

## PAUL J. CRUTZEN (1933–2021) – POSLEDNÍ Z TROJICE LAUREÁTŮ NOBELOVY CENY ZA VÝZKUMY OZÓNOVÉHO PLÁŠTĚ

ZDENĚK SLANINA

Tara-centrum, Cukubská univerzita, Japonsko  
fromzdenek\_s@yahoo.com

Klíčová slova: život a dílo Paula J. Crutzena (1933–2021), ozónový plášť, ozónová díra, oxidy dusíku, katalýza v polárních stratosférických mracích, antropocén

V lednu odešel i poslední z trojice oceněné roku 1995 Nobelovou cenou za „práce v chemii atmosféry zvláště ve vztahu k tvorbě a rozkladu ozónu“<sup>1</sup>. Obdivovatel Prahy Paul Crutzen pocházel z Holandska, kde nejprve vystudoval stavařinu a pracoval i na stavebním úřadě v Amsterdamu. Pak ho ale sňatek s finskou manželkou Terttu přivedl v roce 1958 do Stockholmu, kde přijal místo programátora počítače na univerzitním Meteorologickém ústavu stockholmské univerzity (bez předchozí programátorské zkušenosti, ale tu v těch pionýrských počítačových dobách stejně nemohl mít prakticky nikdo – tehdy programoval ještě v archaickém strojovém kódu). Tam se začal zajímat o procesy v atmosféře, budoval počítačové modely atmosféry a vypracoval zde i svou doktorskou dizertaci. Přes Oxford a Colorado pak jeho cesta vedla do německého Mainzu, kde se v roce 1980 stal ředitelem Atmosférické sekce Ústavu Maxe Plancka pro chemii. Tento ústav původně sídlil v Berlíně jako Ústav císaře Viléma pro chemii, koncem války však byl preventivně bombardován – podílel se na německém jaderném programu. Zde mimochodem Otto Hahn na sklonku roku 1938 objevil štěpení uranu, za což obdržel Nobelovu cenu za rok 1944 – proto se ústav v Mainzu uvádí s podtitulem Ústav Otto Hahna.

Paul Crutzen již v roce 1970 upozornil, že oxidy dusíku umožňují sestavit cyklus, ve kterém dochází k rozkladu ozónu<sup>2,3</sup>. Celkem jsou ale popsány tři kanály na atmosférické odbourávání ozónu. Ty zbývající dva pracují buď s aktivními částicemi odvozenými od vody, nebo s atomy chloru. Podobně pak Mario José Molina (1943–2020) a Frank Sherwood Rowland (1927–2012) z Kalifornské univerzity v Irvinu poukázali<sup>4</sup> i na roli freonů, jejichž fotodisociace ve stratosféře poskytuje pro destrukci ozónu atomy chloru. Průmyslová činnost totiž vytrvale posilovala právě chlorový rozpadový kanál. Ozónový plášť filtruje ultrafialovou složku slunečního záření na úroveň, pro kterou jsou organismy uzpůsobeny. S každým procentem, o které se ozónová vrstva zeslabí, se však předpokládá<sup>5</sup> zvýšení výskytu rakoviny kůže o alespoň 2 %. V roce 1974 Paul Crutzen shrnul<sup>6</sup> své modelové výpočty do předpovědi, že 20% globální navýšení produkce oxidů dusíku by vedlo k redukci ozónové vrstvy o 4 % a pokud by se zvýši-

la produkce freonů na dvojnásobek, mělo by to za následek redukci ozónu o 12 %. Pro srovnání – nasazení flotily 500 supersonických stratosférických dopravních letadel ve výšce 21 km by vedlo také k 12% redukci ozónové vrstvy – nemluvě o masivním jaderném konfliktu, který by množství ozónu srazil na polovinu. Vedle pozdější trojice nobelistů Crutzena, Moliny a Rowlanda na takováto nebezpečí upozorňoval<sup>7</sup> i Harold Johnston (1920–2012). Jejich varování před riziky<sup>2–8</sup> postupně přinášela ovoce a nakonec vedla v roce 1987 až k podpisu Montrealského protokolu omezujícího používání freonů.

V průběhu osmdesátých let opakovaná měření nadto prokázala existenci nového jevu – šlo nikoliv jenom o oslabení ozónové vrstvy, ale o její tak pronikavou redukci, že se začalo hovořit o ozónové díře. Ta znamená náhlý pokles koncentrace ozónu až na 1/3, ale zatím jen v oblasti nad Antarktidou, periodicky se opakující vždy v říjnu, tedy ke konci tamní noci. Vysvětlení jevu zahrnuje pojem rezervoárových sloučenin<sup>9,10</sup>, do kterých je uložena část chloru v atmosféře. Nejvýznamnějším reprezentantem je molekula ClONO<sub>2</sub>, nitrát chloru – zde se stýká chlorový a dusíkový cyklus. Rozklad této relativně stabilní molekuly může však být významně urychlen heterogenní katalýzou na površích. Jak ukazovaly laboratorní experimenty<sup>11,12</sup>, tento rozklad probíhá na protonované formě<sup>13</sup> ClONO<sub>2</sub>H<sup>+</sup>. Takovýto katalyticky aktivní povrch se vyskytuje i v tzv. stratosférických polárních mracích, jejichž vznik předpokládá dostatečně nízkou teplotu, které je dosaženo až ke konci antarktické polární zimy. Významnou složkou těchto mraků je trihydrát HNO<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O – kyselá katalýza na povrchu těchto částic v stratosférických mracích ke konci polární noci představovala základ pro vysvětlení periodického vzniku ozónové díry nad Antarktidou.

