

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jan Kaczér

Některé nové výsledky fyzikálního výzkumu magnetických jevů

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 4 (1959), No. 5, 547--554

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139403>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1959

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

FYSIKA

NĚKTERÉ NOVÉ VÝSLEDKY FYSIKÁLNÍHO VÝZKUMU MAGNETICKÝCH JEVŮ*)

JAN KACZÉR, *Fyzikální ústav ČSAV*

Úvod

Magnetické vlastnosti látek jsou již odedávna středem zájmu fyzikálního výzkumu. To má svůj důvod zřejmě v tom, že celá řada magnetických vlastností našla brzo praktická použití. Tak celý moderní silnoproudý a slaboproudý elektrotechnický průmysl by byl bez aplikace ferromagnetických materiálů nemyslitelný. Dlouhou dobu se však tyto aplikace zakládaly na čistě empirických výzkumech a neexistovaly mikrofyzikální teorie magnetických jevů. Teprve po vzniku kvantové mechaniky bylo možno v posledních dvou desetiletích přikročit k vybudování mikrofyzikálních teorií, které vysvětlily aspoň základní magnetické vlastnosti látek nejen kvalitativně, ale v poslední době i kvantitativně. Tím se dále umožnilo využít magnetických jevů v dalších nejmodernějších aplikacích. Vznikly nové obory fyziky i techniky jako je např. radiospektroskopie, magnetochemie a další, které jednak tvoří důležité metodické nástroje v daných oborech a jednak nám umožňují hlouběji poznat základní vlastnosti látek.

Magnetismus má i u nás dlouholeté tradice. Tak jsou dobře známé práce prof. Štrouhala z let 1877—1887 o elektrických a magnetických vlastnostech ocelí, které v tehdejší době znamenaly vážný přínos v tomto oboru. Magnetismus, zvláště ferromagnetismus, je jedna z nejstarších disciplin fyziky. Jako zakladatele exaktního bádání v tomto oboru můžeme označit anglického lékaře Williama Gilberta, který žil koncem 16. století. Přesto, že exaktní výzkum v tomto oboru trvá tedy již skoro 400 let, lze říci, že teprve v posledních 50 letech učinila tato věda podstatný krok dopředu.

Není možné, a není ani účelem tohoto referátu, podat přehled o magnetismu v celé jeho šíři, má se zmínit jen o některých nejdůležitějších a nejnovějších pokrocích tohoto oboru. Jak dnes víme, má každá látka magnetické vlastnosti. Podle intenzity magnetisace v technicky dosažitelných polích a teplotách můžeme látky rozdělit do dvou skupin.

1. Látky slabě magnetické. Do této skupiny patří látky diamagnetické a paramagnetické a
2. látky silně magnetické. Tato skupina obsahuje látky ferromagnetické a ferrimagnetické.

*) Předneseno dne 2. dubna 1959 na prvním sjezdu Jednoty československých matematiků a fyziků.

Nositelky magnetického momentu ve všech těchto látkách jsou v podstatě elektrony. Jednak vyvolává obíhající elektron, představující elektrický proud, magnetický moment, tzv. orbitální moment, jednak je elektron v důsledku spinu přímo nositelem magnetického momentu.

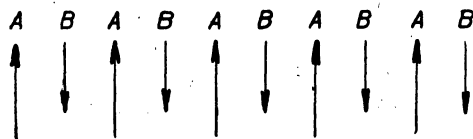
V některých látkách se orbitální a spinové magnetické momenty jednotlivých elektronů navzájem ruší. Atomy těchto látek nemají proto výsledný magnetický moment a tyto látky jsou diamagnetické.

Látky, ve kterých jednotlivé atomy mají výsledný magnetický moment, jsou obecně paramagnetické.

