

Nobelova cena za fyziku pro modelování změny klimatu

Tomáš Halenka

Dne 5. října 2021 byla vyhlášena Nobelova cena za fyziku pro rok 2021, která byla udělena dle ústředního zdůvodnění „ ... za průkopnický příspěvek k našemu pochopení komplexních systémů“. Ocenění získali pánové Syukuro Manabe, Klaus Hasselmann a Giorgio Parisi: první dva (Manabe, Hasselmann) získali dohromady jednu polovinu příslušné Nobelovy ceny, a to za jejich zásadní podíl na vývoji modelování změny klimatu, druhá polovina pak ocenila studium chaosu ve fyzikálních systémech (Parisi). Dle plného znění odůvodnění Švédská královská akademie věd, resp. Nobelův výbor, v prvním případě oceňuje přínos „ ... k fyzikálnímu modelování klimatu Země, kvantifikaci jeho variability a spolehlivou předpověď globálního oteplování“, u druhé poloviny „ ... objev interakcí mezi chaosem a fluktuacemi ve fyzikálních systémech od atomárního po planetární měřítko“. S ohledem na vlastní erudici se zde budu věnovat té první polovině udělení Nobelovy ceny za fyziku; pokud jde o druhou polovinu, kterou byl oceněn italský teoretický fyzik Giorgi Parisi z Univerzity La Sapienza v Římě, mohu pouze s ohledem na svoje kontakty do International Centre for Theoretical Physics v italském Terstu, kde se rovněž věnují modelování klimatu, doporučit jeho přednášku (<https://www.youtube.com/watch?v=UAxY447jIV0>), kterou tam (resp. pro SISSA) přednesl dne 22. října 2021 na velmi obecné téma „The Value of Science“, jejíž některé pasáže mají širokou platnost nejen v teoretické fyzice, ale rovněž i právě v komunikaci výzkumu klimatické změny. Vraťme se ale k první polovině tohoto ocenění, zde se pokusím vysvětlit základní principy modelování klimatické změny, uplatnění jeho výsledků a přínos obou laureátů k tomuto oboru.

Že bude Nobelova cena za fyziku udělena v rámci klimatické vědy, to asi nikdo neočekával a je to velké překvapení. Fakticky je to, pokud jsem si vědom, vůbec poprvé, ale jasně to dokládá důležitost a fyzikální podstatu klimatické vědy. Ani v obecnější rovině nebyly atmosférické vědy příliš úspěšné, byla udělena v jednom případě Nobelova cena za chemii (1995 – Crutzen, Molina, Rowland), která ocenila přínos k atmosférické chemii v souvislosti s objasněním mechanismu vzniku ozonové díry, v druhém případě šlo o udělení tenkrát dost diskutované Nobelovy ceny míru za budování znalostní báze o antropogenní klimatické změně a její šíření s důrazem na přípravu a prosazování opatření k jejímu zmírnění (2007 – Gore a Intergovernmental Panel on Climate Change), což bylo u příležitosti vydání 4. hodnotící zprávy IPCC AR4. Nynější Nobelova cena za fyziku svým zdůvodněním jasně potvrzuje oprávněnost tehdejšího rozhodnutí.

Klimatologie jako fyzikální věda

V rámci obecného uznání, obě poloviny udělené Nobelovy ceny za fyziku oceňují přínos ke zkoumání komplexních systémů, a to jak v teoretické fyzice (G. Parisi), tak i v klimatické vědě (S. Manabe, K. Hasselmann). Podrobnější hodnocení přinesla tisková zpráva, podle které „... jedním z komplexních systémů životní důležitosti pro lidstvo je klima Země“. Ano, v dnešní klimatologii nepochybujeme o tom, že klimatický systém se svojí nelineární podstatou a zpětnými vazbami je komplexní systém (což diskutuje právě Klaus Hasselmann v [1]), v kterém kromě základních fyzikálních zákonů, docela dobře aplikovatelných na atmosféru, oceán a kryosféru, působí i řada dalších faktorů s původem v ostatních složkách klimatického systému, jakými jsou např. biosféra, atmosférická chemie a další. Popis takového systému je skutečně velmi obtížný, a to i proto, že pro popis skutečných interakcí a chování celého systému

