

# Ozonová díra, velikost ledových klastrů a nefungující laser

**MICHAL  
FÁRNÍK**

*Nedávno zveřejnil časopis The Journal of Chemical Physics náš článek, ve kterém jsme v laboratorním experimentu měřili velikosti ledových nanočástic (klastrů). V článku zmiňujeme možný dopad našich výsledků na atmosférické modely. To zřejmě někoho v redakci zaujalo a článek byl zařazen mezi tzv. Research highlights. Následovala krátká zpráva tisku (Press release, American Institute of Physics – AIP) a zároveň se náš článek ocitl mezi dvaceti nejčtenějšími články zmíněného časopisu v měsíci červenci 2012. Tisková zpráva AIP naše výsledky poněkud popularizovala a uvedla je do souvislosti s ozonovou dírou. Tato zpráva upravená do češtiny se objevila i na internetových stránkách AV ČR, následně se jí chopily i některé naše sdělovací prostředky, a tak jsme se mohli z České televize dozvědět, že tým českých vědců změnil pohled na vznik ozonových děr. Rádi bychom v rámci tradice Saturninovy Kanceláře pro uvádění románových příběhů na pravo míru (Ž. Jirotka: Saturnin) alespoň čtenáře Vesmíru ve stručnosti obeznámili s tím, jak to ve skutečnosti s naším „objevem“ a ozonovou dírou vlastně je.*

## Jak vlastně ozonová díra vzniká?

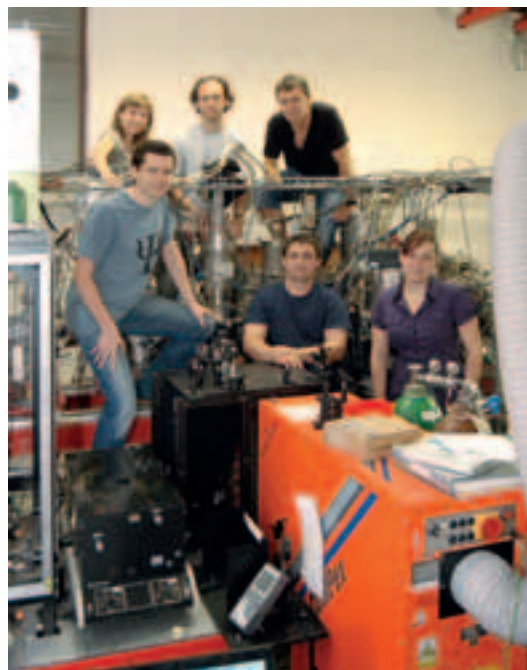
Stratosférický ozon je zásadní pro život na Zemi, protože pohlcuje sluneční UV záření, které může rozbít vazby v molekulách, z nichž se skládají živé organismy, a může tak negativně ovlivnit jejich biologickou funkci. Volné radikály – jako třeba atomy chloru – mohou ve stratosféře ničit ozon řetězovou reakcí, v níž chlor (Cl) reaguje se dvěma molekulami ozonu  $O_3$ , z nichž vytvoří tři molekuly molekulárního kyslíku  $O_2$ . Z reakce se opět uvolní atom Cl, připravený ničit další molekuly ozonu. Tyto reakce probíhají tak dlouho, dokud chlorový radikál nezreaguje s nějakou jinou molekulou.

Chlor se do stratosféry dostává v podobě nechvalně známých freonů, kterými se plnily plechovky se spreji či agregáty ledniček a jejichž doba života v atmosféře se pohybu-

