

Studium magnetických nanočástic feritů coby zobrazovacího média pro MPI

Vedoucí projektu: Lenka Kubíčková (kubickol@fzu.cz)

Pracoviště: [Laboratoř Mössbauerovy spektroskopie](#), KFNT, MFF UK
ve spolupráci s [Oddělením magnetik a supravodičů](#), FZU,
AV ČR

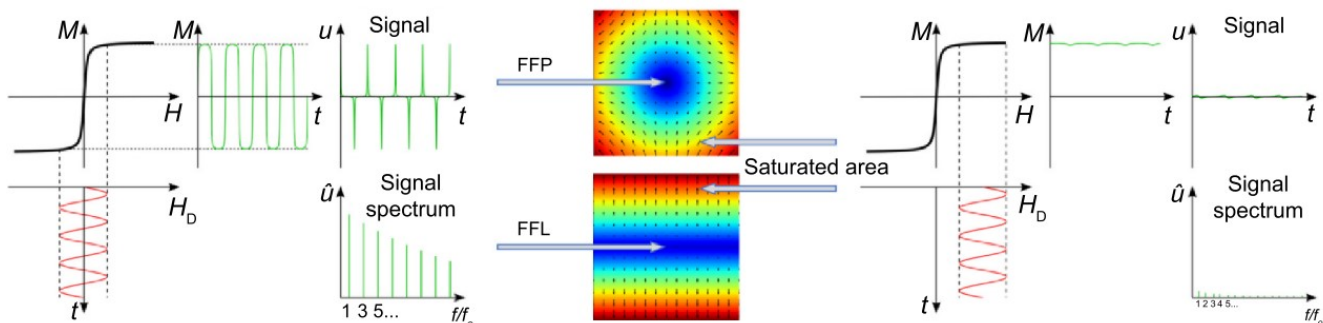
Klíčová slova: zobrazování pomocí magnetických částic, MPI, magnetické vlastnosti, Mössbauerova spektroskopie, spinelová struktura, ferity, Brownova relaxace, Néelova relaxace

Časová náročnost: předpokládáno 80 hodin



Obr. 1. MPI snímek myši inhalující aerosol magnetických nanočástic, doplněný o anatomickou informaci z CT. [1]

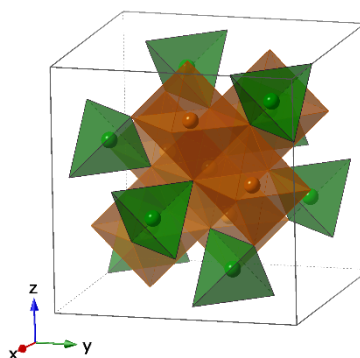
Zobrazování pomocí magnetických nanočástic (magnetic particle imaging, MPI) je novou a dynamicky se rozvíjející zobrazovací technikou cílící do medicíny. Tato metoda, která byla poprvé demonstrována v roce 2005, si magnetickými částicemi pouze nevypomáhá, tak jako se tomu děje v případě kontrastních látek pro zobrazování magnetickou rezonancí (MRI), nýbrž magnetické nanočástice využívá ke generování signálu, a tedy je přímo zobrazuje (obr. 1). Při tom využívá jejich chování ve střídavém magnetickém poli – v oblasti, kde je jinak statické magnetické pole nulové, se magnetizace částic ve střídavém poli mění výrazně a částice produkují detekovatelný signál, zatímco v oblastech s velkým vnějším statickým magnetickým polem se magnetizace částic už prakticky nemění a žádný signál nedetekujeme (obr. 2). Víme-li, kde je v daný okamžik statické pole nulové, víme, odkud detekovaný signál pochází. Odezvu suspenze na střídavé pole a také vhodnost nanočástic pro MPI lze studovat mimo jiné pomocí spektroskopie magnetických částic (MPS, též nula-dimenzionální MPI), při níž měříme signál suspenze bez prostorového rozlišení.



Obr. 2. Princip generování signálu v MPI – odezva suspenze nanočástic (zelené křivky) na střídavé magnetické pole (červená křivka), jak vyplývá z magnetizační křivky suspenze nanočástic (černá křivka). Vlevo v oblasti s nulovým polem (FFP/FLL – field-free point/line), vpravo v oblasti saturovaného momentu. [2]