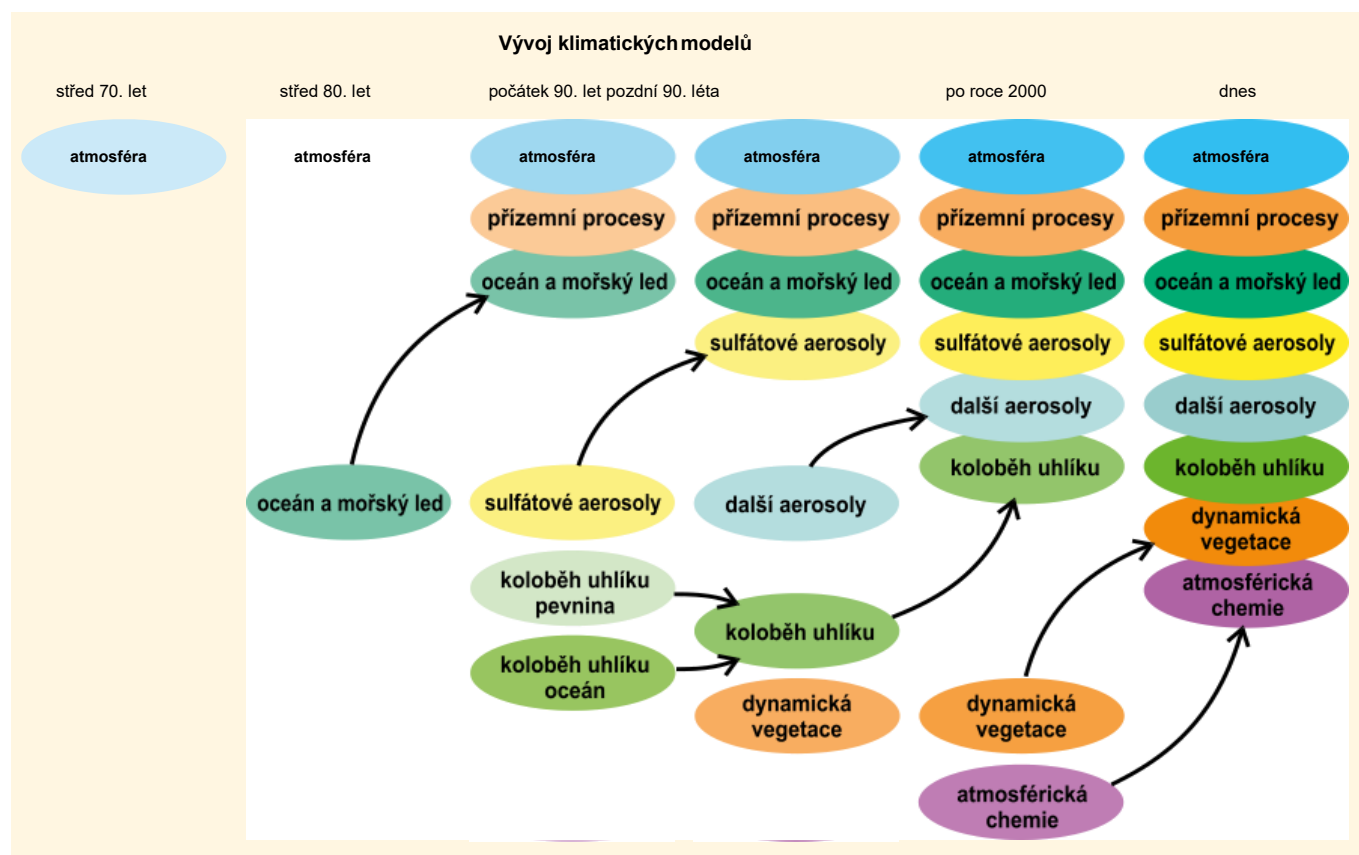
nelze použít laboratorní přístup k jednotlivým součástem a jejich interakcím. Pro získání celkového i lokálního obrazu, který může být využit např. pro rozhodování o adaptačních či mitigačních opatřeních, je třeba komplexní studium v reálných podmínkách, které ale těžko může splnit základní požadavek na opakovatelnost experimentu, tak důležitý požadavek kladený na fyzikální experiment. V klimatickém systému tedy není možný reálný experiment (tedy kromě toho jednorázového, který vypouštěním emisí skleníkových plynů civilizace v současné době provádí), takže i když máme velmi stará a vpravdě historická pozorování a poznatky, nemluvě o různých rekonstrukcích dat z paleoklimatologie, je klimatická věda jako fyzikální disciplína velmi mladá. Je to až numerický (matematicko-fyzikální) model, který poskytuje nástroj či prostředek pro provádění příslušných experimentů, což však vyžaduje pokročilou výpočetní techniku. Tu ale klimatologové dostávají do rukou až v druhé polovině minulého století, dostatečný výkon pro skutečně realistické simulace je k dispozici spíše teprve na jeho konci či na přelomu tisíciletí.