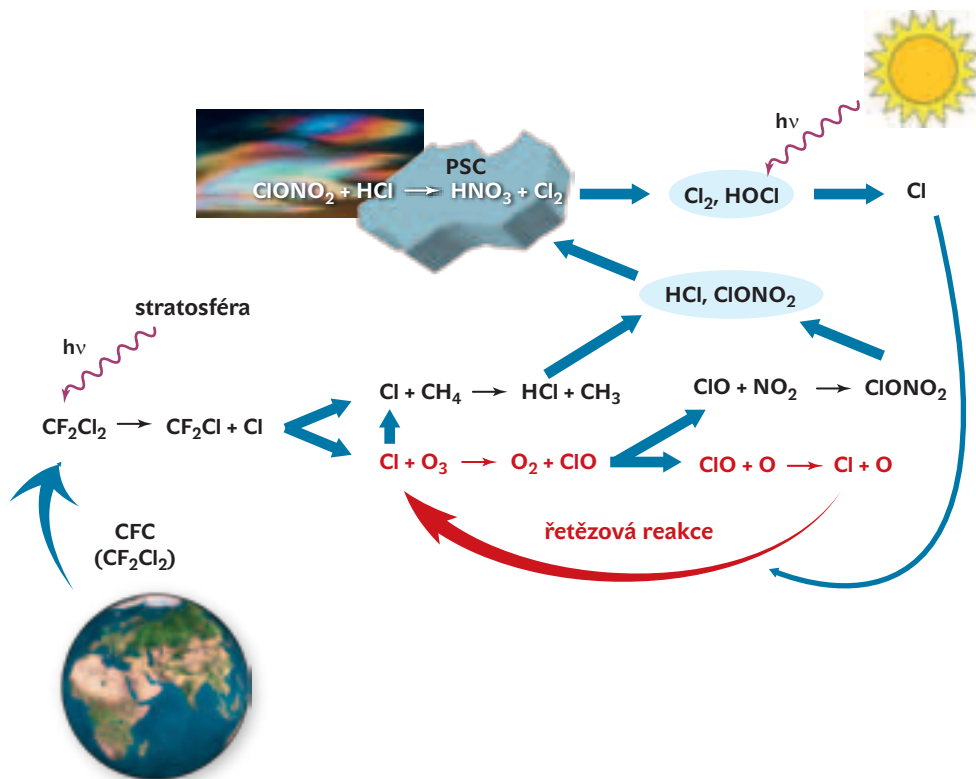
je v intervalu 50 až 100 let. Za tak dlouhou dobu se díky své malé reaktivitě a nerozpustnosti mohou dostat až do stratosféry. Tam proběhne celá řada chemických a fotochemických procesů, jejichž výsledkem je onen chlorový atom ničící ozon.

Avšak ne všechny tyto procesy probíhají mezi plynnými molekulami. Velmi důležité jsou i reakce, ke kterým dochází na povrchu ledových částic v takzvaných polárních stratosférických mracích (PSC). To je důvod, proč ozonová díra vzniká nad póly, neboť stratosféra je obecně velice „suchá“, neobsahuje mnoho molekul vody, a tak může voda kondenzovat a vytvořit mraky pouze v extrémně chladných oblastech stratosféry, tj. nad póly, zejména nad tím studenějším jižním. A na ledových částicích v těchto stratosférických mracích pak dochází k chemickým procesům, v jejichž důsledku se do stratosféry uvolňují molekuly chlóru, které pak UV fotony slunečního záření disociují

1. Tým skupiny Dynamiky molekul a klastrů v ÚFCH JH, AV ČR, okolo experimentálního zařízení pro výzkum klastrů a nanočástic v molekulových paprscích CLUB, který se podílel na výzkumu velikostí ledových nanočástic. Na snímku v horní řadě zleva: Viktoriya Poterya, Andriy Pysanenko, Michal Fárník; v dolní řadě zleva: Jozef Lengyel, Jaroslav Kočíšek, Pavla Svrčková. Snímek © ???.



Mgr. Michal Fárník, Ph.D., DSc., vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy v Praze. Doktorskou práci vypracoval v Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského, v. v. i., AVČR v laboratoři Prof. Zdeňka Hermana. Po obhajobě doktorátu odešel pracovat do Institutu Maxe-Plancka v Německém Göttingenu, kde pobýval v letech 1995–1998. V letech 1998–2001 pracoval v JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics), Boulder, Colorado, USA. Poté se vrátil do Göttingenu, kde pracoval do r. 2004. V r. 2005 dostává návratové stipendium AVČR „Purkyně Fellowship“ a přichází zpět do ÚFCH JH v Praze, kam přiváží z Göttingenu experimentální zařízení pro výzkum klastrů v molekulových paprscích a zakládá novou laboratoř. Z této laboratoře se vyvinula skupina Dynamiky molekul a klastrů, kterou v současnosti v ÚFCHJH vede. Zde se zabývá se experimenty s molekulovými paprsky, klastry a nanočásticemi, zejména jejich fotochemií a dynamikou.



