

Spinové vlny jako klíč k vyřešení energetické náročnosti AI. Na CEITEC VUT zjednodušili jejich měření

23.1.2025 - | Vysoké učení technické v Brně

Rostoucí vliv umělé inteligence s sebou nese obrovské energetické nároky, které zase přinášejí rozsáhlé klimatické výzvy. Řešení se nabízí v přenosu informací pomocí krátkých spinových vln v magnetických materiálech. Doposud však bylo těžké tyto vlny měřit, šlo to jen na velkých synchrotronech. Ondřej Wojewoda z CEITEC VUT ve své dizertační práci přináší revoluční řešení: pomocí Mieho rezonancí v dielektrických materiálech vyvinul metodu, která umožňuje efektivní měření krátkých spinových vln běžnou laboratorní technikou.

Ondřejův objev přináší **zásadní posun v dostupnosti výzkumu krátkovlnných spinových vln**, které mají potenciál stát se klíčovou platformou pro energeticky efektivní přenos a zpracování dat s využitím právě v oblasti AI, ale také v medicíně a mechano-biologii. Umělá inteligence (AI) v posledních letech zažívá mimořádný rozmach a její potenciál zásadně měnit a zefektivňovat lidské činnosti je nepopíratelný. Přelomovým příkladem tohoto vývoje je vznik velkých jazykových modelů (LLM) jako ChatGPT nebo Gemini. S jejich vzestupem však vyvstává zásadní problém: **enormní energetická náročnost**, která představuje významnou překážku při plnění globálních klimatických cílů, především z hlediska spotřeby elektrické energie a vody – problémem je totiž zahřívání a s tím spojené chlazení infrastruktury, na které je potřeba **až litr vody na pouhých několik promptů** (příkazů pro umělou inteligenci, pozn. red.).

Jednou z perspektivních cest ke snížení energetické náročnosti AI, zejména LLM, je přechod od klasické von Neumannovy architektury počítačů, v níž dochází k výpočtům v procesoru, ale data jsou uložena v paměti. **Nové technologie namísto toho využívají vlnové systémy** a nejslibněji se jeví **spinové vlny**. Spinová vlna je vlnění, které se šíří v **magnetickém materiálu**, spinové vlny nemohou na rozdíl od vln elektromagnetických, mezi které spadá třeba i světlo, existovat ve vakuu. Z hodin fyziky na základní škole si možná vybavíme pojem dualita částice a vlnění, kdy elektromagnetické vlny, tedy právě třeba světlo, lze popsat jako vlnu, ale i jako částici zvanou foton. Tato dualita platí i u spinových vln, pro které by možná byl příhodnější název magnetické vlny, jelikož magnetizace je tvořena jak spinem, tak i orbitálním momentem elektronu. Spinové vlně můžeme přiřadit kvantovou částici zvanou **magnon**.

Spinové vlny se pro snížení energetické náročnosti AI jeví jako slibný kandidát – umožňují snadnou integraci do stávajících technologií a poskytují přirozenou nelinearitu, klíčovou pro správné fungování AI (v současných implementacích tuto funkci zajišťují aktivační funkce). Proč jsou spinové vlny energeticky méně náročné než vlny elektromagnetické? **Ondřej Wojewoda** používá pro laiky toto přibližné vysvětlení: „Když se pohybuje elektron, tak je vždy vytvořeno takzvané Joulovo teplo, které souvisí se změnou jeho potenciální energie. Tedy pokud posuneme elektron z vyššího potenciálu na nižší, musí uvolnit teplo, které odpovídá změně jeho energie. Jinými slovy, když elektrina prochází drátem, tento drát se zahřeje, což má fundamentální fyzikální důvod. Magnony však, na rozdíl od elektronů, nenesou žádný náboj, a proto při svém pohybu teplo neprodukují. Spinové materiály navíc nemohou existovat v nemagnetických materiálech, takže nemohou z vlnovodu jednoduše utíkat,“ říká Ondřej Wojewoda.

Hlavní výzvou pro implementaci spinových vln do funkčních čipů je však jejich miniaturizace. Krátké spinové vlny s délkami pod 400 nm lze aktuálně měřit pouze pomocí synchrotronů, což je nákladné, časově náročné, a tudíž zpomaluje další vývoj v této oblasti.

Autor: Archiv CEITEC VUT

Pod vedením Michala Urbánka, vedoucího výzkumné infrastruktury CEITEC Nano, se tomuto problému věnoval v rámci svého doktorátu Ondřej Wojewoda s kolegy. Ve své dizertační práci Ondřej vyvinul novou metodologii, která tento problém řeší využitím tzv. Mieho rezonancí v dielektrických materiálech a umožňuje tyto krátké spinové vlny měřit za pomoci standardního laboratorního vybavení zvaného Brillouinova spektroskopie světla (BLS). Ondřej Wojewoda vysvětluje, co je Mieho rezonance: „Mieho rezonance je vytvoření stojaté vlny v dielektrickém rezonátoru. V našem případě je tedy viditelné světlo chyceno například v disku, který má rozměry násobků vlnové délky světla v daném materiálu. Toto pak vede k subdifrakční koncentraci intenzity světla, která nám dovolí měřit právě krátkovlnné spinové vlny.“

Tato technika otevírá cestu nejen k dalšímu rozvoji spinových vln jako energeticky efektivní technologii pro AI, ale nachází uplatnění i v dalších oblastech. Díky teoretickému popisu a praktické implementaci Mieho rezonancí má tato technika také potenciál významně přispět k pokroku v medicínských a mechano-biologických aplikacích, kde BLS v současnosti zažívá ohromný rozkvet, například v oblasti včasné diagnostiky očních vad.