Historie vývoje modelů atmosféry

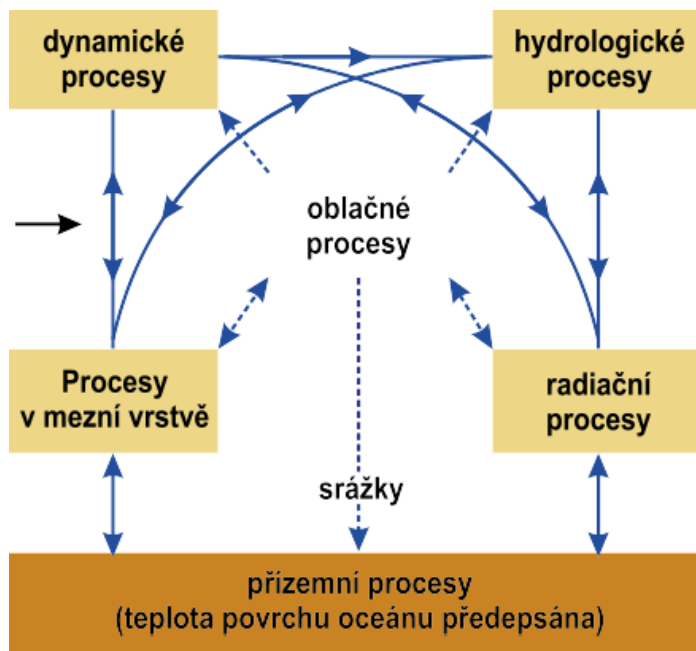
V současnosti je klimatologie samozřejmou součástí meteorologie, resp. jejím rozšířením v kontextu dalších složek klimatického systému zmíněných výše a se zájmem o jeho dlouhodobé chování. Fyzika atmosféry obecně měla dlouho stejný problém s realizací plnohodnotných fyzikálních experimentů, což platilo i pro meteorologii a její předpověď počasí. Proto historické počátky současných klimatických modelů jdou ruku v ruce s modely pro předpověď počasí, nicméně v době ne příliš historicky vzdálené. Z druhé strany, po teoretické stránce byla meteorologie již dávno dobře připravena a vybavena fyzikálními poznáními zákonitostí proudění, radiace, termodynamiky apod.

Norský fyzik a meteorolog Vilhelm Bjerknes (1862-1951), jeden ze zakladatelů dynamické meteorologie, teoreticky analyzoval možnosti předpovědi počasí s využitím rovnic atmosférické dynamiky. R. 1919 rekapituluje ve své práci možnosti a přichází s vizionářským závěrem "pokud počáteční podmínky ... a pokud rovnice ... s dostatečnou přesností, potom by stav atmosféry mohl být zcela určen nějakým supermatematikem v libovolném následném čase". Samozřejmě, v té době nikdo netušil, jakým směrem se budou rozvíjet výpočetní možnosti s dnešními superpočítači na konci, ale ta analogie se současnou situací v předpovědi počasí (i v modelování atmosféry obecně) je obdivuhodná. Je pravda, že z hlediska deterministické předpovědi počasí je ten čas nakonec velmi omezený, což ukázal dlouho později (1963) Eduard Lorenz (1917-2008) ve své teorii chaosu. Teoreticky se jedná o několik týdnů, v praxi počátků numerické předpovědi to bylo několik málo dní, dnes lze mluvit o době kolem 10-14 dní, v závislosti na stabilitě cirkulační situace, ale s tím, že úspěšnost ke konci tohoto období už nebude velká. To ovšem nijak nebrání klimatickému modelování, které, jak ukázal mimochodem právě Hasselmann v [2], může analyzovat dlouhodobé průměry a výsledný „lineární“ signál ve velmi dlouhých simulacích, tedy modelové klima. Když v simulaci atmosféry prodloužíme čas předpovědi k hranici deterministické předpovědi, která je dána vlivem nelinearity dynamického systému, či dokonce za ní, chování modelové atmosféry se sice vzdaluje od reality aktuálního denního počasí, ale za předpokladu realistického a přesného nastavení parametrů modelu a vnějších podmínek může v dlouhodobé simulaci vytvářet modelové klima. To lze verifikovat vůči reálnému klimatu; pokud dosáhneme dobré shody, opravňuje nás to, i když s jistými nejistotami, k aplikacím takových modelů pro simulace scénářů budoucího vývoje klimatu. Dnešní klimatické modely se testují skutečně masivně, nejen v podmínkách blízkých historických dat, ale i v dobách velmi vzdálených, např. poslední době ledové apod. Ne vždy se musí jednat o „lineární“ signál, v některých dlouhodobých interakcích a zpětných vazbách může docházet k tzv. „tipping points“, tedy bodům rychlejšího přechodu mezi různými stavy, které by mohly mít dramatický vliv na klima Země a lidskou civilizaci. I na takové jevy jsou současné modely testovány a možnosti výskytu takových bodů zlomu ve vývoji klimatu jsou analyzovány i v budoucích scénářích.

