

Blíž k absolutní nule

Zimní měsíce jsou v našich šířkách chladnější. V roce 2019 měl nejchladnější měsíc leden průměrnou teplotu o 11,3 °C nižší, než byl celoroční průměr¹, tedy právě zhruba o tolik jsme v každé zimě blíží k absolutní nule. Musíme být rádi, že je to jen takový nepatrný krůček, zvláště ve srovnání s rekordními meteorologickými údaji z nejchladnějších míst planety, jako například z vesnice Oymyakon na Sibiři (v roce 1933 naměřeno –71,2 °C) nebo z ruské polární stanice Vostok v Antarktidě (–89,2 °C v roce 1983). Tato měření mají k hodnotě absolutní nuly –273,15 °C stále hodně daleko. I novému teplotnímu rekordu –93,2 °C, naměřenému 10. srpna 2010 v ledovcových kapsách Východoantarktické plošiny², chybí ještě téměř 180 kelvinů. Teploty výrazně se blížíci absolutní nule musíme hledat ve vesmíru. V naší Sluneční soustavě byla naměřena nejnižší teplota na povrchu Neptunova měsíce Tritonu –235 °C, tedy 38 K (cit.³). Až hlubokému vesmírnému prostoru se díky reliktnímu záření přisuzuje teplota přibližně 3 K (cit.⁴).

Podle třetího termodynamického zákona nelze nikdy zcela dosáhnout absolutní nuly, ale lze se k této hodnotě limitně přiblížit. V tomto přiblížení byl v posledním desetiletí učiněn výrazný pokrok, o čemž informují i populární články, ve kterých se píše o teplotách v nanokelvinech. Podle konkrétních údajů zatím nikdy nešlo o teplotu v řádu 10⁻⁹ K, dosažené hodnoty byly na úrovni stovek, mimořádně desítek nanokelvinů. Na takto nízkou teplotu nelze zchladit žádný reálný objekt, maximálně shluky atomů nebo molekul, které jsou umístěny v komorách s velmi nízkým tlakem, fungujících jako magnetooptické nebo elektrostatické optické pastě. Na částice v těchto pastech se působí elektrickými, magnetickými a laserovými pulsy. Pro dosažení teploty blížíci se absolutní nule je tak potřebné velmi náročné instrumentální zařízení, kterými je vybaveno jen několik laboratoří ve světě.

Naše veřejnost se o studiu chování atomů a molekul za velmi nízkých teplot dozvěděla více díky mladé české vědkyni Ing. Lucii Augustovičové, Ph.D. Ta působí na Katedře chemické fyziky a optiky Matematicko-fyzikální fakulty UK a měla příležitost spolupracovat s několika špičkovými pracovišti ve světě. Za publikaci „Ultracold Collisions of Polyatomic Molecules: CaOH“ (cit.⁵), vypracovanou v USA na univerzitě v Boulderu, získala Výroční cenu 2019 Nadačního fondu Bernarda Bolzana v oboru fyzika. V roce 2020 se stala jednou ze tří oceněných ve 14. ročníku soutěže L'Oréal UNESCO Pro ženy ve vědě. Po těchto oceněních poskytla tato vědkyně řadě médií několik rozhovorů^{6,7}, ve kterých populárně vysvětlovala, jak lze dosáhnout ultranízkých teplot, co může přinést studium chování látek za těchto extrémních teplotních podmínek z teoretického i praktického hlediska a v čem spočívá její konkrétní přínos k výzkumu v této oblasti.

Lucie Augustovičová objevila⁸ na základě složitých výpočtů nízkoenergetických srážek polárních molekul efekty, pomocí nichž je možné ochladit molekuly až na miliardtinu teplotního stupně nad absolutní nulou. Postup, kterému se v literatuře říká „evaporativní chlazení“, je založen na postupném odčerpávání „teplejších“ částic z daného souboru atomů nebo molekul. Tato metoda je účinná pro atomy, u molekul ztrácí pod určitou mezí efektivitu. U molekul jsou totiž problémem nepružné srážky, při kterých dochází ke změně kvantového stavu srážejících se molekul. Výpočty Lucie Augustovičové ukázaly, že pro některé molekuly je při použití elektrického nebo magnetického pole o správné intenzitě možné tyto „špatné“ nepružné srážky omezit, a tím prodloužit efektivitu chlazení molekul do nanokelvinových teplot. Její metodu chtějí v praxi ověřit na Harvard University.

