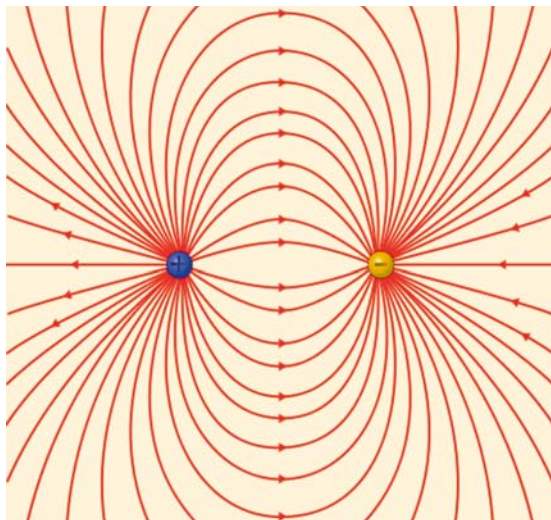


# Pomohou multiferoika vylepšit standardní model částic?

Stanislav Kamba

Oddělení dielektrik, Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Na Slovance 2, 182 21 Praha 8 (kamba@fzu.cz)

Podle dnešních představ se veškerá známá hmota ve vesmíru skládá ze šesti druhů kvarků a šesti druhů leptonů. Všechny jevy, které ve vesmíru pozorujeme, se dají vysvětlit pomocí čtyř druhů interakcí: silné, slabé, elektromagnetické a gravitační. V 60. letech minulého století zformulovali S. Glashow, S. Weinberg a A. Salam jednotnou teorii elektromagnetických a slabých interakcí a tato teorie elektroslabé interakce tvoří společně s teorií silné interakce tzv. standardní model. V rámci standardního modelu je, kromě jiného, možné vysvětlit i původ spontánního narušení symetrie. O co se jedná? Do poloviny 50. let minulého století panovalo přesvědčení, že fundamentální fyzikální zákony respektují symetrie P (prostorová inverze nebo stručně parita), T (obrácení času) a C (záměna částice za antičástici neboli nábojové sdružení). Koncem 50. let bylo pozorováno narušení parity P, v r. 1964 bylo odhaleno i narušení CP symetrie při rozpadech elektricky neutrálních K-mezonů (kaonů). Nicméně stále platí CPT teorém, dokázaný už v první polovině 50. let, podle něhož má každý model relativistické kvantové teorie pole složenou CPT symetrii. Za vytvoření teorie elektroslabé interakce, pozorování narušení P a CP symetrie, jakož i za jejich teoretické vysvětlení byla udělena řada Nobelových cen, poslední v r. 2008. Podrobnosti může nalézt čtenář v přehledovém článku J. Hořejšího [1].

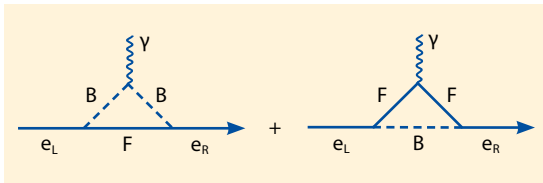


Obr. 1 Schematické znázornění pole elektrického dipólu s vyznačenými siločarami.

Nicméně v poslední době se zdá, že narušení CP symetrie je daleko větší, než předpovídá standardní model. Svědčí o tom řada experimentů, z nichž poslední byl publikován v srpnu 2010. Při tomto experimentu, který se uskutečnil ve Fermiho národní urychlovačové laboratoři v USA, nechali fyzici srážet protony s anti-protony. Při těchto srážkách občas vznikaly páry  $B^0$  mezonů a  $\bar{B}^0$  antimezonů. Tyto nestabilní částice mohou oscilovat a přeměňovat se ve své antičástice (tj.  $B^0$  na  $\bar{B}^0$  a opačně). Vznikaly tak páry  $B^0$  mezonů a páry  $\bar{B}^0$  anti-mezonů. Jejich rozpadem vznikaly páry mionů  $\mu^+$  a  $\mu^-$ . Při zachování CP symetrie by mělo vzniknout stejné množství párů mionů  $\mu^+$  a  $\mu^-$ . Standardní model zahrnující narušení CP symetrie předpovídá 0,02% přebytek párů  $\mu^-$  mionů, fyzici však naměřili téměř 1% přebytek párů  $\mu^-$  mionů nad páry  $\mu^+$  mionů [2, 3]. Takovýto výrazný nesouhlas experimentu se standardním modelem svědčí o tom, že tato teorie potřebuje nutně vylepšit.