Začátkem 60. let dochází k velkému rozvoji takzvaných GCM, což tehdy bylo interpretováno jako General Circulation Models, tedy modely všeobecné cirkulace, které se začaly používat běžně pro předpověď, jejich výsledky byly využívány i k řízení vnořených předpovědních regionálních modelů na omezené oblasti. Vedle toho ale mohly být tím potřebným nástrojem pro experimenty s atmosférou, ať již pro simulaci vlivu nějakých idealizovaných procesů či nějakých specifických podmínek. Odtud to byl již pouze krůček na cestu k reálným klimatickým simulacím, podél které byly modely postupně doplňovány o další potřebné procesy a vlivy (jak shrnuje Arakawa v [3]), včetně zahrnutí dalších složek klimatického systému, jak ukazuje Obr. 1. V té době již tedy bylo samozřejmostí použití úplných základních rovnic, byla vyřešena většina numerických problémů s těmito rovnicemi a hlavně vyvinuty i další metody řešení, které umožnily i jejich integraci na skutečně dlouhou dobu. Použitím komplexního systému rovnic atmosférické dynamiky rovněž došlo k přímému propojení dynamiky a termodynamiky atmosféry, včetně potřebného zahrnutí vodní páry, která má vliv na radiální procesy, mj. i prostřednictvím tvorby oblačnosti, na což byly vyvíjeny různé parametrizace, především pak konvekce, která je hlavním motorem atmosférické cirkulace především v rovníkových oblastech. Základní schéma modelů, které odpovídá i prvnímu Manabeho cirkulačnímu modelu popsánému v [4], ukazuje Obr. 2., v té době ještě bez propojení s oceánem, resp. s předepsanou teplotou jeho povrchu. Postupně se původní zkratka GCM začíná interpretovat jako globální klimatické modely (Global Climate Models), dnes ale, při zahrnutí podstatné většiny všech složek klimatického systému a jejich interakcí, mluvíme spíše o tzv. Earth System Models (ESM). Nejdůležitějším předpokladem prudkého rozvoje modelů, a to ať již pro předpověď počasí nebo modelování klimatu, byl samozřejmě vývoj výpočetní techniky, bez kterého by dnešní dlouhodobé simulace scénářů klimatické změny byly nemyslitelné.



Obr. 1. Rámcový vývoj klimatických modelů směrem k tzv. Earth System Models (ESM) doplňováním o další komponenty, popisující jednotlivé další složky klimatického systému, původně řešené tzv. off-line.



Obr. 2. Dobové schéma součástí klimatických modelů, které v zásadě odpovídá i dnešní konstrukci modelů atmosféry.

Klimatické modely byly na poněkud odlišných principech vyvíjeny již dříve. Kromě výše uvedené formulace globálních cirkulačních modelů lze použít základní energetický koncept, založený na energetické bilanci s různým stupněm zjednodušení a zobecnění, tím také i jejich rozlišení, jak shrnuje Ghil v [5].

I když by se mohlo zdát, že se současnými GCM, či dokonce ESM, takové zjednodušené modely nepotřebujeme a že se jimi tedy již nemusíme zabývat, není to úplně pravda. Jistě, pokud jde o

