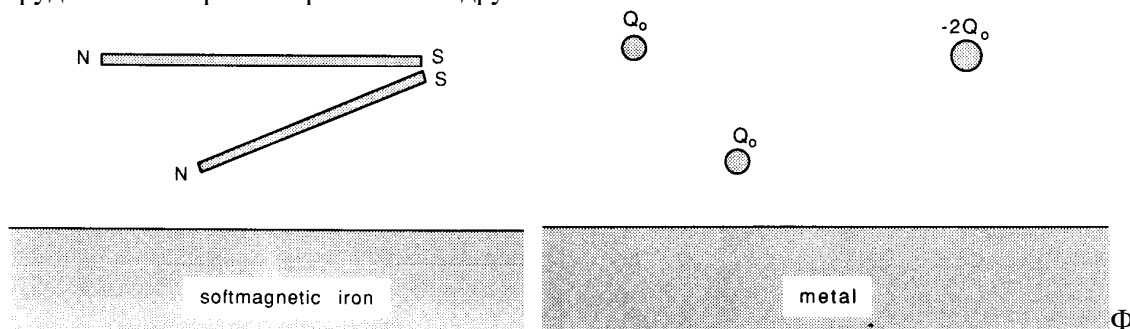


**Преподаване на магнитостатичното поле:  
проблеми, които трябва да се избягват<sup>1</sup>  
Ф. Херман**

Една широко разпространен проблем, с който се сблъскват учителите, е трудността, която изпитват студентите, когато трябва да решават задачи, свързани с вида на линиите на магнитното поле в присъствие на твърди и на меки магнитни материали. Разкриват се две причини за тези трудности: (1) Фактът, че хистерезисът се въвежда като типично поведение за феромагнитните материали; (2) фактът, че интензитетът  $\vec{H}$  на магнитното поле почти липсва в курсовете по електромагнетизъм. Като “лекарство” против затрудненията на учениците се препоръчва (а) да се въведат четири идеализирани магнитни материала, а именно – не магнитни, твърди магнитни, меки магнитни и свръхпроводящи материали; и (б) когато се обсъждат проблемите на магнитостатиката, да се използва интензитетът  $\vec{H}$  на магнитното поле, а не магнитната индукция  $\vec{B}$ .

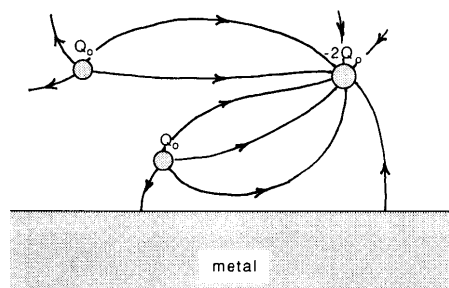
### I. Въведение

Накарайте студент, който вече е завършил изучаването на електромагнетизма, да нахвърля схематично магнитните силови линии за определена конфигурация от магнитни полюси и парче меко желязо както на фиг. 1. Най-вероятно студентът ще бъде безпомощен. Ако го помолите да начертае електричните силови линии на ситуацията от фиг. 2, той или тя ще начертае нещо, подобно на фиг. 3: качествено правилно разпределение на линиите на полето. Колкото и странно да е, задачата от фиг. 1 е по същество същата, като тази от фиг. 3. Математичната структура на тези два проблема е една и съща. Следователно намирането на решение на едната задача не би трябвало да бъде по-трудно от намиране на решение на другата.



Фиг. 1: Какъв е видът на магнитните силови линии?

Фиг. 2: Какъв е видът на електричните силови линии?



Фиг. 3: Качествено вярна картина на силовите линии на полето от фиг. 2.

<sup>1</sup> Превод от Am. J. Phys., 59 (5), May, 1991.

Аз предложих тест на група студенти по физика, които бяха между техните четвърти и шести семестър. Всички те бяха преминали едно семестриален курс по експериментална електродинамика, едно семестриален курс по теоретична електродинамика и лабораторни упражнения по електромагнетизъм. Разделих ги на две групи. Всяка група трябваше да реши една задача от електростатиката и една от магнитостатиката. Електростатичната задача за първата група имаше същата структура, като магнитостатичната задача на втората група. По-нататък, магнитостатичната задача на първата група бе също така копие на електростатичната задача на втората група. Резултатът от теста бе очевиден: магнитостатичните варианти на двете задачи бяха решени правилно от 22 % от студентите. 80 % от студентите решиха правилно електростатичните задачи. Този резултат е още по-забележителен, като се има предвид, че всеки има значителна практика в работа с постоянни магнити, а почти никой не се е занимавал със заредени тела. Очевидно е, че курсовете по електродинамика не успяват да постигнат една от своите цели.