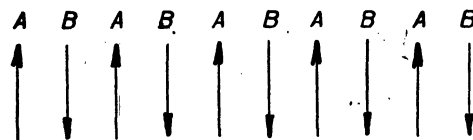
V paramagnetických látkách jsou síly, snažící se srovnat jednotlivé atomové momenty do jednoho směru zanedbatelně malé, takže jednotlivé elementární magnetické momenty



Obr. 1. Schéma ferromagnetika.



Obr. 2. Schéma ferrimagnetika.



Obr. 3. Schéma antiferromagnetika.

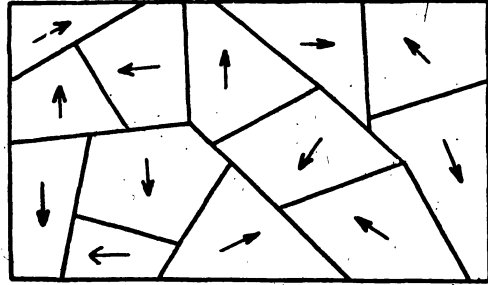
jsou v důsledku tepelného pohybu rozházeny stejnoměrně do všech směrů v prostoru. Vnější magnetickým polem lze docílit jisté srovnání magnetických dipólů, avšak k úplnému nasycení by bylo třeba nesmírně silných, dnešními prostředky nerealizovatelných polí o intenzitě řádově 10^7 Oe.

Další skupinou látek jsou látky ferromagnetické. V těchto látkách existují síly — podle dnešních poznatků elektrostátického původu — které se snaží magnetické momenty jednotlivých atomů srovnat do jednoho směru. Schematicky je toto uspořádání znázorněno na obr. 1. V důsledku těchto sil, kterým říkáme výměnné síly, dochází tedy při teplotách pod Curieovým bodem k paralelnímu

uspořádání jednotlivých elementárních momentů ve velmi velkých oblastech. Říkáme, že materiál je spontánně zmagnetován. Nad Curieovým bodem převažuje tepelný pohyb nad výměnnými silami a pravidelné uspořádání se ruší, látka se stane paramagnetickou. Ferrimagnetika se liší od ferromagnetik tím, že jsou sestaveny ze dvou různých druhů pravidelně uspořádaných atomů, přičemž každý druh má jinou velikost magnetického momentu. Schematicky je toto uspořádání znázorněno na obr. 2. *A* a *B* značí jednotlivé druhy atomů, přičemž délka šipky je úměrná magnetickému momentu jednotlivých atomů. Výměnné síly i zde způsobují srovnání jednotlivých momentů, avšak ne jako u ferromagnetik paralelně, nýbrž antiparalelně. Jelikož však velikost magnetického momentu jednoho druhu atomů se liší od druhého, dostaneme i zde výsledný magnetický moment od nuly různý, i zde existuje spontánní magnetisace. Je třeba zde jen podotknout, že existuje též skupina látek, u které se tyto momenty co do velikosti u obou druhů atomů neliší. Tyto látky, které ovšem nemají výslednou spontánní magnetisaci, nazýváme antiferromagnetikami (obr. 3).