2. Zjednodušené schéma procesů vedoucích k ničení ozonu ve stratosféře s důrazem na heterogenní reakce a fotochemii probíhající na ledových částicích v polárních stratosférických mracích.

(rozbíjejí) na Cl atomy a řetězec ničení ozonu začíná. Dlužno podotknout, že toto je velice zjednodušený nástin těch desítek chemických procesů, ke kterým ve stratosféře dochází a které vedou k ničení ozonu.

### Co jsme zkoumali v naší laboratoři a jak to souvisí s mechanismem ničení ozonu?

V našem experimentu můžeme vytvářet shluky molekul, klastry, pozůstávající z několika set molekul vody (tzv. ledové nanočástice, protože tyto klastry mají rozměry řádu nanometrů), které letí v molekulovém paprsku volně ve vakuu, a s nimi pak můžeme provádět nejrůznější experimenty. V jednom z nich jsme nechali srážet klastry s molekulami různých plynů a měřili jejich rychlost po srážkách. Ta se mění tím, jak na sebe klastry nabalují další a další molekuly plynu. Z měření rychlosti klastrů jsme schopni určit, jak „velké“ je vidí okolní molekuly. Jinými slovy: z jak velké části okolního prostoru jsou tyto klastry schopny „pochytat“ molekuly plynu.

Jak bylo řečeno výše, pro vznik ozonové díry jsou zapotřebí ledové částice, které v počátečním stádiu vznikají a rostou tak, že se molekuly vody (a další stratosférické molekuly) spojují a vytvářejí malé klastry, na které se pak „nabalují“ další molekuly. A obdobné procesy vedou nejen ke vzniku stratosférických mraků, ale i k nukleaci běžných mraků v troposféře apod. Vědci studují tyto procesy různými matematickými modely, v nichž používají jako parametry velikosti klastrů, aby simulovali proces růstu klastrů záchytem dalších molekul.

Naše měření ukázala, že z pohledu molekul jsou klastry mnohem větší, než odpovídá jejich geometrické velikosti – prostě jsou ke klastru přitahovány z mnohem větších vzdáleností. Pro fyziky a chemiky to není zas

tak překvapivé, neboť mnohé molekuly mají obecně dipólové momenty, nebo se dají polarizovat, a tudíž mezi nimi a klastry, které také vykazují dipólové momenty, mohou existovat přitažlivé síly. Jenže tyto faktory se v atmosférických modelech zanedbávají vůči značné geometrické velikosti klastrů. Naše měření i teoretické simulace ale ukázaly, že tyto efekty mohou být obrovské, a mohli by měnit např. rychlost nukleace až řádově.

Bylo by jistě zajímavé zjistit, jak bude vypadat např. simulace růstu polárních stratosférických mraků (a potažmo předpovědi vývoje ozonové díry) či rychlost tvorby troposférických mraků apod. při započtení námi zjištěných velikostí klastrů. Ale tyto výpočty musíme přenechat vědcům, kteří se těmito simulacemi zabývají. Naš výzkum se soustřeďuje na jednotlivé molekuly a jejich soubory – klastry. Ovšem myslím, že se můžeme domnívat, že naše zjištění jsou důležitým výsledkem základního výzkumu, který může mít praktické důsledky.

Ještě je možno poznamenat, že elementárními procesy souvisejícími s chemií atmosféry se v naší laboratoři zabýváme již od jejího založení v Praze v r. 2005. Jednou z prvních prací, kterou jsme po jejím založení uveřejnili, byla věnována studiu laserem vzbuzené fotodisociace molekul halogenvodíků na ledových nanočásticích. Opět se jedná o proces relevantní pro vznik ozonové díry, neboť obdobné částice se vyskytují v polárních stratosférických mracích a k fotodisociaci adsorbovaných halogenvodíků dochází slunečním UV zářením. Je to jeden z mnoha elementárních procesů, k nimž ve stratosféře dochází, který ale v naší laboratoři můžeme sledovat na detailní molekulové úrovni a naše poznatky pak mohou být nějakým způsobem zařazeny do komplexních atmosférických

\* Juraj Fedor, studoval na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Komenského v Bratislavě, v r. 2006 získal doktorát na Leopold Franzens Universität v Innsbrucku a v letech 2006-2009 působil na univerzitě ve Fribourgu ve Švýcarsku. V r. 2009 získal Marie-Curie Fellowship, v rámci kterého strávil 2 roky v naší pražské laboratoři. Od r. 2011 je zpět ve Fribourgu, kde buduje vlastní skupinu v rámci stipendia SNF (Swiss National Foundation).