Průběh magnetické odezvy suspenze nanočástic se odvíjí jednak od vlastností samotných nanočástic (velikost, magnetizace, magnetická anizotropie), použité kapaliny (viskozita) a chování částic v kapalině (agregace, frikční síly), jednak od vnějších vlivů (teplota, frekvence a amplituda střídavého pole). Důležitými faktory jsou *brownovská relaxace* související s otáčením celých částic a *Brownovým náhodným pohybem* částic v suspenzi a *néelovská relaxace*, která popisuje náhodnou změnu směru magnetického momentu nanočástic v tzv. *superparamagnetickém stavu*, při němž směr magnetického momentu nanočástice ztrácí v důsledku tepelné energie svou vazbu na orientaci její krystalové mřížky. Mezi nejčastěji využívané nanočástice v MPI patří nanočástice oxidů železa se spinelovou strukturou (maghemit – $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$,

magnetit – Fe_3O_4 , resp. jejich kombinace), jejich vlastnosti lze však dále optimalizovat vhodnými substitucemi. Ve spinelové struktuře (obr. 3) kationty železa obsazují dvě neekvivalentní krystalografické polohy – tetraedrickou (v nejbližším okolí mají čtyři atomy kyslíku ve vrcholech tetraedru) a oktaedrickou (v okolí šest atomů kyslíku ve vrcholech oktaedru, těch je dvakrát více). Magnetický moment atomů železa v oktaedrických polohách zároveň míří opačně než je tomu v tetraedrických polohách. Magnetické vlastnosti včetně néelovské relaxace nanočástic lze snadno ovlivnit částečnou substitucí (chemickým složením). V tomto projektu se budeme věnovat feritům se spinelovou strukturou, především CoFe_2O_4 , který vykazuje velkou magnetokrystalovou anizotropii potlačující néelovskou relaxaci, zároveň ale vykazuje poměrně velkou magnetostrikci (změna rozměrů při změně magnetického pole) a může tak tvořit základní kámen architektury tzv. *magnetoelektrických částic*. Dalším studovaným materiálem může být NiFe_2O_4 v superparamagnetickém stavu s mnohem větší néelovskou relaxací a tedy poskytující silnější signál v MPI.



Obr. 3. Spinelová struktura magnetitu – zeleně tetraedrické, hnědě oktaedrické polohy (atomy kyslíku v rozích polyedrů nejsou ukázány)

Cílem projektu je studium nanočástic feritů se spinelovou strukturou (CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4 , případně částečně substituované zinkem pro snížení magnetické anizotropie a zvýšení néelovské relaxace) z hlediska vlastností, které jsou zásadní pro MPI. Student se seznámí se základními metodami charakterizace nanočástic. Bude nás zajímat především velikost částic a tloušťka jejich obalové vrstvy z biokompatibilního materiálu, které zjistíme analýzou snímků z transmisní elektronové mikroskopie (TEM), krystalová struktura a fázová čistota, které zjistíme z práškové rentgenové difrakce (XRD), a magnetické vlastnosti, jež změříme pomocí magnetometru na principu SQUID (superconducting quantum interference device). Metodu ^{57}Fe Mössbauerovy spektroskopie využijeme k nahlédnutí do nejbližšího okolí atomů železa v nanočásticích a také určení obsazenosti jednotlivých poloh ve spinelové struktuře různými kationty – v nanočásticích zpravidla nejsou kationty rozmístěny tak, jak by tomu bylo v rovnovážném stavu daného materiálu, atomy železa jsou distribuovány v různých poměrech mezi tetraedrickou a oktaedrickou polohou v závislosti na podmínkách během syntézy. Odezvu suspenze nanočástic na střídavé magnetické pole pak vyzkoušíme na našem „domácím“ MPS spektrometru a můžeme také vyzkoušet změnu odezvy v závislosti na viskozitě použité nosné kapaliny. V rámci projektu můžeme zařadit exkurzi na spolupracující pracoviště 1. lékařské fakulty, které má přístroj MPI ve výbavě, a případně na něm změřit studované suspenze nanočástic.

V případě zájmu studenta lze na výsledky tohoto projektu snadno navázat v bakalářské nebo diplomové práci.

Zdroje obrázků:

- [4] Z. Wei Tay, P. Chandrasekharan, X. Yedda Zhou, E. Yu, B. Zheng, S. Conolly, In vivo tracking and quantification of inhaled aerosol using magnetic particle imaging towards inhaled therapeutic monitoring, *Theranostics*. 8 (2018) 3676–3687. doi:10.7150/thno.26608.
- [5] N. Panagiotopoulos, F. Vogt, J. Barkhausen, T.M. Buzug, R.L. Duschka, K. Lüdtke-Buzug, M. Ahlborg, G. Bringout, C. Debbeler, M. Gräser, C. Kaethner, J. Stelzner, H. Medimagh, J. Haegele, Magnetic particle imaging: current developments and future directions, *Int. J. Nanomedicine*. 10 (2015) 3097–3114. doi:10.2147/IJN.S70488.