В настоящата статия ще покажа, че трудностите, които срещат студентите при решаване на задачи от магнитостатиката, се дължат на две причини. Едната е в начина, по който ние разглеждаме магнитните свойства на материалите; в частност, фактът, че на хистерезиса на тези материали се предоставя толкова предно място. Аз предлагам във въвеждащия курс по електромагнетизъм да се прави разлика между четири класа идеализирани материали: не намагнитващи се материали; идеални магнитно “твърди” материали; идеални магнитно “меки” материали и идеални диамагнитни материали. Магнитно меки материали наричаме материали с много малко остатъчно поле и много голяма магнитна проницаемост (пермеабилитет). Магнитно твърди материали са онези с голяма коерцитивна сила. Това предложение ще се дискутира в Част II.

Втората причина за трудностите на студентите с магнитостатиката се дължи на преобладаващото използване в повечето учебници на магнитната индукция  $\vec{B}$  в сравнение с интензитета  $\vec{H}$  на магнитното поле. Аз предлагам при изучаване на магнитостатиката ударението да се постави върху интензитета  $\vec{H}$  на магнитното поле. Това предложение се дискутира в Част III.

В Част IV обсъждаме прилагането на стратегията от Част III за решаване на няколко магнитостатични задачи заедно с техните електростатични двойници. Забележете, че тази статия се занимава с макроскопичните явления в магнитостатиката.

## II. Четири идеализирани магнитни материала

Типичния начин за въвеждане на магнитните свойства на веществата е да се започне с пара- и диамагнетизма. След това се обсъжда феромагнетизма и се въвежда хистерезисът като типично поведение на феромагнитните материали.

Аз бих желал да критикувам този начин на процедиране от две гледни точки – поне когато става дума за уводните курсове по физика.

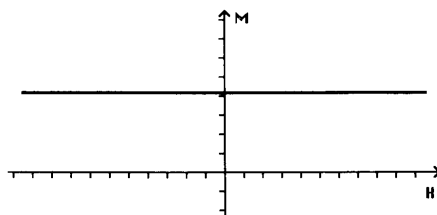
Първата критика се отнася до започването с пара- и диамагнетизма, т.е. с ефекти от порядъка на  $10^{-4}$  до  $10^{-6}$ . В един уведен курс би било по-добре да започнем или да се ограничим само със силни ефекти, в случая – с феромагнитни материали. Тази процедура е напълно законна и е нещо обикновено в други области на физиката. Представете си например механиката, където ние разглеждаме една масивна желязна макара като абсолютно твърдо тяло, пренебрегвайки нейната еластичност и вискозитет.

Второто ми възражение се отнася до начина на разглеждане на феромагнитните материали. Вместо да се въвежда хистерезисът като явление, характерно за феромагнитните материали, по-добре би било да започнем изучаването на феромагнетизма с идеалните магнитно твърди и с идеалните магнитно меки материали. Днес ние сме в

състояние да произвеждаме много добри и твърди, и меки магнитни материали; следователно за много от техническите приложения хистерезисът не играе съществена роля.

Моето предложение е следното. Ние въвеждаме четири вида материали, различаващи се по магнитните си свойства. Въпреки че това са идеализации, повечето реални материали, които се използват в техниката, представляват много добра тяхна апроксимация.

Нашият пръв идеализиран в магнитно отношение материал е идеалният твърд магнитен материал. Това е материалът, необходим за направата на постоянни магнити. В завода постоянният магнит получава желаното разпределение на намагнитването и, ако това е добър магнит, той запазва това намагнитване, независимо от това дали се поставя във външни магнитни полета. Графиката на зависимостта на намагнитването  $\vec{M}$  от интензитета  $\vec{H}$  на магнитното поле за идеалния твърд магнитен материал е показана на фиг. 4.



Фиг. 4: В един идеален твърд магнитен материал намагнитването  $\vec{M}$  не зависи от интензитета  $\vec{H}$  на магнитното поле.