#### **Poděkování:**

*Práce, o kterých v tomto článku hovoříme, vznikly za podpory Grantové agentury České republiky projekty č. 203-09-0422 a P208-11-0161. Pobyt Juraje Fedora v naší laboratoři umožnilo evropské stipendium v rámci MC-IEF projekt č. 235414.*

modelů a přispět k lepšímu pochopení např. celkové složité chemie ničení ozonové vrstvy.

#### **Jak to všechno začalo?**

Vraťme se ale ještě krátce k výše uvedeným výsledkům, které vzbudily nedávný ohlas. Zajímavá a velice poučná je geneze jejich vzniku. Náš příběh vlastně začal nefungujícími lasery. Jak jsem zmínil, soustřeďujeme se v naší laboratoři zejména na studium fotochemie v klastrech, tedy procesů, ke kterým dochází po ozáření molekul lasery. Co ale dělat, když lasery nefungují a jejich oprava si vyžádá delší čas? Možná, že v jiných oblastech si lidé v takových chvílích berou dovolenou, vědci se ale většinou snaží vymyslet, jak se „zabavit jinak“. A v tuto chvíli vstupuje na scénu *deus ex machina* v podobě kolegy\*, který navrhne experiment bez použití laserů.

Velice důležitým parametrem v experimentech s klastry v molekulových paprscích je určit jejich velikost, tj. „spočítat“ molekuly, z nichž se klastr skládá. V literatuře lze najít různé metody, jak velikost klastru přibližně experimentálně určit. Dvě z nich, které se zakládají na srážkách klastru s molekulami plynu, předpokládají určitý vztah mezi počtem molekul v klastru a jeho fyzickou velikostí, kterou zaujímá v prostoru, čili jeho průřezem. Většinou se uvažuje tzv. geometrický průřez, který používají i výše zmíněné atmosférické modely. Prostá a geniální myšlenka našeho kolegy byla obě metody spojit a tím získat přímo z měření počet molekul i jeho průřez, aniž bychom *a priori* museli předpokládat něco o jejich vzájemném vztahu.

To ale ještě nebyl *happy-end* naší historky. Po téměř ročním měření se ukázalo, že obě metody nedávají konsistentní výsledky a jednu jsme museli zavrhnout. I to byl důležitý výsledek pro vědeckou komunitu, o kterém jsme napsali článek, ale přemýšleli jsme dále, jak nabyté znalosti použít. Tu „správnou“ metodu založenou na měření rychlosti klastrů lze použít k určení jejich průřezu pro záchyt molekul z okolního prostoru. Pro vodní klastry jsme tudíž mohli změřit jejich průřez pro záchyt různých molekul. A ten se ukázal být mnohem větší než by odpovídalo čistě geometrickému průřezu! Čili můžeme shrnout to, co jsme opravdu „objevili“: že molekuly „vidí“ klastry mnohem větší než odpovídá geometrickému průřezu klastrů. A to se může podstatným způsobem projevit v atmosférických modelech, třeba v těch, které se zabývají ozonovou dírou.

A na závěr několikráté poučení, které z naší historky plyne:

I ve vědě občas platí otřepané „všechno zlé je k něčemu dobré“. Kdybychom neměli problémy s lasery, asi bychom se nikdy nepustili do měření velikostí klastrů.

Jednoduchý experiment, který měl trvat maximálně dva týdny, se mnohdy protáhne na více než rok a přinese zcela neočekávané výsledky.

I na první pohled negativní výsledek může vést k zajímavým objevům, když člověk dostatečně vytrvale sleduje svůj cíl.

Není nad to být obklopen schopnými lidmi s dobrými nápady, což je štěstí, které v naší laboratoři máme. 