Schopnost ochladit molekuly na extrémně nízké teploty otvírá cestu k dosud nepozorovaným exotickým stavům hmoty, jako je například molekulární Boseho-Einsteinův kondenzát, Fermiho degenerovaný plyn nebo tzv. supersolidicita. Rovněž je možné studovat efekty, které budou v budoucnu využitelné při návrhu kvantových počítačů. Ve fyzice ultranízkých teplot nelze ovšem vyloučit ani další nečekané objevy.

Z chemického pohledu přináší práce při teplotě blízké absolutní nule zajímavou možnost sledování celého průběhu chemické reakce, ne tedy pouze stanovení počátečního stavu a výsledku proběhlé reakce. Její časový průběh se za extrémního chladu zpomalí na mikrosekundy, což je sice stále velmi krátký časový úsek, ale už dostatečně dlouhý na to, aby jej mohli vědci analyzovat (v populárním vyjádření „vidět chemickou reakci v přímém přenosu“). Při sledování takto zpomaleného děje je možné pozorovat, že reagující molekuly se nemusí dotýkat, stačí přiblížení na vzdálenost, při které se uplatní mezimolekulární interakce (populárně řečeno „stačí, když na sebe molekuly vidí“). Tyto velice atraktivní možnosti se opírají o již provedené experimenty, které jsou ale zatím ojedinělé. Doposud nejchladnější chemická reakce, jejíž průběh bylo možno zdokumentovat, byla provedena při teplotě 500 nanokelvinů. Kolektiv vědců na Harvardově univerzitě v USA použil takto podchlazený plyn molekulární sloučeniny draslíku a rubidia KRb. Při setkání dvou těchto molekul bylo možno sledovat, jak přechodně vzniká čtyřatomová molekula K₂Rb₂, která se následně rozpadá na molekuly dvou druhů K₂ a Rb₂. Výsledky byly publikovány v roce 2019 v prestižním časopise Science^{9,10}.

Na předponu „nano“ si už široká veřejnost zvykla, i když ji často nebere přesně jako jednu miliardtinu, ale dobře ji chápe jako něco zcela nepatrného. Proto udání teploty v nanokelvinech velmi dobře ilustruje výrazné přiblížení se hodnotě absolutní nuly. Jinak u teplotních

údajů je použití jakékoliv násobící předpony výjimkou a doufám, že to tak i zůstane, alespoň v běžném životě. V meteorologických zprávách jsme si už zvykli na údaj atmosférického tlaku v hektopascalech, ale předpověď, že odpolední teplota může přesáhnout 3 hektokelviny, by místo představy příjemně teplého dne mohla vyvolat údiv až paniku.

Petr Holý

LITERATURA

1. <https://magazin.gnosis.cz/rok-2019-byl-v-cr-druhy-nejteplejsi-od-zacatku-mereni/>, staženo 4. 11. 2020.
2. https://www.tyden.cz/rubriky/veda/planeta-zeme/nejchladnejsi-misto-sveta-ma-jiz-rok-minus-93-2-stupne-celsia_326587.html, staženo 4. 11. 2020.
3. <https://www.stoplusjednicka.cz/jake-je-nejstudenejsi-misto-slunecni-soustavy>, staženo 4. 11. 2020.
4. https://cs.wikipedia.org/wiki/Kosmick%C3%BD_prostor, staženo 4. 11. 2020.
5. Augustovičová L. D., Bohn J.: *New J. Phys.* 21, 103022 (2019).
6. <https://vedavyzkum.cz/rozhovory/rozhovory/lucie-augustovicova-novy-pristup-jak-ochladit-molekuly-otvira-cestu-k-dalsim-objevum>, staženo 11. 11. 2020.
7. <https://www.novinky.cz/veda-skoly/clanek/chci-zjistit-jak-ochladit-latku-miliardkrat-vice-nez-v-mezihvezdnem-prostoru-rika-lucie-augustovicova-40337510>, staženo 11. 11. 2020.
8. <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/ceska-vymyslela-jak-ochladit-molekuly-na-harvardu-diky-ni-zkusi-nemozne-118243>, staženo 11. 11. 2020.
9. <https://www.osel.cz/10911-nejchladnejsi-chemicka-reakce-vsech-dob-predvedla-ultrapomale-pohyby-molekul.html>, staženo 11. 11. 2020.
10. Hu M.-G., Liu Y., Grimes D. D., Lin Y.-W., Gheorghie A. H., Vexiau R., Bouloufa-Maafa N., Dulieu O., Rosenband T., Ni K.-K.: *Science* 366, 1111 (2019).