Разбира се, намагнитването може да се промени чрез “груба сила”, т.е. чрез прилагане на полета с много голям интензитет. Това, обаче, не бива да бъде пречка за въвеждане на материали като тези, които се характеризират с диаграмата от фиг. 4 – идеалните твърди магнитни материали. В края на краищата, ние процедираме по същия начин в другите части на курса по физика. Въпреки че законите на Хук, на Ом, или законът за линейното температурно разширение са валидни само в ограничен интервал на промяна на независимата променлива, ние не се колебаем да ги въведем в курса по физика. Само по този начин ние можем да достигнем порядък в разнообразието от явления. Разбира се, ние трябва да внимаваме да не излезем извън областта на валидност на тези закони. Обаче, ако ние не преразтеглим една пружина, законът на Хук остава валиден, както и ако не поставим един постоянен магнит в изключително силно магнитно поле, неговото намагнитване остава постоянно. Нещо повече, пружините също показват хистерезис и микроскопичната причина за това явление е много интересна. Въпреки това, в началото на курса по механика, ние се ограничаваме с еластични пружини и можем да обсъждаме механичния хистерезис, когато обсъждаме дислокациите в рамките на курса по физика на твърдото тяло.

Вторият идеализиран магнитен материал е идеалният мек магнитен материал. Поведението на този материал е следното: когато се постави в магнитно поле, той се намагнитва така, че интензитетът  $\vec{H}$  на магнитното поле във вътрешността му остава нула. Графиката на зависимостта  $\vec{M} - \vec{H}$  представлява вертикална права през началото на координатната система, т.е. права, която съвпада с оста  $\vec{M}$ .

Когато материалът е намагнитен, на повърхността му се формират полюси. Векторите на интензитета на полето от външната страна на материала, непосредствено до повърхността, се перпендикулярни на повърхността. Всеки метал би бил електростатичен двойник на тези материали. Ако метал се постави в електростатично поле, зарядите във вътрешността му се преразпределят така, че по повърхността се появяват индуцирани заряди, а интензитетът на електричното поле във вътрешността става нула.

Коментарите, които направихме за твърдите магнитни материали, може да се направят и за меките магнитни материали. Дотолкова, доколкото интензитетът на магнитното поле не е твърде висок, определени материали, които са налични днес, се държат до голяма степен като идеални магнитно меки материали. Реалните материали търпят насищане и магнитното поле прониква във вътрешността им, само когато се поставят в много силни магнитни полета.

Тъй като материалите, които се произвеждаха преди, бяха твърде далеч от идеалното, това обяснява защо в по-старите учебници хистерезисът играеше важна роля. По мое мнение обаче, днес е напълно оправдано в курсовете по физика да се въведат идеални по отношение на магнитните си свойства материали.

Разбира се, аз не препоръчвам отпадане на хистерезиса от учебната програма. Не бива да забравяме също, че явлението хистерезис има важни технически приложения: всички<sup>2</sup> уреди за натрупване на данни се основават на това явление. Въпреки това, от понятийна гледна точка е по-лесно да се въведат простите случаи и едва след това да се обсъжда хистерезисът, точно както в механиката започваме с безмасови пружини и едва по-късно можем да въведем пружини с ненулева маса. Както и в термодинамиката първо въвеждаме идеален газ, а по-късно – реален газ.

По отношение на магнитните свойства можем да отделим още два вида идеализирани материали. Единият от тях е, разбира се, инертният по отношение на магнетизма материал: материали, които не са магнитни и не се намагнитват, такива като мед, стъкло, дърво или пластмаси. Както бе казано по-горе, в първо приближение ние пренебрегваме пара- и диамагнетизма.

Накрая, свръхпроводниците принадлежат към нашия четвърти клас и за тях често се говори като за идеални диамагнетици. Тези идеални диамагнетици имат нещо общо с идеалните магнитно меки материали: те не позволяват на магнитното поле да прониква във вътрешността им. Начинът, по който те постигат това, обаче е различен. Докато меките магнитни материали образуват на повърхността си магнитни полюси, в свръхпроводниците се индуцират повърхностни токове. Тяхното поле компенсира перпендикулярната компонента на външното магнитно поле така, че отвън, близо до повърхността, векторът  $\vec{H}$  на интензитета на магнитното поле е успореден на повърхността. В случая по нея няма магнитни полюси, т.е. източници на интензитета  $\vec{H}$  на полето.

Таблица I сумира свойствата на нашите четири основни типове магнитни материали.