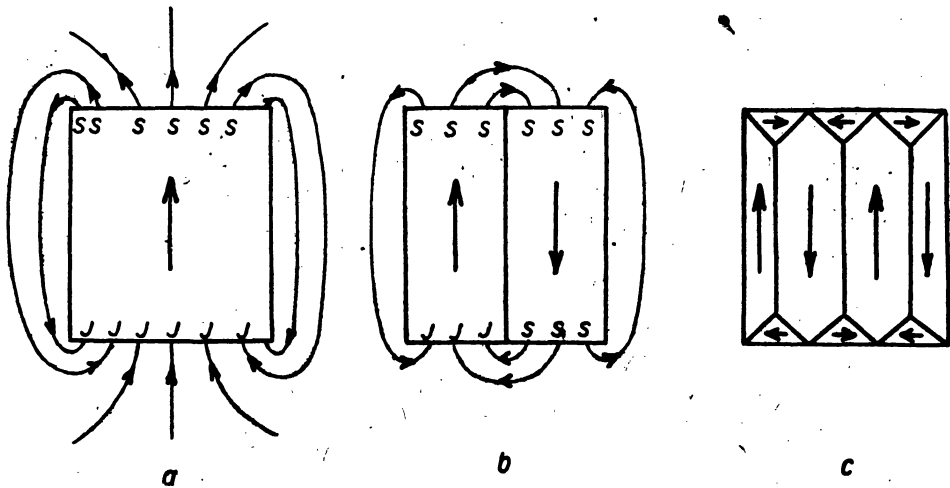
Doménová struktura ferromagnetik

Naskýtá se nyní otázka, proč — jsou-li magnetické momenty ve ferro a ferromagnetikách srovnány a existuje-li spontánní magnetisace — proč může, dejme tomu, kus železa být bez výsledného magnetického momentu. Odpověď na tuto otázku nám dává Weissova hypotéza o doménách. Podle Weissových představ jsou sice elementární momenty srovnány, ale jenom v jistých mikroskopických oblastech, v tzv. oblastech nebo doménách spontánní magnetisace. V sousedních doménách má magnetisace obecně různé směry, takže výsledný magnetický moment celého tělesa je nula (obr. 4).



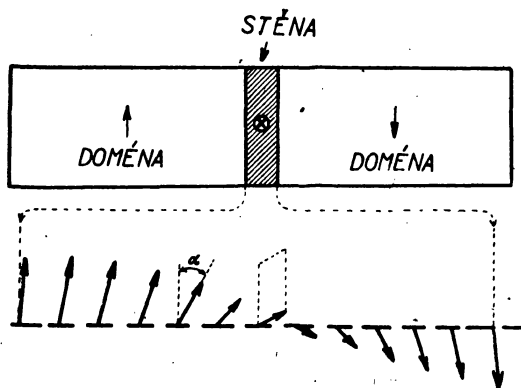
Obr. 4. Schéma doménové struktury.

Objasníme podstatu doménové teorie poněkud více. Představme si ferromagnetickou krychli, která by byla celá spontánně zmagnetována v jednom směru (obr. 5). Taková krychle představuje vlastně trvalý magnet se silným magnetickým polem. Vytvoření magnetického pole v celém prostoru vyžaduje však poměrně značnou energii. Tuto energii můžeme podstatně snížit, rozdělíme-li tuto krychli na malé oblasti podle obr. 5b. Magnetické pole v prostoru je nyní mnohem slabší a toto uspořádání je mnohem výhodnější než podle 5a. Magnetické pole lze však úplně odstranit, předpokládáme-li uspořádání podle obr. 5c. V tomto případě je tok zcela uzavřen v krychli a proto nevzniká žádné magnetické pole. Domény spontánní magnetisace jsou od sebe odděleny tenkými, několik set atomových rovin silnými hraničními vrstvami, ve kterých



Obr. 5. Vznik doménové struktury. a) jednodoménové ferromagnetikum, silné magnetické pole; b) rozdělení na menší domény se energie magnetického pole zmenšuje, vznikne však energie nesená Blochovými stěnami; c) možné uspořádání bez magnetického pole.

se magnetisace ze směru v jedné doméně otáčí do směru ve vedlejší doméně (obr. 6). Těmito hraničním vrstvám říkáme též Blochovy stěny. K vytvoření Blochových stěn je však třeba v důsledku nerovnoběžnosti elementárních magnetických momentů v ní vynaložit jistou energii. V důsledku této v podstatě povrchové energie se Blochovy stěny chovají podobně jako mýdlové blány, tzn. snaží se zaujmout minimální povrch. Jsou tedy zde dvě vzájemně



Obr. 6. Schéma Blochovy stěny oddělující domény s opačnou magnetisací. Dole: průběh magnetisace uvnitř stěny.

protichůdné tendence. Rozptylová magnetická pole se snaží vytvořit co nejmenší domény, tím však roste povrch Blochových stěn a jejich celková energie. Nastává se tedy rovnovážná struktura s charakteristickým tvarem a velikostí domén.