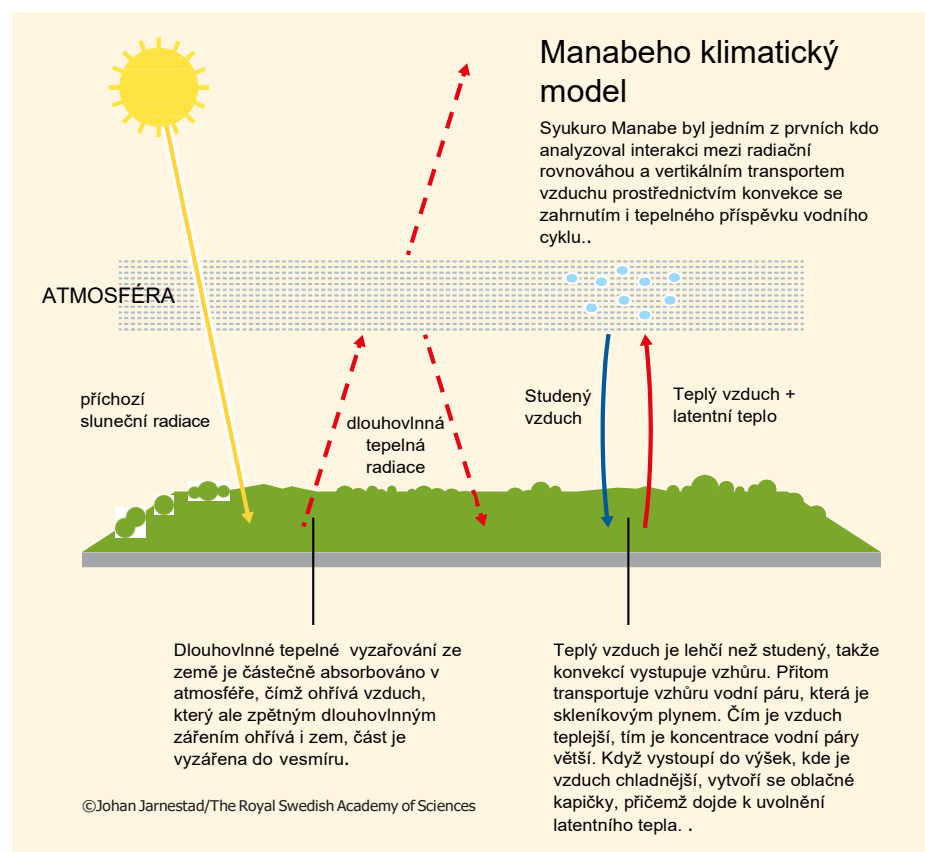
podrobné pokrytí jednotlivých oblastí Země informacemi o vývoji klimatu a v rámci základních scénářů klimatické změny, např. pro studium jejích důsledků, jsou komplexní globální modely a dnes i jejich regionální verze (Regional Climate Models – RCM) nenahraditelné. Pro koncepční úvahy i analýzu velkého množství různých variant vývoje, tedy scénářů, které ve velkém objemu nelze pokrýt kompletními simulacemi GCM, se ale tyto zjednodušené modely stále výborně hodí a poskytují srozumitelný a dostupný nástroj pro tzv. scaling, tedy získání široké palety různých scénářů. Vedle toho jsou výsledky GCM stále interpretovány a analyzovány i z pohledu těchto koncepčních modelů, což poskytuje možnost diskuse např. jejich klimatické citlivosti, tj. změnu globální teploty při zdvojnásobení obsahu CO₂ v atmosféře (s čímž začal právě Manabe), a její srovnání s daty odvozenými z pozorování, jak je analyzováno v hodnotících zprávách IPCC [6].

Nobelova cena za modelování klimatu

Vraťme se k oběma novým nositelům Nobelovy ceny a podívejme se na podrobnější zdůvodnění přínosu obou laureátů v rámci první poloviny Nobelovy ceny za fyziku, jak je uvedeno v tiskové zprávě. Syukuro Manabe „ ... demonstroval, jak stoupající úroveň koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře působí nárůst teplot na povrchu Země. V 60. letech vedl vývoj fyzikálních modelů klimatu Země a byl prvním, kdo studoval vztah mezi radiační rovnováhou a vertikálním transportem vzduchových hmot. Jeho práce položila základ pro vývoj současných klimatických modelů.“ Pokud jde o druhého laureáta, Klaus Hasselmann „ ... asi o deset let později vytvořil model spojující počasí a klima, čímž odpověděl na otázku, jak mohou být klimatické modely spolehlivé, když počasí se chaoticky mění. Rovněž vyvinul metody pro identifikaci specifických signálů, tzv. stop, které jak přirozené jevy, tak i lidská činnost zanechávají ve vývoji klimatu. Jeho metoda je použita i v důkazu, že rostoucí teplota v atmosféře je důsledkem antropogenních emisí oxidu uhličitého.“

To vše je velmi úzce spjato se zásadními pokroky klimatické vědy. Vývoj modelů atmosféry, ať již pro předpověď počasí nebo modelování klimatu, je zásadně propojen s rozvojem výpočetní techniky, jak již bylo výše uvedeno. To dobře koinciduje s obdobím začátků kariér, resp. aktivního působení obou laureátů této „klimatické“ poloviny Nobelovy ceny. Syukuro Manabe, známý mezi přáteli či spolupracovníky spíše jako Suki Manabe, Američan japonského původu, je i u nás znám jako dynamický meteorolog, který se intenzivně věnoval již od 60. let minulého století modelům atmosféry a klimatickému modelování. V r.