S Paulem jsem měl možnost se setkávat při svém pobytu v Mainzu na začátku devadesátých let (kam jsem konečně vyjel po nějakých deseti letech usilování o souhlas od příslušných míst). Měli jsme v zásobě řadu rozpracovaných problémů, které jen čekaly, až jednou bude přístup na výkonný počítač. Byly to problémy ze dvou zdánlivě odlehlých oblastí – sloučeniny významné v atmosférách Země a planet, a uhlíkaté agregáty (významné v mezihvězdném prostoru, třeba v okolí uhlíkatých hvězd). Malé uhlíkaté agregáty studoval již za války Otto Hahn a zbytek systémů spadl pod atmosférickou chemii. Paul byl jako většina Holanďanů relaxovaný a liberální, měl dar jednat s každým jako se sobě rovným. Do seznamu pak přidal několik molekul, které považoval za atmosféricky zajímavé, jako třeba dimer ozónu<sup>14,15</sup>, došlo i na sloučeniny významné pro skleníkový jev<sup>16,17</sup>, a třeba taky na atmosféru Halleyovy komety<sup>18</sup>.

Paul Crutzen zavedl několik pojmů, které přešly do všeobecného povědomí – např. označení jaderná zima<sup>19</sup>, která by nastala po jaderné válce v důsledku zamlžení

atmosféry prachem a kouřovými zplodinami. Jiným jím popularizovaným pojmem je antropocén<sup>20</sup>, geologická doba, ve které žijeme a kdy lidská činnost ovlivňuje globální atmosférické, biologické i geologické procesy. Paul Crutzen měl vytříbenou schopnost komunikovat výsledky vědy širší veřejnosti<sup>21</sup>. Nakonec i u nás je dosud v živé paměti jeho vystoupení v Praze v rámci přednáškového cyklu na paměť Rudolfa Brdičky, zakladatele ÚFCH ČSAV.

## LITERATURA

1. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1995/summary/>, staženo 4. 5. 2021.
2. Crutzen P.: *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 96, 320 (1970).
3. Crutzen P.: *J. Geophys. Res.* 76, 7311 (1971).
4. Molina M. J., Rowland F. S.: *Nature* 249, 810 (1974).
5. Henriksen T., Dahlback A., Larsen S. H., Moan J.: *Photochem. Photobiol.* 51, 579 (1990).
6. Crutzen P. J.: *Ambio* 3, 201 (1974).
7. Johnston H.: *Science* 173, 517 (1971).
8. Peter T., Brühl C., Crutzen P. J.: *Geophys. Res. Lett.* 18, 1465 (1991).
9. Singh H. B., Herlth D., Zahnle K., O'Hara D., Bradshaw J., Sandholm S. T., Talbot R., Crutzen P. J., Kanakidou M.: *J. Geophys. Res.* 97, 16523 (1992).
10. Wayne R. P., Poulet G., Biggs P., Burrows J. P., Cox R. A., Crutzen P. J., Hayman G. D., Jenkin M. E., Le Bras G., Moortgat G. K., Platt U., Schindler U.: *Atmos. Environ.* 29, 2677 (1995).
11. Rowland F. S., Sato H., Khwaja H., Elliott S. M.: *J. Phys. Chem.* 90, 1985 (1986).
12. Nelson C. M., Okumura M.: *J. Phys. Chem.* 96, 6112 (1992).
13. Slanina Z., Uhlík F., Hinchliffe A.: *Spectr. Lett.* 27, 563 (1994).
14. Slanina Z., Adamowicz L.: *J. Atmos. Chem.* 16, 41 (1993).
15. Uhlík F., Slanina Z., Hinchliffe A.: *Thermochim. Acta* 232, 1 (1994).
16. Slanina Z., Uhlík F., Saito A. T., Ōsawa E.: *Phys. Chem. Earth C* 26, 505 (2001).
17. Lemke K. H., Seward T. M.: *J. Geophys. Res.* 113, D19304 (2008).
18. Slanina Z., Uhlík F., Crifo J.-F.: *J. Mol. Struct.* 270, 1 (1992).
19. Crutzen P. J., Birks J. W.: *Ambio* 11, 114 (1982).
20. Crutzen P. J., Stoermer E. F.: *IGBP Newslett.* 41, 17 (2000).
21. <https://www.nobelprize.org/mediaplayer/?id=734>, staženo 4. 5. 2021.