

125 LET KONCEPCE SKLENÍKOVÉHO JEVU SVANTE ARRHENIA

ZDENĚK SLANINA

Tara centrum, Cukubská univerzita, Japonsko
fromzdenek_s@yahoo.com

Na podzim 1895 proslavil Svante Arrhenius přednášku, ve které předložil kvantitativní model role CO₂ ve skleníkovém jevu vedoucí k výsledkům v zásadě platným i dnes. Tyto výsledky pak na jaře 1896 publikoval časopisecky¹. V té době již byl akceptován radiační zákon Stefana² (či Stefana a Boltzmannova³). Ten byl později i odvozen Planckem s pomocí (tehdy ještě spekulativního) kvantování energie (tuto nadstavbu však už Arrhenius nepotřeboval). Jeho motivací tehdy bylo navrhnout možné vysvětlení pro vznik doby ledové, nikoliv tedy ještě otázka zvyšování teploty atmosféry v důsledku spalování uhlikatých paliv.

Podle Stefanova-Boltzmannova zákona úhrnná energie vyzařovaná černým tělesem (tj. tělesem pohlcujícím záření všech vlnových délek) roste se čtvrtou mocninou absolutní teploty. Tento zákon je možné aplikovat i na odhad průměrné teploty povrchu Země. Za tepelné rovnováhy musí být energie přijímaná zemským povrchem rovna energii jím naopak vyzařované do prostoru. Protože ale část slunečního záření je odražena, aniž by došlo k jejímu pohlcení povrchem, zahrnuje se redukce na toto tzv. albedo (může tvořit 30 % přicházející energie). S pomocí Stefanova-Boltzmannova zákona tak pro průměrnou teplotu Země vychází⁴ hodnota 255 K, tedy o nějakých 33 K nižší než hodnota známá z pozorování. Tento rozdíl způsobují atmosférické plyny zachycující část vyzařované energie – hlavně jde o CO₂ a H₂O, dále O₃, CH₄, atd.

Klíčovým faktorem je redistribuce energií, opět související s teplotou obou těles, která vede k velmi odlišné podobě spekter záření přicházejícího od Slunce a toho naopak vyzařovaného Zemí zpět do prostoru. V jednoduché podobě to popisuje Wienův posunovací zákon⁵ – vlnová délka s nejvyšší zářivostí je nepřímě úměrná teplotě tělesa. Zatímco sluneční spektrum vykazuje⁶ maximum kolem vlnové délky 500 nm, maximum spektra vyzařovaného Zemí je kolem 10 000 nm. To je v souladu s Wienovým posunovacím zákonem, neb teplota Země je přibližně dvacetkrát nižší, než teplota slunečního povrchu. Poznamenejme, že u přicházejícího slunečního záření pak zachycuje ozónová vrstva energetičtější složku jeho UV záření. Maximum záření emitovaného Zemí leží při podstatně delších vlnových délkách, totiž v těch, ve kterých adsorbují IČ vibrační spektra polyatomických komponent atmosféry (při kterých však neadsorbují obě hlavní složky atmosféry, N₂ a O₂ – fakticky v důsledku⁷ symetrických výběrových pravidel). Je to tento zásadní rozdíl ve spektrálních profilech Slunce a Země, který spolu s přítomností polyatomických molekul

v atmosféře umožňuje skleníkový efekt.

Dnes spektrální profily vyzařování energie ze Země do prostoru poskytují měření z umělých družic⁸. Pro toto vyzařování do prostoru používá Arrhenius označení temné paprsky, zatímco dopadající sluneční záření označuje jako paprsky světelné. Nicméně Arrhenius sám žádná měření neprováděl (zmiňuje, že by stavba přístrojů stejně přesahovala jeho omezené prostředky). Místo toho informace potřebné pro okalibrování svého modelu čerpal z měření⁹ IČ záření na Zemi přicházejícího od Měsíce, která za úplňku v letech 1885–7 prováděl americký astronom¹⁰ Samuel P. Langley. Vedle toho Arrhenius též navazoval na dřívější poznatky o ohřívání atmosféry od svých předchůdců, kterými byli francouzští učenici J. Fourier, C. Pouillet a Angličan J. Tyndall. Jeho vzorce ale vycházely právě z tehdy nově formulovaného radiačního zákona Stefana. Vedle příspěvku CO₂ uvažoval i roli vodní páry. Na základě svých výpočtů pak nakonec podal¹ předpověď, jak se bude měnit teplota na Zemi, a to jak při poklesu (což byla jeho iniciální motivace – vysvětlení vzniku doby ledové), tak při zvyšování obsahu CO₂ v zemské atmosféře. Výsledky tabeloval pro různé zeměpisné šířky a roční období. Došel tak k zprůměrovaným hodnotám, že pokles obsahu CO₂ na dvě třetiny jeho tehdejší hodnoty povede k poklesu teploty o 3,2 °C, zatímco naopak vzestup na 1,5-násobek přinese zvýšení teploty o 3,4 °C. A pak další zvyšování koncentrace CO₂ na 2-, 2,5- a 3-násobek by mělo způsobit zvýšení teploty o 5,7, 7,4 a 8,4 °C. Přes mnoho zjednodušení obsažených v Arrheniově modelu se nicméně jednalo i z dnešního pohledu o realistické hodnoty.