1958, po zakončení Ph.D. studia na univerzitě v Tokiu, přišel do USA na pozvání ředitele výzkumné laboratoře pro všeobecnou cirkulaci (Joseph Smagorinsky), která byla v té době součástí U.S. Weather Bureau a sídlila ve Washingtonu. Tam se Manabe začal věnovat vývoji a programování klimatického modelu, což pokračovalo i později, když se laboratoř přestěhovala do Princetonu a byla přejmenována na Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL). Tam dostává k ruce programátory, kteří se věnují programování modelu a on se tak může věnovat více vlastnímu vývoji. Od poloviny 60. let, kdy je Smagorinsky více angažován v mezinárodní aktivitě budování programu globálního výzkumu atmosféry, Manabe přebírá vedoucí roli při vývoji modelu GFDL a experimentů s ním prováděných. Úspěšně v tom pokračuje až do konce svojí aktivní kariéry v r. 1998, samozřejmě mimo další funkce.



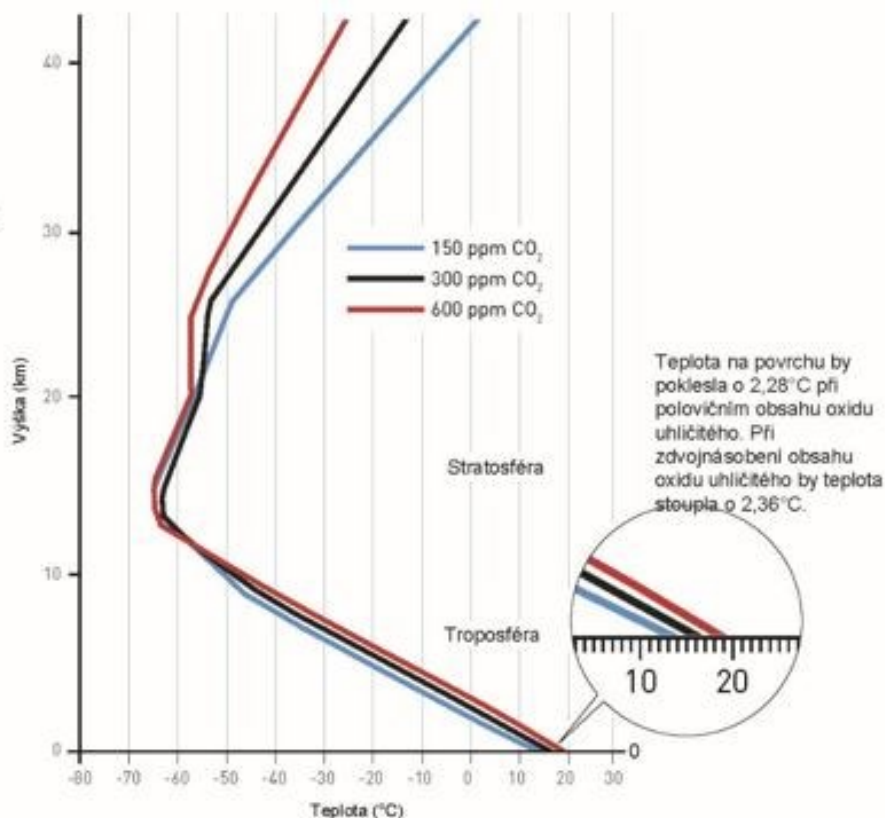
Obr. 3. Schema Manabeho koncepčního modelu radiačně-konvektivní rovnováhy.

Jeho oceněný výzkum začínal jednoduchým energetickým modelem atmosférického sloupce v interakci se zemským povrchem, tedy radiačně-konvektivním modelem, jak bylo zmíněno již výše, viz Obr. 3. Již tento model posloužil S. Manabemu ke studiu účinku skleníkových plynů, především tedy vodní páry, ale v [7] se věnoval i analýze citlivosti vlivu změn koncentrace CO₂ na teplotu, viz. Obr. 4. S rostoucími možnostmi výpočetní techniky přešel k 3D globálnímu

cirkulačnímu modelu (1965), s kterým S. Manabe rovněž analyzoval účinky narůstajících koncentrací CO₂ na teplotu a srážky (viz [8]). Celkem záhy došel k závěru, že složitost klimatického systému musí být i v modelu postižena vzájemnou interakcí jeho složek, což vedlo na modelové propojení atmosféry a hydrosféry, zvláště pak s oceány jako další důležitou složkou klimatického systému (1969). Se svojí skupinou v Geophysical Fluid Dynamics Laboratory na Princetonu se po těchto začátcích dále aktivně podílel na rozsáhlém vývoji těchto modelů a jejich aplikacích, mimo jiné i při studiu tzv. tipping points, kde se snažil verifikovat modelové výstupy s paleoklimatickou realitou náhlých změn, spojených s odtokem sladké vody z tajících pevninských ledovců do oceánu. V podstatě po celou dobu své výzkumné kariéry byl průkopníkem metod klimatického modelování a vedoucím vývoje jednoho z nejznámějších a nejdéle sloužících klimatických modelů na světě. V nedávné době mu vyšla i kniha [9], jejíž samotný název „Beyond Global Warming: How Numerical Models Revealed the Secrets of Climate Change“ vyjadřuje zcela jasně celoživotní úsilí S. Manabeho.