Teorii, které rozšiřují standardní model a přitom zahrnují výrazné narušení spontánní symetrie, je už celá řada, zatím ale chybí experiment, který by rozhodl o tom, která z nich je správná. Ze všech těchto teorií (včetně standardního modelu) kromě jiného vyplývá, že částice jako elektron, neutron, proton či dokonce celá atomová jádra by měly mít stálý elektrický dipólový moment. Jak je to možné? Elektrický dipól vzniká, když vedle sebe umístíme kladně a záporně nabitou částici. Ty spolu interagují a vzniká elektrické pole znázorněné na obrázku 1. Jak by ale mohl mít proton či neutron dipólový moment, když tyto částice mají jen kladný, respektive vůbec žádný elektrický náboj? Naivní představa může být následující: Proton (neutron) je tvořen uud (udd) kvarky – u kvark má náboj  $2e/3$ , d kvark naopak  $-e/3$  ( $e$  značí náboj elektronu a ten má velikost  $1,6 \cdot 10^{-19}$  coulombu). Díky elektrickému náboji kvarku tedy vzniká elektrický dipólový moment částic, jako jsou proton či neutron (obecně baryonů).

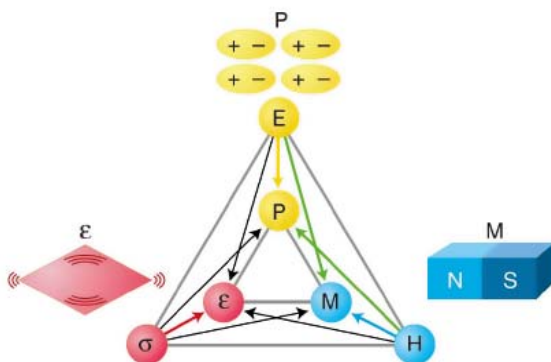
U elektronu je situace poněkud složitější. Jeho záporný elektrický náboj není způsoben žádnými kvarky, proto se zdá, že by neměl mít žádný dipólový moment. Nicméně elektron není statická částice, v čase různě fluktuuje vlivem interakcí s jinými částicemi (fermiony i bosony), proto má narušenou CP symetrii, a tudíž může mít malý dipólový moment. Vznik elektrického dipólového momentu elektronu je schematicky znázorněn na obr. 2. Velikost dipólového momentu elektronu



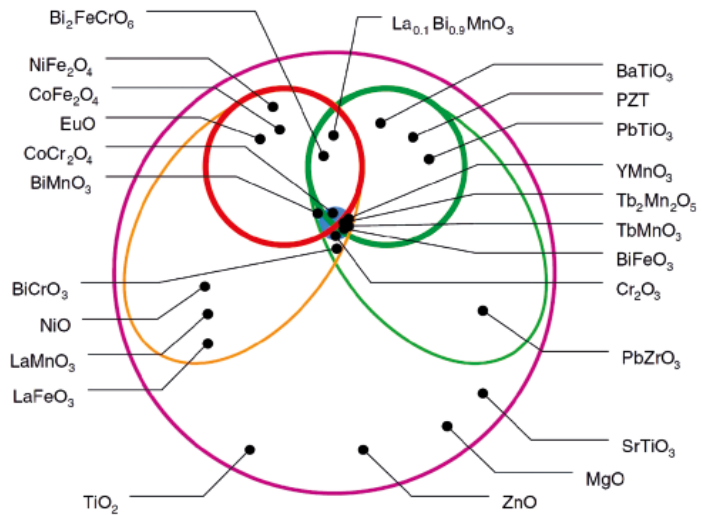
**Obr. 2** Obecný jednosmyčkový diagram, který může generovat nenulový elektrický dipólový moment elektronu. F značí fermion, B boson se spinem 0 nebo 1 a  $\gamma$  je foton. Příklady různých modelů: **1) supersymetrický model** – F je skalární elektron (skalární elektronové neutrino), B je neutralino (chargino); **2) levo-pravý symetrický model** – F je elektronové neutrino, B je nabitý slabě vektorový boson; **3) Higgsův model** – F je elektron a B je Higgsův boson. (Podle [5])

je, pokud existuje, velmi malá a bohužel zatím nezměřená. Jeho teoretická hodnota se však značně liší v jednotlivých teoriích. Zatímco standardní model předpovídá velikost dipólového momentu  $10^{-40}$  e.cm, tak např. supersymetrický model předpovídá hodnotu již  $10^{-28}$  e.cm. I tato hodnota je však pod prahem citlivosti dnešních experimentálních aparatur, která je však už blízko a činí  $10^{-27}$  e.cm [4]. Je třeba přiznat, že tato citlivost je výsledkem extrémního snažení fyziků během posledních čtyřiceti let [5, 6]. Motivace je jasná – změření velikosti dipólového momentu by pomohlo určit, která z částicových teorií rozvíjejících standardní model je správná.