Je pochopitelné, že to jsou jenom podstatné rysy doménové teorie a že ve skutečnosti je třeba brát v úvahu větší počet vlivů než jenom výměnné síly a magnetostatické pole. Na doménovou strukturu mají ještě vliv též magnetostrikce a vnitřní pnutí, magnetokystalická anisotropie, velikost a tvar tělesa aj.

Experimentální důkaz existence domén ve ferromagnetikách

Myšlenka, provést experimentální důkaz o existenci domén ve ferromagnetikách, je stará asi 30 let. První pokusy v tomto směru nebyly však zcela úspěšné. Teprve v posledních 10 letech se podařilo provést úspěšné experimenty a jednoznačně prokázat existenci doménové struktury.

Experimentální technika je v hrubých rysech obdoba známého uspořádání k zviditelňování siločar pomocí železných pilin. Vzhledem k mikroskopickým rozměrům domén bylo však třeba pracovat s částicemi velice malých rozměrů. K provedení pokusu se používá velmi jemného, ve vodě suspendovaného koloidálního magnetitu, který je v důsledku tepelného pohybu volně pohyblivý. Kapka takového koloidu se nanáší na zkoumaný vyleštěný povrch ferromagnetika, který se pak pozoruje mikroskopem.

V místech, kde Blochovy stěny protínají povrch, vzniká poměrně silné magnetické rozptylové pole, které přitahuje koloidální částice, které tím zviditelňují doménovou strukturu na povrchu materiálu.

Přiložíme-li vnější magnetické pole, dojde k změně doménové struktury a koloid, který je stále pohyblivý, sleduje veškeré změny této struktury. Výsledky těchto pokusů nejenom potvrdily existenci doménové struktury, ale dokázaly též v podstatě správnost kvantitativních teorií sovětských fyziků Lifšice a Landaua a francouzského fyzika Néela.

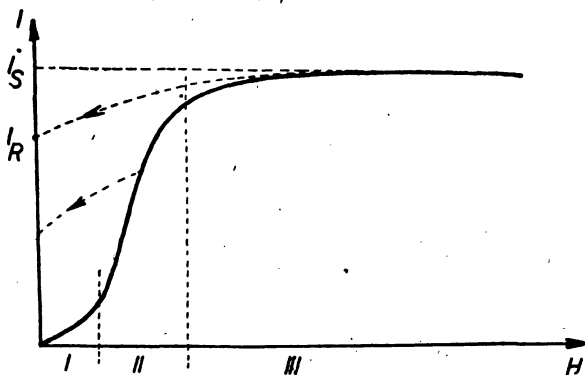
Odhálily navíc řadu nových závažných jevů a tím pomohly podstatně zlepšit naše pochopení procesů probíhajících při magnetování ferromagnetik.

Praktický význam znalosti doménové struktury tkví v jeho úzké souvislosti s magnetizační křivkou materiálu.

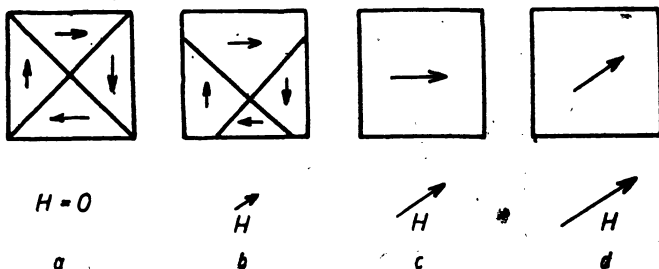
Magnetisační křivka, která má přímý význam pro praktické aplikace daného materiálu, má jak známo průběh podle obr. 7. Tuto křivku dovedeme nyní na základě doménové struktury vysvětlit takto:

Předpokládejme, že máme kus ferromagnetika s doménovou strukturou podle obr. 8a. Přiložíme-li nyní vnější magnetické pole H , dojde v první fázi k vratným posuvům Blochových stěn, a to tak, že rostou domény výhodně orientované, vzhledem k vnějšímu poli (obr. 8b). Vypne-li v tomto stadiu pole H , vrátí se stěny do původní polohy podle obr. 8a. Tento proces odpovídá prvnímu úseku na magnetisační křivce (I) na obr. 7.