Oxid uhličitý ohřívá povrch Země

Rostoucí obsah oxidu uhličitého v atmosféře způsobuje vyšší teploty ve spodních vrstvách, zatímco vyšší vrstvy se ochlazují. Manabe tak potvrdil, že změna teploty je důsledkem rostoucího množství oxidu uhličitého; pokud by příčinou byl nárůst sluneční radiace, musela by se ohřívát celá atmosféra.



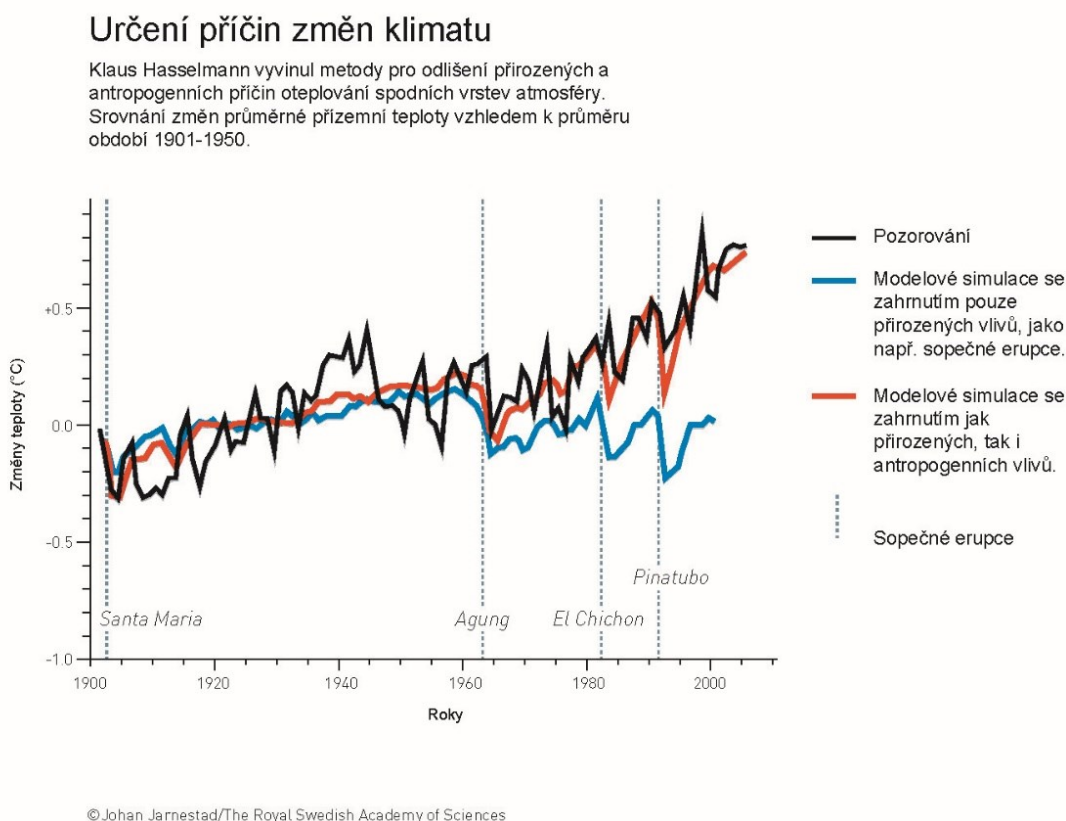
©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Obr. 4. Citlivosti atmosféry na změny koncentrace CO₂ (podle [7]).

Druhý laureát, Klaus Hasselmann je německý dynamický klimatolog, který se ve své vědecké práci zabýval především analýzou a interpretací výsledků modelování klimatu a klimatické změny, rovněž se věnoval významně i oceánologii, studoval vlny v oceánu. Výrazně se angažoval i v administrativních záležitostech modelování změny klimatu v Německu, byl zakládajícím ředitelem Max Planck Institutu v Hamburku, který se brzy po svém založení v r. 1975 stal jedním z vedoucích center modelování klimatu ve světě, tedy v prvních fázích systému atmosféra – oceán, ale v dnešní době, jak již řečeno, mluvíme spíše než o globálním klimatickém modelování o tzv. ESM, tedy s důrazem na zahrnutí plné komplexnosti klimatického systému se všemi jeho složkami. V tom model MPI patřil a patří k předním nástrojům nastolujícím i některé standardy této disciplíny. Zároveň K. Hasselmann působil od r. 1988 i jako ředitel DKRZ (Deutsches Klimarechenzentrum – tedy německé výpočetní centrum pro modelování klimatu), které rovněž sídlí v Hamburku, fakticky v těsném sousedství Max Planck Institutu. (Škoda, že nějaké takové výpočetní centrum nemáme k dispozici i u nás.) V obou těchto pozicích určoval směry vývoje do r. 1999.