Jistý extrémní limitní vývoj oteplování u tělesa za naší sluneční soustavy představují poměry panující na planetě Venuši, které se označují za stav skleníkového jevu, který se vymknul kontrole. Atmosféra Venuše je z 96 % tvořena¹¹ CO₂, přičemž atmosférický tlak na povrchu je kolem 90 atm. To vytváří podmínky pro skutečně masivní skleníkový jev vedoucí k měřené povrchové teplotě kolem 730 K. Při neadsorbující atmosféře by tato teplota byla⁴ nižší o alespoň 420 K. Počátek tohoto masivního oteplení na Venuši objasněn dosud není. Se stoupající teplotou v důsledku nárůstu samotného CO₂ se ale přidávají další akcelerující faktory. Kupř. pro Země je to nárůst vodní páry v atmosféře v důsledku stoupající teploty moří, a současně i další nárůst atmosférického CO₂ – o ten, co byl původně rozpuštěn ve vodách, atd.

Arrhenius byl aktivní v řadě vědeckých směrů, jeho nejvýznamnějším příspěvkem byla ovšem iontová disociace elektrolytů, za kterou obdržel v r. 1903 Nobelovu cenu za chemii. Vodivost roztoků elektrolytů se obíral už ve své PhD práci – s její obhajobou v r. 1882 však uspěl¹² jen obtížně, což zbrzdilo samotný začátek jeho akademické dráhy. V definitivní podobě iontovou teorii publikoval¹³ až pak v r. 1887. Postupně se sám stal i vlivnou postavou

v procesu udělování Nobelových cen. Byl přítelem právníka Nobelovy nadace, který s ním konzultoval realizaci Nobelovy závěti, a od r. 1905 působil jako ředitel v Nobelově Institutu. V této pozici nejenom některá udělení podporoval, nýbrž některá naopak i brzdil. Má se za to, že přispěl k neudělení ceny pro D. I. Mendělejeva, vzor tomu, že ho kupř. opakovaně navrhoval¹⁴ první laureát Nobelovy ceny za chemii J. H. van't Hoff. Mendělejev totiž původně byl kritikem¹⁵ iontové teorie. Podobně, avšak tentokrát neúspěšně, se snažil – byť z odlišných důvodů – zabránit¹⁶ druhé Nobelově ceně v případě Marie Curie.

Arrhenius sám neviděl své předpovědi nikterak dramaticky (na rozdíl od svého vzdáleného potomka, kterým je v současnosti širší veřejnosti známější Greta Thunbergová). V r. 1896 totiž vyjádřil¹⁷ optimistickou vizi, že tak jak se obsah CO₂ v atmosféře bude zvyšovat, tak se Švédové mohou těšit – byť až po řadě generací – na příznivější klimatické podmínky.

LITERATURA

1. Arrhenius S.: *Phil. Mag.* 41, 237 (1896).
2. Stefan J.: *Sitzungsber. Math.-Naturwiss. Classe Kais. Akad. Wiss. Wien* 79, 391 (1879).
3. Boltzmann L.: *Ann. Phys.* 258, 291 (1884).
4. Campbell I. M., v knize: *Energy and the Atmosphere*, str. 23, 162. J. Wiley & Sons, Chichester 1986.
5. Wien W.: *Wied. Ann.* 52, 132 (1894).
6. Neckel H., Labs D.: *Sol. Phys.* 74, 231 (1981).
7. Slanina Z., Uhlík F., v knize: *Weakly Interacting Molecular Pairs: Unconventional Absorbers of Radiation in the Atmosphere*, (Camy-Peyret C., Vigasin A. A., ed.), str. 101. Springer, Dordrecht 2003.
8. Hanel R. A., Conrath B. J., Kunde V. G., Prabhakara C., Revah I., Salomonson V. V., Wolford G.: *J. Geophys. Res.* 77, 2629 (1972).
9. Langley S. P.: *Mem. Nat. Acad. Sci.* 4, 107 (1889).
10. Barr E. S.: *Infr. Phys.* 3, 195 (1963).
11. Slanina Z., Fox K., Kim, S. J.: *Thermochim. Acta* 200, 33 (1992).
12. Arrhenius S.: *J. Chem. Educ.* 5, 1486 (1928).
13. Arrhenius S.: *Z. Phys. Chem.* 1, 631 (1887).
14. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1901/hoff/nominations/>
15. Coffey P.: *Cathedrals of Science*, str. 23. Oxford University Press, Oxford 2008.
16. <https://zdenekslanina.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=620569>
17. Arrhenius S.: *Nordisk Tidskrift* 14, 121 (1896).