#### **Таблица I. Четири типа идеализирани магнитни материали**

**Не магнитни материали:** полето прониква в тях така, като че ли ги няма.

**Магнитно твърди материали:** Намагнитването е постоянно, едно външно магнитно поле прониква в тях така, като че ли материалът не е там.

**Магнитно меки материали:** Изтласкват навън магнитното поле; образуват полюси по повърхността си; векторът  $\vec{H}$  е перпендикулярен на повърхността.

**Свръхпроводници:** Изтласкват магнитното поле от себе си; по повърхността им текат токове; векторът  $\vec{H}$  е успореден на повърхността.

По-малките ефекти на пара- и диамагнетизма се обсъждат по-късно (точно както в електростатиката диелектричните материали се въвеждат в края): една линейна връзка между  $\vec{M}$  и  $\vec{H}$ . Тези ефекти, обаче, не са предмет на разглеждане в тази статия.

<sup>2</sup> Преди 20 години, когато е писана статията, оптичните методи за запис на информация не са били развити.

### III. Интензитет на магнитно поле срещу магнитна индукция

За описание на магнетизма във веществата може да се използват три различни векторни величини: магнитната индукция  $\vec{B}$ , интензитетът на магнитното поле  $\vec{H}$  и намагнитването  $\vec{M}$ . Тези величини са свързани с равенството:

$$(1) \quad \vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}).$$

Тази връзка показва, че само две от трите величини  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  и  $\vec{M}$  са независими, т.е. една от величините може да бъде изразена посредством другите две.

Докато в класическите текстове на Дж. Кл. Максвел или на Дж. Дж. Томсън векторите  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  се разглеждат равноправно, днес в много учебници много повече внимание се отделя на вектора  $\vec{B}$ , като той се разглежда като по-фундаментален. (Аз открих само един съвременен учебник, в който  $\vec{H}$  е предпочетен пред  $\vec{B}$ ). Наистина, когато електродинамиката се разглежда на микроскопично равнище, е по добре да се използва векторът  $\vec{B}$ . Нещо повече, именно  $\vec{B}$  определя силата на Лоренц и, накрая, явлението електромагнитна индукция е със сигурно по-разбираемо, когато се обсъжда в термините на  $\vec{B}$ , вместо с  $\vec{H}$ . Като следствие от този навик да се предпочита  $\vec{B}$  пред  $\vec{H}$ , добре познатите по-рано преимущества от работата с  $\vec{H}$  са почти напълно забравени. С цел да се разберат тези преимущества е достатъчно да се погледнат причините, поради които в електростатиката е толкова лесно да боравим с  $\vec{E}$ . Задачата от фиг. 2 принадлежи към класа задачи, които качествено могат да се решат с помощта на няколко прости правила. В тези задачи са зададени разположенията на фиксирани заряди и на проводници. Несъмнено, подобна задача може да се реши чрез едно от уравненията на Максвел:

$$(2) \quad \operatorname{div} \vec{E} = \rho / \epsilon_0$$

и ние допускаме, че това уравнение е познато на студентите. Въпреки това, обикновено един студент не се връща към източниците, т.е. към уравненията на Максвел. Вместо това той или тя използва съвкупност от правила, с които се работи по-лесно. Тези правила са следствие от уравнение (2) и от факта, че вътре в проводниците има заряди, които могат да се движат свободно. Ето списък на споменатите правила:

1. Линиите на електричното поле започват от положителни и завършват върху отрицателни заряди. Броят на линиите, които започват или свършват върху един заряд е пропорционален на абсолютната стойност от големината му.

2. Линиите на електричното поле не се пресичат.

3. Във вакуум посоката на една линия на електричното поле не променя посоката си рязко.

4. Вътре в един проводник няма линии на електричното поле.

5. От външната страна на един проводник линиите на електричното поле са перпендикулярни на повърхността му.

Ако се разглеждат и диелектрици се появяват още няколко допълнителни правила. Ние обаче ще се ограничим със задачи без диелектрици.