Zvětšujeme-li však pole H dále, dochází v důsledku různých poruch v materiálu k nevratným posuvům Blochových stěn a při snížení pole se tyto stěny nevrátí již úplně do původních poloh. Materiál je v tomto případě již, jak říkáme, remanentně zmagnetován. Tato část magnetisační křivky je označena II .



Obr. 7. Magnetisační křivka.



Obr. 8. Schéma magnetování vratnými (a) a nevratnými (b) posuvy Blochových stěn a rotací magnetisace (d).

Při dalším zvětšování pole vymizí doménová struktura podle obr. 8c a při dalším zvyšování pole dochází k rotaci vektoru magnetisace do směru pole podle obr. 8d. Tato část magnetisační křivky, která leží nad horním kolenem je označena (III .) V této fázi dochází k nasycení materiálu.

Známe-li tedy doménovou strukturu a vliv poruch na tuto strukturu, dovedeme v zásadě říci, jak bude vypadat magnetisační křivka daného materiálu. Chtěl bych zdůraznit, že se fyzikální výzkum doménové struktury provádí většinou na téměř dokonalých monokrystalech kovů a ferritů. Je pochopitelné, že v polykrystalických látkách jsou poměry poněkud složitější. Tak např. poruchy krystalové mříže mají značný vliv na magnetické vlastnosti reálných ferromagnetik. S vlivem jistých druhů poruch, tzv. dislokací, na koerzitivní

silu ferromagnetik se zabýval u nás nedávno zemřelý František Vicena, který jako první vypracoval mikrofyzikální teorii koercitivní síly. Tato teorie byla u nás v posledních letech experimentálně v podstatě dokázána.

Ferrity

Důležitou skupinou ferromagnetik či přesněji řečeno ferrimagnetik jsou ferrity. Ferrity v obecném smyslu slova jsou některé kysličníky železa a jiných kovů a jejich praktický význam tkví v tom, že mají poměrně malou elektrickou vodivost a jsou proto zvláště vhodné pro aplikace při vysokých a velmi vysokých frekvencích. Z tohoto hlediska nejdůležitější jsou ferrity, které žrystalují v kubické soustavě. Z historického hlediska je zajímavý ten fakt, že prvním známým ferromagnetikem byl vlastně jeden z ferritů, a to ferrit železnatý anebo jinak nazvaný magnetovec FeFe_2O_4 . Chemický vzorec ferritů je



kde M značí některý dvojmocný kov.

Nejdůležitější čisté ferrity jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1

Ferrit manganatý	MnFe_2O_4
Ferrit hořečnatý	MgFe_2O_4
Ferrit mědnatý	CuFe_2O_4
Ferrit železnatý	FeFe_2O_4
Ferrit nikelnatý	NiFe_2O_4
Ferrit kobaltnatý	CoFe_2O_4
Ferrit zinečnatý	ZnFe_2O_4

V technických aplikacích se však ferrity nepoužívají v čisté formě, nýbrž se vzájemně míchají v jistých poměrech. Vzniklým látkám říkáme směsné ferrity.

