetünk az időjárási változékonyságnak), másrészt a rendszer ezekre adott válaszát is. A pillanatszerű gerjesztő „lökéssel” kitérített hőmérséklet a belső tehetetlenségből fakadóan $1/\lambda$ jellemző válaszidővel térne vissza az egyensúlyi $T = T_0$ érték közelébe.

A valós adatok elemzése megmutatta, hogy a globális átlaghőmérséklet-idősorok meglepő módon egészen olyan jellegűek, mintha ezzel az egyszerű modellel állították volna elő azokat, mégpedig jellemzően több hónapos $1/\lambda$ karakterisztikus idő megválasztásával. Ez a „lomhaság” egyértelműen a hatalmas hőtartályokként funkcionáló óceánok jelenlétével magyarázható, amelyekben csupán a legfelső 2 méteres vízréteg önmagában annyi hőt képes tárolni, mint a teljes atmoszféra, s ennek megfelelően lassan és elkent módon reagálnak a gyors légköri változásokra.

Klaus Hasselmann – az idei fizikai Nobel-díj másik éghajlatkutató kitüntettje – munkamódszerének egyik kulcseleme éppen ezen időskála-szétválás felismerése volt a hetvenes években. Az, hogy a mérési adatsorok valóban ilyenek, azt is jelentette, hogy az időjárást az éghajlati érzékenység vizsgálatakor elegendő véletlen zajként figyelembe venni. Ebből a központi gondolatból kiindulva vált lehetővé, hogy az éghajlati változók valós hosszú távú időfejlődését összevethessék a különböző modellek jóslataival (Hasselmann, 1997).

Hasselmann és munkatársai olyan jellegű kérdésekre tudnak módszerükkel választ adni, mint az, hogy a különböző beállított paraméterekkel futtatott számítógépes klímaszimulációk melyike hasonlít leginkább a megfigyelési adatokra. Természetesen itt sokkal többről van szó, mint hőmérséklet-idősorok összehasonlításáról: sok változó térbeli és időbeli mintázatai összevetésére van szükség és az egyezés mértékének és hibájának számszerűsítésére. Ezek tehát végső soron hatalmas illesztési feladatok, amelyekben a különböző modelljóslatok és a mért adatsorok spektrális tulajdonságait, „ujjlenyomatait” vizsgálják (Barnett et al., 2005). Ám az egyezések jóságának (szignifikanciaszintjének) helyes megadása lehetetlen lett volna az időjárás zajszerű hatásának helyes figyelembevétele nélkül. Ez a Hasselmann-féle eljárás tette lehetővé annak megvizsgálását is, hogy milyen magas konfidenciával zárható ki az a hipotézis, hogy a jelenleg tapasztalt klímaváltozás független az emberi eredetű szén-dioxid-kibocsátástól. Ehhez olyan modellfuttatások eredményeit hasonlították össze a valósággal, amelyekben figyelembe vették, illetve amelyekből kihagyták az antropogén CO_2 -járulékot (Hegerl–Zwiers, 2011). Ezek a vizsgálatok arra mutattak (egyezésben Manabe és Wetherald eredményeivel), hogy a sztratoszféra hűlése és a felszínközeli légkör ezzel egyidejű melegekedése például olyan ujjlenyomat, amely egyértelműen a megnövekedett szén-dioxid-koncentrációval magyarázható, hiszen az ember nélküli modellfuttatásokban ilyen mintázat nem jelent meg.

KITEKINTÉS

Az előzőekben röviden ismertetett Nobel-díjas eredmények valóban jelentős mérföldkövei voltak éghajlati rendszerünk kutatásának, de még napjainkban is megglehetősen távol vagyunk e komplex folyamatok teljes és mély megértésétől, különösen a lokális előrejelezhetőség kérdését illetően. A jelenlegi legnagyobb felbontású számítógépes globális klímamodellek (Global Climate Model, GCM) nagyjából konzisztensen jósolják a felszíni átlaghőmérsékletnek a szén-dioxid-szint növekedésére adott válaszát, de jelentős eltéréseket mutatnak például a meteorológiai változók helyi, például közép-európai eloszlásának előrejelzésében. Ezzel összefüggő, széles körben kutatott és vitatott kérdéskör az is, hogy a sarkvidékek és az Egyenlítő közötti hőmérséklet-különbség klímaváltozással együtt járó csökkenése miképpen befolyásolja a mérsékelt égövi időjárás jellegét, különös tekintettel az extrém időjárási helyzetek (hőhullámok, hidegbetörések) előfordulásának gyakoriságára.