V tomto roce jsme, společně s našimi americkými a německými kolegy, navrhli nový princip měření elektrického dipólového momentu elektronu s použitím fyzikálních vlastností multiferoického  $\text{Eu}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{TiO}_3$  [7]. Co jsou to multiferoika? Jsou to materiály, které vykazují zároveň minimálně dvě z feroických vlastností, jako jsou spontánní elektrická polarizace  $P$ , spontánní magnetizace  $M$ , spontánní deformace  $\sigma$  či ferotoroidní moment  $T$  [8]. Na obr. 3 je znázorněno, jak může elektrické pole  $E$  ovlivňovat nejen polarizaci  $P$ , ale i magnetizaci  $M$  či spontánní deformaci  $\epsilon$  v multiferoikách (v obr. je vynechané ferotoroidikum, ale ferotoroidní moment  $T$  může být v principu také řízený elektrickým polem). Vazby mezi magnetickými a feroelektrickými vlastnostmi v multiferoikách, které by byly zároveň feroelektrické i (anti)feromagnetické, by bylo vhodné využít v nových stálých elektronických pamětech. V magnetických RAM (random access memories) pamětech MRAM se totiž musí k zápisu používat vysokých proudových hustot, které součástky přehřívají. To znemožňuje konstrukci MRAM s vysokou integrací. Pokud by šlo využít magnetoelektrické vazby v multiferoikách, bylo by možné snadno ovlivňovat magnetické domény vnějším elektrickým polem.



**Obr. 3** Schematické znázornění řízení feroických vlastností v multiferoikách. Elektrické pole  $E$ , magnetické pole  $H$  a mechanické napětí  $\sigma$  ovlivňují elektrickou polarizaci  $P$ , magnetizaci  $M$  a mechanickou deformaci  $\epsilon$ . (Podle [8])



**Obr. 4** Klasifikace nevodivých (dielektrických) oxidů. Největší kruh reprezentuje množinu všech elektricky nevodivých oxidů. Mezi ně patří elektricky polarizovatelné materiály (zelená elipsa) a magneticky polarizovatelné materiály (oranžová elipsa). Kroužky v každé elipse značí množinu feroelektrických (tmavě zelený kruh) a fero- či ferimagnetických materiálů (červený kruh). Multiferoickým materiálům odpovídá průnik elips. Malý modrý kruh označuje množinu materiálů s lineární magnetoelektrickou vazbou. (Podle [13])

Existence lineární magnetoelektrické vazby byla experimentálně prokázána už v r. 1960. Problém však je, že tato vazba je velmi slabá. Je dokázáno, že kvadrát velikosti magnetoelektrické vazby je vždy menší než součin magnetické permeability a dielektrické permitivity [9]. Protože tyto veličiny nabývají maximálních hodnot v okolí magnetických a feroelektrických přechodů, snaží se fyzici připravit multiferoické materiály s kritickými teplotami magnetických a feroelektrických přechodů blízko sebe. Přestože se multiferoické materiály studují už od počátku 60. let minulého století, výsledky do konce století byly nevalné. Bylo objeveno relativně málo multiferoik a jejich magnetoelektrická vazba byla navíc velmi slabá, tedy nevyužitelná v technické praxi. Bouřlivý rozvoj multiferoik nastal hlavně v tomto desetiletí, kdy se podařilo objevit nová multiferoika, kde je feroelektrina indukovaná speciální magnetickou strukturou [10]. V těchto multiferoikách je obrovská magnetoelektrická vazba schopná přepolarizovávat vzorky vnějším magnetickým polem a opačně. Tento jev by bylo možné využívat v MRAM pamětech, pokud by existoval při normálních pokojových teplotách. Bohužel, zatím se pozoruje jen při teplotách nižších, než je teplota kapalného dusíku (77 K). V současné době existuje prakticky jen jeden multiferoický materiál  $\text{BiFeO}_3$ , který je multiferoický nad pokojovou teplotou. Jeho magnetoelektrická vazba je však příliš malá, než aby se dala využít v technických aplikacích. Fyzici se však nevzdávají a snaží se připravit další multiferoika s vyššími kritickými teplotami. Nedávno byl např. publikován článek o objevu hexaferitového  $\text{Sr}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$  multiferoika, který vyazuje magnetoelektrický efekt při pokojové teplotě [11]. Feroelektrina je v něm však indukovaná vnějším (byť malým) magnetickým polem. Jinou cestu přípravy nových multiferoik jsme navrhli v tomto roce my. Ukázali jsme, že v paraelektrickém a antiferomagnetickém  $\text{EuTiO}_3$  je možné využít silné spin-mřížkové vazby a pomocí mechanického napětí způsobeného v tenkých vrstvách růstem na podložkách s jinými mřížkovými parametry je možné indukovat silné feromagnetické a feroelektrické uspořádání [12]. V takovémto multiferoiku by měla existovat silná