Čisté ferrity jsou známy již 50 let, avšak teprve vznikem směsných ferritů v třicátých letech v laboratořích firmy Phillips našly praktického použití. Magnetické vlastnosti ferritů se dají vysvětlit na základě jejich krystalické struktury. Výměnné síly mezi jednotlivými sousedy u ferritů jsou takového charakteru, že magnetické momenty jednotlivých atomů jsou antiparalelní, to znamená, že obecně patří ferrity do skupiny antiferromagnetik. V důsledku toho, že celkový moment do jednoho směru je větší než do opačného, vznikne výsledný magnetický moment, který je ovšem obecně na jednotku objemu menší než u kovových ferromagnetik, kde všechny atomy jsou orientovány do jednoho směru.

Schematicky lze uspořádání atomových momentů u ferrimagnetik znázornit podle obr. 2. Ferrity mají tedy výsledný magnetický moment a tudíž i spontánní magnetisaci.

V důsledku tepelného pohybu toto uspořádání nad Curieovým bodem vymizí a tyto látky jsou podobně jako ferromagnetika nad Curieovým bodem paramagnetické.

Obdobně jako ferromagnetické kovy mají ferrity doménovou strukturu a vznik magnetisační křivky lze u nich vysvětlit podobně, jako u ferromagnetik.

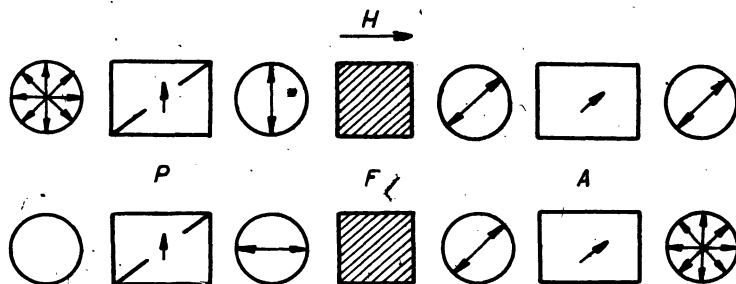
Hlavní výhodou ferritů, jak již bylo řečeno, je v jejich nízké elektrické vodivosti, která je až milionkrát menší než u kovů. V důsledku toho jsou ztráty, působené vířivými proudy zanedbatelné, a není třeba, jak je to u kovů, používat je např. v transformátorech ve formě tenkých plechů nebo prášku.

Vyrábějí se obdobně jako keramika lisováním a vypalováním, a proto se jim též říká keramická ferromagnetika.

V důsledku nízké elektrické vodivosti se dají ferrity používat pro velmi vysoké frekvence až do oblasti cm-vln. Z tohoto důvodu je fyzikální výzkum dynamiky magnetizačních změn ve ferritech v popředí zájmu.

Použití ferritů

Běžně se ferrity dnes používají v slaboproudé elektrotechnice, kde slouží jako jádra pro vysokofrekvenční cívky a transformátory a svými dobrými vlastnostmi umožnily např. spolu s polovodiči značnou miniaturizaci přístrojů. Tak se vyrábějí s použitím ferritů velmi malá a lehká radia a naslouchací přístroje pro nedoslýchavé, které neváží více než 2 až 3 gramy. Jinou důležitou aplikací ferritů najdeme v moderních počítačích strojích, kde ferrity s tak zvanou pravoúhlou hysterézní smyčkou slouží jako magnetické paměti miniaturních rozměrů.



Obr. 9. Uspořádání k využití Faradayova jevu pro nereciproké prvky. Nahoře: světlo přichází zleva. Dole: světlo přichází zprava. *P* – polarizátor, *F* – aktivní látka v magnetickém poli, *A* – analyzátor.

Všechny tyto aplikace nejsou však typické jen pro ferrity, jelikož i klasické materiály se dají pro tyto účely použít.

Chtěl bych se zde zmínit jen o jedné specifické aplikaci, která by bez ferritů nebyla možná. Z magnetooptiky je znám Faradayův jev. Spočívá v rotaci polarizační roviny lineárně polarizovaného světla v některých látkách v magnetickém poli. Na tomto principu lze demonstrovat jev, kterému se někdy říká magnetooptický nebo-li též Faradayův paradoxón.