Сега, за линиите на магнитното поле, т.е. за магнитните силови линии, които онагледяват разпределението на интензитета  $\vec{H}$  на полето, важат правила, аналогични на току що изброените. Отново започваме с едно от уравненията на Максвел:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0.$$

Като използваме равенство (1), получаваме:

$$(3) \quad \operatorname{div} \vec{H} = -\operatorname{div} \vec{M},$$

и като въведем плътност  $\rho_m$  на магнитните заряди чрез равенството:

$$\rho_m = -\operatorname{div}\vec{M},$$

равенство (3) може да се запише във вида:

$$(4) \quad \operatorname{div}\vec{H} = \rho_m / \mu_0,$$

който има същата математическа структура като равенство (2). Величината  $\rho_m$  количествено описва разпределението на магнитния заряд в полюсите. Нашите правила за магнитните силови линии следват от уравнение (4) и от факта, че в магнитно меките материали магнитните полюси могат да се местят свободно наоколо:

**1'.** Магнитните силови линии започват от положителните (северните) магнитни полюси и завършват върху отрицателните (южните) магнитни полюси. Броят на линиите, които започват или завършват върху един магнитен полюс е пропорционален на абсолютната стойност на магнитния заряд на полюса.

**2'.** Магнитните силови линии не се пресичат.

**3'.** Във вакуум посоката на магнитните силови линии не се променя рязко.

**4'.** Вътре в магнитно меките материали няма магнитни силови линии.

**5'.** От външната страна на един магнитно мек материал магнитните силови линии са перпендикулярни на повърхността му.

От сравнението на уравнения (2) и (4), или на правилата от 1. до 5. с тези от 1'. До 5'. се вижда, че решенията на задачите от фиг. 1 и фиг. 2 са идентични: магнитните силови линии от фиг. 1 имат същата форма като електричните силови линии на фиг. 2. Следователно покажахме, че решението на магнетостатичната задача е толкова лесно, колкото и на електростатичната задача.

Ако се интересуваме от магнитните индукционни линии, които онагледяват вектора  $\vec{B}$ , можем да ги получим, отново качествено, чрез комбиниране на разпределението на полето  $\vec{H}$  и намагнетизирането, което в нашите задачи или е зададено, или лесно се получава.

Коя е причината за трудностите, които срещат студентите, ако от начало започнат да чертаят индукционните линии? Няма ли и за тях система от правила, както за силовите линии? разбира се, че има. Три от посочените по-горе правила за линиите на полето  $\vec{H}$  са валидни и за линиите на полето  $\vec{B}$ : правилата 2', 3' и 5'. Правилото 1' трябва да се замени със следното правило:

**1''.** Магнитните индукционни линии са винаги затворени криви.

Няма правило, което да съответства на правило 4'.

За конструиране вида на индукционните линии обаче правило 1'' далеч не е толкова полезно, колкото правилата 1' и 4' за изчертаване вида на магнитните силови линии. Докато правилата 1' и 4' свързват магнитните силови линии с магнитните полюси, т.е. с дивергенцията на векторното поле на намагнетизирането, правило 1'' не прави това.

Нещо повече, аналогията между  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  дава преимущества и в други области на електромагнетизма, например при пресмятане разпределението на вектора на Пойнтинг и на разпределението на механичните напрежения. Разбира се, то е ограничено от факта, че в действителност в природата няма (доколкото знаем днес) изолирани магнитни заряди. Като следствие от това – няма и истински магнитни токове.

Накрая, ние добавяме още две магнитни правила – 6' и 7', които нямат електростатичен аналог. Точно така, както 4' и 5' са правила, валидни за магнитно меки материали, 6' и 7' са правила за свръхпроводящи материали:

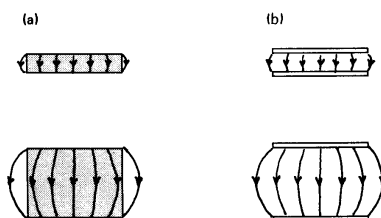
**6'.** Вътре в свръхпроводящия материал няма магнитни силови линии.

**7'.** До външната страна на свръхпроводника магнитните силови линии са успоредни на тази повърхност.

#### IV. Примери

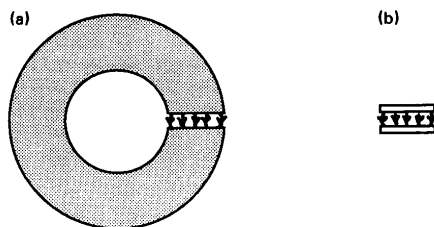
В тази част обсъждам някои примери за разпределение на полето  $\vec{H}$ . Във всеки от примерите чрез прилагане на правилата от 1' до 7' от предната Част III се търсят магнитните силови линии при зададено разположение на магнитните полюси, на магнитно меките материали и на свръхпроводниците. За всяка магнитна задача скицираме и аналогичната електрична задача с нейното решение, с изключение на последните две, тъй като в природата не съществува аналог на електричен свръхпроводник. Чертежите са изпълнени на ръка.