» Změření velikosti elektrického dipólového momentu elektronu by znamenalo průlom v chápání podstaty existence hmoty a její převahy nad antihmotou od počátku vesmíru. <<



**Obr. 5** Naivní schematické znázornění elektronu se spinem (tenká šipka určuje směr rotace elektronu) a magnetickým momentem (tlustá šipka). Znaménka + a - značí kladný a záporný náboj vytvářející elektrický dipólový moment elektronu. Magnetický a zároveň i elektrický moment elektronu je možné přetočit buď vnějším magnetickým nebo elektrickým polem. Změna magnetického momentu vlivem vnějšího elektrického pole je dobře měřitelná moderními supravodivými magnetometry.

magnetoelektrická vazba. Zajímavé je, že drtivá většina multiferoických materiálů jsou kysličníky. Na obr. 4 je schematicky znázorněna množina různých kysličníků včetně těch, které patří mezi multiferoika.

Vraťme se však zpět k problematice narušení CP symetrie a měření elektrického dipólového momentu elektronu. Mohou zde nějak pomoci multiferoika? Elektrický dipól elektronu musí být ze symetrie orientovaný podél magnetického momentu od spinu elektronu. Ve vnějším elektrickém poli se elektrický dipól elektronu a tedy i spin musí orientovat podél tohoto pole. Pokud by se změnil smysl orientace elektrického pole a pokud by bylo toto pole dostatečně vysoké, dojde k překlopení elektrického dipólu a tedy i spinu (viz obr. 5). Tento jev, lineární změna magnetizace pomocí elektrického pole, by měl být měřitelný pomocí moderních citlivých supravodivých magnetometrů – SQUIDů.

Na klasické magnetické materiály je obtížné přikládat silné elektrické pole. Vzorky bývají často vodivé a i když jsou některé magnetické materiály nevodivé, dochází v nich k elektrickému průrazu už při polích řádově 10 kV/cm. Na druhou stranu, u feroelektrik vzniká necentrosymetrická polarizovaná struktura vysunutím iontů v krystalové mřížce z původně centrosymetrické pozice (v paraelektrické fázi). Přitom působí na vysunuté ionty obrovské vnitřní elektrické pole řádově 10 MV/cm, a to dokonce bez vnějšího elektrického pole. Pro feroelektrika je zároveň charakteristické, že se dají vnějším elektrickým polem řádově kV/cm přepolarizovávat. Při přepolarizaci dochází k vysunutí iontů do opačného směru, to znamená, že se mění i smysl vnitřního elektrického pole. Právě tohoto vysokého vnitřního elektrického pole ve feroelektrikách by bylo vhodné využít pro ovlivňování elektrického dipólového momentu elektronu u magnetických materiálů a tím i pro jeho určení pomocí měření změny magnetizace s elektrickým polem.