Princip pokusu je na obr. 9. Přichází-li světlo zleva a prochází-li polarisátorem *P*, je lineárně polarisováno ve svislém směru. Po průchodu látkou *F* je úhel polarizační roviny natočen o 45° proti svislici a prochází analyzátozem, který je také natočen o 45° vůči polarisátoru.

Světlo přicházející zleva prochází tedy tímto zařízením nerušeně. Jiná je však situace, přichází-li světlo zprava. V tomto případě je polarizační rovina světla po průchodu analyzátozem *A* natočena o 45° proti svislici. Po průchodu magnetooptickou látkou *F* se tento úhel zvětší o dalších 45° a polarizační

rovina světla je nyní vodorovná, tzn. kolmá na nastavení polarisátoru a proto tedy světlo neprojde polarisátorem *P*.

Toto zařízení propouští tedy světlo jenom jedním směrem. Říkáme proto, že je to zařízení nereciproké.

Obdobné zařízení lze konstruovat s použitím ferritů, nikoli však pro světlo, ale pro radiofrekvenční vlny, pro které jsou ferrity průhledné. Takové zařízení, kterému se odborně říká izolátor, slouží například účinně v radarových zařízeních k elektrickému oddělení vysílače od přijímače. Takových jednosměrných anebo nereciprokých prvků existuje dnes již celá řada a v centimetrové technice mají široké použití.

Nakonec bych se chtěl ještě zmínit o jistém druhu ferritů objevených v posledních letech. Jde o ferrity s tak zvanou granátovou strukturou. Tyto granáty jsou též ferrimagnetické a některé z nich jsou průhledné pro světlo. S použitím těchto granátů byly již konstruovány modulátory pro světlo, které by mohly najít použití v řadě technických aplikací jako na příklad v zvukovém filmu, v automatisaci a jiných oborech. Bylo by v zásadě též možné s použitím těchto granátů konstruovat nereciproké prvky přijatelných rozměrů i pro světlo. To znamená, že bychom mohli zhotovit okna, která by propouštěla světlo jenom jedním směrem.

Závěr

Vybrané příklady zdaleka nevyčerpávají celou fyziku magnetických jevů a slouží spíše jako ilustrace nových výsledků dosažených v tomto oboru.

Je třeba poznamenat, že i v Československu je věnována tomuto odvětví fyziky značná pozornost. Tak se skupina vědeckých pracovníků v Ústavu technické fyziky ČSAV zabývá fyzikou a technologií ferritů. Jiná skupina ve Fyzikálním ústavu ČSAV se věnuje základnímu fyzikálnímu výzkumu doménové struktury a magnetizační křivky ferromagnetik. Také na Vysoké škole technické v Košicích je skupina pracovníků, kteří pracují v oboru magnetizační křivky. Na všech těchto pracovištích se dosahuje dobrých výsledků, a tak lze bez nadsázky říci, že i v tomto oboru se podařilo v podstatě vyrovnat zpoždění, kterým československá fyzika před válkou trpěla.

NOVÉ POZNATKY V OBORU ŘÍZENÝCH TERMONUKLEÁRNÍCH REAKCÍ

Ing. JAROMÍR TOBIÁŠ

Katedra fyziky fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze

I. Úvod

V létě minulého roku konala se v Ženevě druhá mezinárodní konference o mírovém využití atomové energie. Účastnilo se jí více než 6000 zástupců ze 69 států. Tak jako první konference 1955 probíhala ve znamení uvolnění poznatků o mírovém využití štěpných reakcí, byl na této konferenci soustředěn mimořádný zájem na uvolnění poznatků o řízené termonukleární reakci. Na konferenci bylo o tomto oboru předneseno přibližně 100 referátů, z nichž nejzávažnější byly referáty sovětské, americké a anglické delegace. Z příspěvků