„Spinové vlny (magnony) mají potenciál být použity jako nová platforma pro přenos a zpracování dat, protože mohou dosáhnout vlnových délek v rozsahu nanometrů a frekvencí od stovek megahertz až po jednotky terahertz. Doteď bylo ovšem možné zobrazovat spinové vlny s vlnovými délkami pod difrakčním limitem světla pouze pomocí rentgenové mikroskopie s použitím velkých urychlovačů částic,“ vysvětluje Ondřej kontext svojí práce. V Evropě jsou například synchrotronové urychlovače schopné měřit spinové vlny jen na dvou místech – Berlíně a Zürichu. Toto omezení razantně zpomaluje a zdražuje výzkum a vývoj zařízení založených na spinových vlnách. Během svého doktorského studia proto Ondřej hledal možnosti, jak tento problém překonat.

„Využitím Mieho rezonancí v dielektrických strukturách můžeme měřit spinové vlny se srovnatelnými vlnovými délkami pomocí standardní optické sestavy určené pro měření mikroskopie Brillouinova rozptylu světla,“ uvádí Ondřej. Celý proces studoval na silikonových rezonátorech umístěných na vrstvě nikl-železa. Tato technika může být upravena pro získání rozlišení pro vlnové délky krátké až 50 nm v rovině vzorku pomocí pole silikonových proužků se subdifrakční periodou. V poslední části své práce se Ondřej věnoval měření koherentně vybudzených spinových vln, kde demonstroval fázové rozlišení změřením disperzní relace spinových vln.

Jak vlastně Ondřejův výzkum probíhal? Využití plazmonických rezonancí i v Brillouinově rozptylu bylo pro Ondřeje při volbě tématu na doktorát přirozeným krokem, protože Brillouinův rozptyl je podobný rozptylu Ramanově a v Ramanově rozptylu se plazmonické rezonance často využívají zesílení signálu.

Jelikož však byl Ondřej a jeho spolupracovníci nováčky v oblasti Brillouinova rozptylu, nebyli si vědomi, že podobný přístup **jž dříve zkoušelo několik týmů**, ale bez úspěchu. Při svém prvním pokusu však tým získal výborné výsledky, které bohužel nedokázali opakovat. „Díky pokročilým možnostem nanocharakterizace, které jsou dostupné v CEITEC Nano, jsme zjistili, že na vzorcích nejsou kovové částice, jak jsme původně plánovali, ale místo toho křemíkový „bordel“, který nám na vzorky neúmyslně napadal,“ vysvětluje Ondřej.

Tento objev Ondřeje dovedl k **vytvoření křemíkových rezonátorů**, se kterými se jemu a jeho kolegům jako prvním podařilo nejen zesílit signál, ale také rozšířit detekční schopnosti Brillouinova rozptylu na velmi malé vlnové délky pod 50 nm. Prezentované výsledky mají potenciál zásadně **změnit paradigma výzkumu v oblasti fyziky pevných látek a mechano-biologie**.

Ondřejova metoda je replikovatelná, podobných výsledků mohou nyní dosahovat týmy po celém světě – stačí jim k tomu jen nanofabriční laboratoř a optická sestava pro měření Brillouinova rozptylu světla. To je zásadní pokrok; jak jsme uvedli výše, dříve vědci byli schopni zobrazit spinové vlny na úrovni nanometrů pouze v synchrotronových urychlovačích, které jsou prostorově i finančně náročné. Díky využití BLS pro měření spinových vln se tak **magnonika stává mnohem kompetitivnější**.

Rektor VUT Ladislav Janíček s nominovanými studenty VUT na vyhlášení Cen Hlávkovy nadace.

Ondřej Wojewoda třetí zprava. | Autor: Richard Cai

Za vynikající studijní výsledky a mimořádný přínos v oblasti laserové spektroskopie obdržel Ondřej koncem loňského roku Cenu Hlávkovy nadace. Hlávkova nadace, nejstarší česká nadace založená 25. ledna 1904 architektem Josefem Hlávkou, podporuje vědu, literaturu, umění a nadané studenty na českých vysokých školách. Uděluje Cenu Josefa Hlávky nejlepším studentům, absolventům a mladým vědcům. Ceny Hlávkovy nadace 2024 spojené s finanční odměnou si na zámku v Lužanech u Přestic převzalo šest studentů Vysokého učení technického v Brně.

Ondřej Wojewoda nadále působí na CEITEC VUT. Díky grantu Postdoc Individual Fellowship od Grantové agentury ČR se nyní připravuje na dvouletou postdoktorskou stáž na prestižní americké univerzitě Massachusetts Institute of Technology (MIT), kde se bude věnovat výzkumu nereciprokých magnetických materiálů pro využití v mikrovlnných technologiích.

<https://www.zvut.cz/napady-objevy/-f38103/spinove-vlny-jako-klic-k-vyreseni-energeticke-narocnosti-ai-na-ceitec-vut-zjednodusili-jejich-mereni-d278350>