My jsme navrhli měřit elektrický dipólový moment elektronu v multiferoickém  $\text{Eu}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{TiO}_3$ . Proč právě v tomto materiálu? Přestože fyzikální vlastnosti  $\text{Eu}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{TiO}_3$  nebyly v literatuře dosud prakticky popsané, naši američtí a němečtí spolupracovníci je teoreticky studovali a předpověděli, že tento materiál by měl být silně feroelektrický a jeho antiferomagnetická fáze by měla být teoreticky potlačena až k velmi nízkým teplotám pod teplotu kapalného hélia. Ve feroelektrické a zároveň paramagnetické fázi je makroskopický lineární magnetoelektrický jev ze symetrie zakázán. Pokud by se však pozoroval, docházelo by k němu vlivem pře-

táčení spinů elektronů v důsledku interakce dipólových momentů elektronů s elektrickým polem.  $\text{Eu}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{TiO}_3$  má navíc výhodu, že obsahuje silně magnetický iont Eu se sedmi nespárovanými elektrony na elektronových 4f hladinách. Součet magnetických momentů elektronů se dá měřit jako magnetizace daného vzorku. Při přepolarizaci vzorku vnějším elektrickým polem se musí změnit i magnetizace vzorku. Tato změna magnetizace má být sice v paramagnetické fázi velmi malá, ale měřitelná pomocí moderních magnetometrů. V důsledku toho by citlivost měření dipólového momentu elektronu měla být  $10^{-28}$  e.cm, tedy o řád větší než dosud.

Naše skupina z Fyzikálního ústavu Akademie věd ve spolupráci s kolegy z Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy a z Českého geologického průzkumu úspěšně připravila keramický vzorek  $\text{Eu}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{TiO}_3$ , změnila jeho strukturu, magnetické a dielektrické vlastnosti do teploty 0,5 K [7]. Ukázali jsme, že  $\text{Eu}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{TiO}_3$  přechází z kubické paraelektrické fáze do ortorombické feroelektrické fáze při 215 K. Magnetický stav se mění z paramagnetického do antiferomagnetického při 1,9 K. Proto je tento materiál skutečně vhodný pro hledání stálého elektrického dipólového momentu elektronu při teplotě kapalného hélia, tj. při 4,2 K. Měření dipólového momentu elektronu nyní intenzivně probíhají u našich kolegů na Yaleově univerzitě v USA. Pokud se podaří změřit velikost elektrického dipólového momentu elektronu, budeme moci určit, která z částicových teorií rozvíjející standardní model je správná. To by znamenalo průlom v chápání podstaty existence hmoty a její převahy nad antihmotou od samého počátku vesmíru – velkého třesku.

#### Poděkování

Autor tímto děkuje J. Chýlovi za stimulující diskusi i za kritické přečtení tohoto článku. Článek vznikl díky finanční podpoře GAČR (Projekt 202-09-0682) a AVOZ 10100520.

#### Literatura

- [1] J. Hořejší: „Nobelova cena za fyziku 2008: Cesty k narušení symetrie“, *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, **54**, 3 (2009).
- [2] V. M. Abazov a kol.: „Evidence for an anomalous like-sign dimuon charge asymmetry“, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 081801 (2010) a *Phys. Rev. D* **82**, 032001 (2010).
- [3] R. A. Briere: „A new source of CP violation?“, *Physics* **3**, 69 (2010).
- [4] B. C. Regan, E. D. Commins, C. J. Schmidt, D. DeMille: „New limit on the electron dipole moment“, *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 071805 (2002).
- [5] W. Bernreuther, M. Suzuki: „The electric dipole moment of the electron“, *Rev. Mod. Phys.* **63**, 313 (1991).
- [6] J. M. Pendlebury and E. A. Hinds: „Particle electric dipole moments“, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **A44**, 471 (2000).
- [7] K. Z. Rushchanskii, S. Kamba a kol.: „A multiferroic material to search for the permanent electric dipole moment of the electron“, *Nature Materials*, **9**, 649 (2010).
- [8] N. A. Spaldin a M. Fiebig: „The renaissance of magnetoelectric multiferroics“, *Science* **309**, 391 (2005).
- [9] W. F. Brown, R. M. Hornreich, S. Shtrikman: „Upper bound on the magnetoelectric susceptibility“, *Phys. Rev.* **168**, 574 (1968).
- [10] T. Kimura: „Spiral magnets as magnetoelectrics“, *Annu. Rev. Mater. Res.* **37**, 387 (2007).
- [11] Y. Kitagawa, Y. Hiraoka, T. Honda, T. Ishikura, H. Nakanuta, T. Komára: „Low-field magnetoelectric effect at room temperature“, *Nature Materials*, **9**, 797 (2010).
- [12] J. H. Lee a kol.: „A strong ferroelectric ferromagnet created via spin-lattice coupling“, *Nature*, **466**, 954 (2010).