Klaus Hasselmann, jak již bylo zmíněno, mimo jiné studoval souvislosti krátkodobých povětrnostních jevů a dlouhodobého klimatického vývoje, např. jak rychlé teplotní fluktuace v atmosféře ovlivňují dlouhodobý vývoj změn teploty oceánů (viz [2]). Poskytl tak i důkazy o tom, proč navzdory krátkodobým výkyvům počasí, kde předpověď často selhává, klimatické modely mohou poskytovat spolehlivé „předpovědi“.

Rovněž tímto způsobem spolu s dalšími výzkumnými spolupracovníky ukázali souvislost mezi nárůstem koncentrace CO₂ v atmosféře a globálním oteplováním. Ve svých studiích rozvinul metodu analýzy klimatického signálu a hledání stop v tomto signálu, které pocházejí od konkrétních procesů a jevů na různých škálách (viz [10], [11]), viz Obr. 5.



Obr. 5. Ukázka analýzy klimatických dat s užitím Hasselmannovy metody identifikace klimatického signálu (podle [12])

Jestli to byli právě tito dva, kteří „předpověděli“ klimatickou změnu, o tom by se asi dalo dlouze diskutovat a jistě by se dala napsat řada dalších jmeny vést dlouhé diskuse, zřejmě by se dala napsat řada dalších jmen, která ale nejspíše nikdo nenominoval, protože „... přeci za klimatologii (meteorologii) se Nobelova cena za fyziku nedává ...“, jak si pamatuji od jednoho ze svých učitelů na začátku studia meteorologie a klimatologie. Řekl bych, že i sami laureáti budou interpretovat udělení tohoto ocenění jako první, a tedy velice prestižní ohodnocení významu a přínosu klimatologie v rámci fyzikálních věd, což do jisté míry potvrdila i tisková konference se S. Manabem na Princetonu večer v den oznámení rozhodnutí o Nobelově ceně za fyziku. Při rozhodování o tomto ocenění byl jistě silným argumentem i vysoký potenciál reálné aplikace oceněného modelování klimatické změny v životě civilizace na planetě Zemi, kde to skutečně naléhavě potřebujeme a v nejbližších dekádách budeme potřebovat.

Reference

- [1] K. Hasselmann, H. Schellnhuber, O. Edenhofer: Climate change: complexity in action. *Physics World*, **17**, 31-35. doi:10.1088/2058-7058/17/6/34 (2004).
- [2] K. Hasselmann: Climate change - Linear and nonlinear signatures. *Nature*, **398**(6730), 755-756. doi:10.1038/19635 (1999).
- [3] A. Arakawa: A Personal Perspective on the Early Years of General Circulation Modeling at UCLA. In: *General Circulation Model Development: Past, Present, and Future*. D.A. Randall ed., Academic Press, 807s, (1999).
- [4] S. Manabe, J. Smagorinsky, R. F. Strickler: Simulated climatology of a general circulation model with a hydrological cycle. *Mon. Wea. Rev.*, **93**, 769-798, (1965).
- [5] M. Ghil: Atmospheric modeling. In "*Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*" (D. G. Martinson, K. Bryan, M. Ghil, M. D. Hall, T. R. Karl, E. S. Sarachik, S. Sorooshian, and L. D. Talley, eds.). pp. 164-168. National Academy Press, Washington, DC, (1995).
- [6] IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press, (2021).
- [7] S. Manabe, R. Wetherald: Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J. Atmos. Sci.* **24**, 241-259, (1967).
- [8] S. Manabe, R. T. Wetherald: The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *J. Atmos. Sci.* **32**, 3-15, (1975).
- [9] S. Manabe, A. J. Broccoli: Beyond Global Warming: How Numerical Models Revealed the Secrets of Climate Change. Princeton U. Press, (2020).
- [10] K. Hasselmann: Optimal fingerprints for the detection of time-dependent climate change. *Journal of Climate*, **6**, 1957-1971. doi:10.1175/1520-0442, (1993).
- [11] K. Hasselmann: Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change. *Climate Dynamics*, **13**, 601-611. doi:10.1007/s003820050185, (1997).
- [12] G.C. Hegerl, F.W. Zwiers: Use of models in detection & attribution of climate change, *WIREs Climate Change*, **2**, 570-591, (2011).