További nehézség, hogy a Lorenz-féle minimálmodellekkel felállított tetszetős analógia – vagyis az a fontos megállapítás, hogy a rendszert előrejelezhetetlensége mellett is jól jellemezheti egy megismerhető gyakoriságeloszlás – nem teljesen állja meg a helyét egy változó klímában, hiszen ekkor maga az áhított eloszlás is időben fejlődik. Ebből következik, hogy mire elegendő mennyiségű (több évtizednyi) mérési adat gyűlik össze ahhoz, hogy egy időjárási változó eloszlását feltérképezzük, maga az eloszlás is megváltozhat, megnehezítve az éghajlati dobókocka cinkeltségének empirikus megállapítását (hiszen az egymást követő dobások során ekkor úgy tűnik, hogy a cinkeltség maga is változik). Más szóval, a Hasselmann-féle vizsgálatokban is kulcsfontosságú időskála-szétválás egy gyors éghajlatváltozás esetén nem olyan éles, mint ahogy ideális lenne. Erről a problémakörrel, illetve lehetséges áthidalásáról a *Magyar Tudomány* 2017/2 számában olvasható egy kitűnő tanulmány (Bódai et al., 2017).

S végül egy zárógondolat: a klimatológiai kutatás sem több, mint egy folyamatosan önmagát korrigáló kollektív iterációs folyamat, amely természetéből fakadóan lassabban konvergál az igazsághoz, mint ahogy azt a társadalom és a döntéshozók sokszor elvárnák. Ahogyan a koronavírus-járvány során is sokszor tapasztalhattuk, a tudomány krízishelyzetekben sem képes megrendelésre abszolút igazsággal szolgálni, „csak” egy munkamódszerrel, amely lerövidítheti az odavezető utat. Mégis, ez a legtöbb, amit tehetünk.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom Drótos Gábornak, Herein Mátyásnak és Tél Tamásnak a cikk elkészítéséhez nagy segítséget jelentő hasznos tanácsaikért és megjegyzéseikért.

IRODALOM

- Arrhenius, S. (1896): XXXI. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41, 251, 237–276. https://www.rsc.org/images/Arrhenius1896_tcm18-173546.pdf
- Barnett, T. – Zwiers, F. – Hengerl, G. et al. (2005): Detecting and Attributing External Influences on the Climate System: A Review of Recent Advances. *Journal of Climate*, 18, 9, 1291–1314. DOI: 10.1175/JCLI3329.1, <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/18/9/jcli3329.1.xml>
- Bódi T. – Drótos G. – Haszpra T. et al. (2017): A párhuzamos földi klímák elmélete. *Magyar Tudomány*, 178, 2, 188–201. <http://www.matud.iif.hu/2017/02/Tartalom.htm>
- Cushman-Roisin, B. – Beckers, J. M. (2011): *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics: Physical and Numerical Aspects*. Academic Press, <http://www.ccpo.odu.edu/~klinck/Reprints/PDF/roisinGFD2010.pdf>
- Frank, D. C. – Esper, J. – Raible, C. C. et al. (2010): Ensemble Reconstruction Constraints on the Global Carbon Cycle Sensitivity to Climate. *Nature*, 463, 7280, 527–530. <https://bit.ly/3rDYpE6>
- Hasselmann, K. (1997): Multi-pattern Fingerprint Method for Detection and Attribution of Climate Change. *Climate Dynamics*, 13, 601–611. DOI: 10.1007/s003820050185
- Hegerl, G. – Zwiers, F. (2011): Use of Models in Detection and Attribution of Climate Change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2, 4, 570–591. DOI: 10.1002/wcc.121, https://www.researchgate.net/publication/227675037_Use_of_models_in_detection_and_attribution_of_climate_change
- Kopp, G. – Lean, J. L. (2011): A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. *Geophysical Research Letters*, 38, 1. DOI: 10.1029/2010GL045777, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010GL045777>
- Lorenz, E. N. (1963): Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of Atmospheric Sciences*, 20, 2, 130–141. DOI: 10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2, <https://bit.ly/362CL48>
- Lorenz, E. N. (1984): Irregularity: A Fundamental Property of the Atmosphere. *Tellus A*, 36 A, 2, 98–110. DOI: 10.1111/j.1600-0870.1984.tb00230.x, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1600-0870.1984.tb00230.x>
- Manabe, S. – Wetherald, R. T. (1967): Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity. *Journal of Atmospheric Sciences*, 24, 241–259. DOI: 10.1175/1520-0469(1967)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2, https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/24/3/1520-0469_1967_024_0241_teotaw_2_0_co_2.xml
- Manabe, S. – Wetherald, R. T. (1975): The Effects of Doubling the CO₂ Concentration on the Climate of a General Circulation Model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 32, 3–15. DOI: 10.1175/1520-0469(1975)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2, https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/32/1/1520-0469_1975_032_0003_teodtc_2_0_co_2.xml?tab_body=pdf
- Rácz L. (2016): Mi a kis jégkorszak? *Történeti Földrajzi Közlemények*, 4, 15–46. http://zeus.nyf.hu/~foldrajz/torteneti_foldrajzi_kozlemenyek5.pdf

URL1: https://en.wikipedia.org/wiki/Winter_Landscape_with_Ice_skaters_and_Bird_trap#/media/File:Pieter_Bruegel_d._%C3%84_093.jpg

URL2: <https://gml.noaa.gov/>

URL3: <https://www.ncdc.noaa.gov/>