1. *Цилиндричен постоянен магнит* (фиг. 5). Материалът е намагнитен хомогенно. Намагнитването е успоредно на оста на цилиндъра. Електричният аналог представява две кръгли успоредни пластинки, които са зарядени с равни по големина и с противоположни знаци заряди. Върху всяка от пластинките повърхнинната плътност на зарядите е константа.



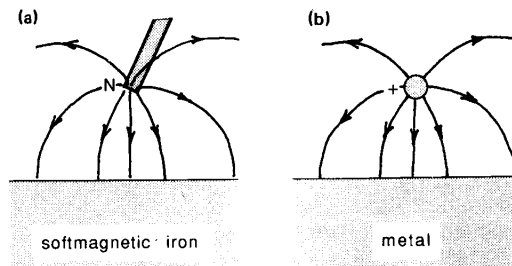
Фиг. 5: а) Силови линии на магнитното поле за две цилиндрични парчета хомогенно намагнитен материал. На фигурата осите на цилиндрите са вертикални. Горният цилиндър е по-къс по направление на оста си от долния. б) Електричните силови линии на двойка успоредни кръгли пластинки с равни по големина и противоположни по знак заряди имат същата форма, както магнитните силови линии от фиг. а).

2. *Пръстеновиден постоянен магнит с процеп*, фиг. 6. Напречното сечение на пръстена е кръгово. Интензитетът  $\vec{H}$  в междината е същият, като на плоския цилиндричен магнит от фиг.5. За пръстеновиден магнит без процеп интензитетът на магнитното поле е нула навсякъде.

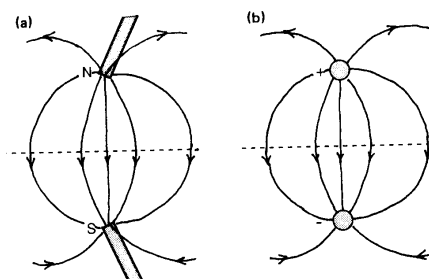


Фиг. 6: а) Пръстеновиден магнит с кръгово сечение. Полусите са върху двете повърхности на процепа. Магнитните силови линии имат форма като на горния магнит от фиг. 5, а. б) Електростатичният аналог е същия, като за горния магнит от фиг. 5, а.

3. *Магнитен полюс в близост до плоска магнитно мекта повърхност*, фиг. 7. Полето е същото като в горната половина на полето от фиг. 8. За да се получи разпределението от фиг. 8, разположението на полюса от фиг. 7 е отразено огледално от повърхността на магнитно мекия материал, а самият магнитно мек материал е заменен с “изображението на полюса.

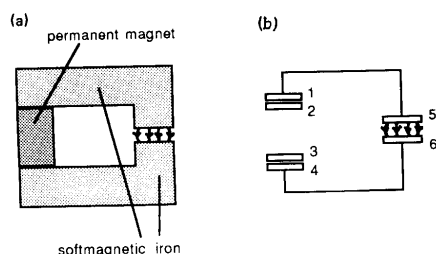


Фиг. 7: а) Северен магнитен полюс над равнина от магнитно мек материал.  
б) Положителен електричен заряд над плоска метална повърхност.



Фиг. 8: а) Равнината от магнитно мек материал е заменена с един огледален образ – южен магнитен полюс. б) Металната плоскост от фиг. 7, б е заменена със съответното изображение – отрицателен електричен заряд.

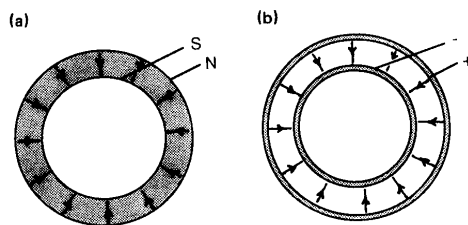
4. *Правоъгълен пръчковиден магнит с котва от меко желязо*, фиг. 9. Постоянният магнит индуцира магнитни полюси в частите от магнитно мек материал. Полето на полюсите две и три на постоянния магнит е компенсирано от полетата на индуцираните полюси 1 и 4. Остава полето на индуцираните полюси 5 и 6. Електричният аналог се състои от дисковете 2 и 3, заредени с противоположни по знак заряди. Тези заряди индуцират противоположни по знак заряди в дисковете 1 и 4 съответно. Полето на зарядите 2 и 3 се компенсира от полетата на индуцираните заряди 1 и 4. Остава полето на индуцираните заряди 5 и 6.



Фиг. 9: а) Пръстеновиден магнит, съставен от пръчковиден магнит и две части от магнитно мек материал с форма на буквата L. б) Електричният аналог се състои от три кондензатора. Разстоянието между плочите на кондензаторите 1–2 и 3–4 е нула.

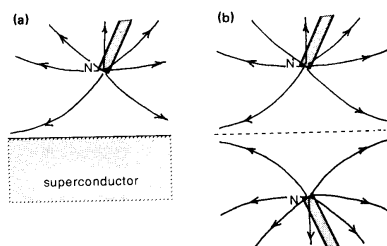
5. *Намагнитен сферичен слой*, фиг. 10. Външната повърхност носи северни магнитни полюси, а вътрешната повърхност – южни. Съответният електричен аналог представлява сферичен кондензатор, познат на всеки студент по физика. В пространството както от външната, така и от вътрешната страна на слоя няма магнитно поле. Интензитетите  $\vec{H}$ , съответно  $\vec{E}$ , са различни от нула само вътре в сферичния слой.





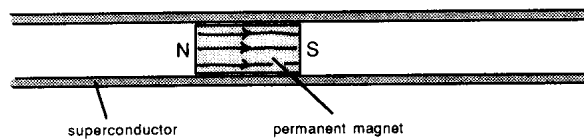
Фиг. 10: а) Намагнитен сферичен слой. Вътрешната повърхност носи южните магнитни полюси, външната – северните. б) Електростатичен аналог: две концентрични метални сфери, заредени с равни по големина и противоположни знаци заряди.

6. *Магнитен полюс в близост до плосък свръхпроводник*, фиг. 11, а. Полето е еквивалентно на полето от горната половина на фиг. 11, б. За да се получи разпределението от фиг. 11, б, разположението на полюса от фиг. 11, а е отразено огледално от повърхността на свръхпроводника, а самият свръхпроводник е заменен с полюса–изображение. С помощта на този втори полюс се симулират граничните условия на повърхността на свръхпроводника от фиг. 11, а и по-точно – фактът, че магнитните силови линии са успоредни на тази повърхност. За разлика от обикновения “метод на огледалните изображения” обаче, знакът на заряда на полюса–изображение е същият като на истинския магнитен полюс.



Фиг. 11: а) северен магнитен полюс близо да свръхпроводяща плоскост. б) Свръхпроводникът се заменя със северен магнитен полюс – изображение.

7. *Пръчковиден магнит в свръхпроводяща тръба*, фиг. 12. Къс цилиндричен постоянен магнит запълва плътно част от дълга свръхпроводяща тръба. Магнитните силови линии са само вътре в самия магнит. За да бъдат в съответствие с правила 6’ и 7’, тези линии трябва да са успоредни на оста на магнита. Няма магнитни силови линии на ляво от северния магнитен полюс и на дясно от южния магнитен полюс, тъй като там приносите на северния и на южния магнитен полюс се компенсират взаимно.



Фиг. 12: Цилиндричен постоянен магнит в дълга свръхпроводяща тръба.

## V. Заключение

Направени са няколко предложения за промени в уводния курс по електромагнетизъм с цел да се избегнат трудностите, които срещат студентите при решаване на задачи по магнетостатика. Накратко, тези предложения се свеждат до следното:

1. Не започвайте изучаване на магнетизма при наличие на среди с пара- и диамагнетизма, по-скоро започнете с феромагнитите и свръхпроводниците. Пара- и диа-

магнетизма са ефекти от порядъка на  $10^{-4}$  до  $10^{-6}$  и в първо приближение за магнетизма могат да се пренебрегнат.

**2.** При обсъждане на феромагнетиците не започвайте с хистерезиса, а с идеализираните магнитно меки и магнитно твърди материали. Съответните видове материали са: не магнитните, магнитно меките, магнитно твърдите и свръхпроводящите материали.

**3.** При обсъждане на магнитно твърдите и на магнитно меките материали използвайте векторите  $\vec{H}$  и  $\vec{M}$ , а не  $\vec{B}$  и  $\vec{M}$ .