

Ядрото на електродинмиката в училищния курс по физика

В методическата литература съществува единство по въпроса, че уравненията на Максвел принадлежат към ядрото на електродинмиката. По традиция във физическата литература обаче за тези уравнения се е установил терминът *основни закони на електродинмиката*. Обикновено като други компоненти на ядрото на една теория се разглеждат принципите за симетрия и инвариантност и свързаните с тях закони за запазване. Равнището на обучението в училище не позволява да се вникне достатъчно задълбочено в първите, а специфичният за електродинмиката закон за запазване (на електричния заряд) бе вече причислен към фундаменталните свойства на заряда. Поради тази причина в адаптирания модел на физична теория *понятията ядро и основни закони се отъждествяват*, като по-долу се използва второто, въпреки опасността от смесване на понятията основа на електродинмиката и основни закони на електродинмиката.

1. Основни закони на електродинмиката

Разгледаните дотук елементи на електродинмиката – фундаментални явления, понятия, експерименти и експериментални закони, принадлежат на нейната експериментална основа, установяването на повечето от тях е част от експерименталното равнище на познанието. Предстоящите разглеждания са вече от областта на теоретичното познание, което се реализира във формата на научни теории и има своите специфични закони. За разлика от емпиричните закони, теоретичните¹ "свързват величини, които не се поддават на непосредствено наблюдение. Това са закони, всеобщността и необходимостта на които не могат да бъдат получени в непосредствения опит.". Ролята на тези закони е широко осветлена в методологичното литература, тъй като те са най-важните елементи на научните теории. Сред теоретичните закони "особена роля играят фундаменталните теоретични закони, които нерядко наричат принципи на съответната научна система." (пак там).

Буквално същата мисъл е развита и в²: "В природонаучните теории ролята на аксиоми играят основните закони или принципи. За разлика от твърденията с частен характер или даже емпиричните закони, те изразяват най-съществените, определящи, инвариантни отношения между изучаваните явления. Много често такива закони се наричат теоретични, за да се различават от емпиричните, установяващи връзка между наблюдаемите свойства на явленията. Сред теоретичните закони много съществена роля играят фундаменталните теоретични закони, които нерядко наричат принципи на съответния научен отрасъл."

От приведените цитати следва, че за изясняване въпроса кои са основните закони на една теория е необходимо да се разгледат предварително подвъпросите за въвеждане на подходящи величини, които "не се поддават на непосредствено наблюдение", да се проследят особеностите на прехода от емпиричните към теоретичните закони и да се подбере подходящ критерий, който да определи кои измежду всички теоретични закони в дадената област (в случая – електродинмиката) е подходящо да се нарекат основни. По-долу започваме с изясняване на последния въпрос.

2. Основни закони на едно векторно поле

В методическата литература липсва определена, повече или по-малко общоприета класификация на законите, които се срещат в учебното съдържание, третиращо въпросите на електродинмиката. В този смисъл може да се приведат немалко примери, в които определението "основен" се употребява за указване ролята и мястото и на закона на Кулон, и на закона на Ампер, и на теоремата на Гаус, и на практически всеки закон, който носи името

¹ Друянов Л.А. *Место закона в системе категории материалистической диалектики*, М., Высшая школа, 1981.

² Рузавин Г.И. *Научная теория – логико-методологический анализ*, М., Мысль, 1978.

на своя откривател. Очевидно е, че при толкова много "основни" закони, информацията, която носи това определение става изчезващо малка, а самото определение, по същество – излишно. За част от тези закони, за четирите фундаментални експериментални закона, вече бе посочено, че когато разглеждаме електродинамиката като физична теория, те попадат в нейната експериментална основа.

Въпросът, който се разглежда тук е: възможно ли е да се намери признак, критерий, с чиято помощ измежду законите в една теория еднозначно да отделят такива, които да бъдат наречени основни закони. Разбира се, както и в другите аналогични случаи, задължително изискване, което се предявява към този критерий е той да не води до противоречие с досегашната практика, т.е. само да стесни кръга на законите, които ще наричаме основни, без в този кръг да се допуснат други, които никой автор не счита такива.

Когато въпросът се постави с подобна, най-голяма общност, едва ли може да се намери еднозначен отговор. Теорията на електромагнитните явления във вакуум, обаче, е не каква да е – тя представлява полева теория и характеристиките на електромагнитното поле са векторни полета. В този по-конкретен случай на поставения въпрос може да се даде положителен отговор – в качеството на търсения критерий може да се предложи следното твърдение, играещо ролята на определение за основен закон:

Основни закони на едно векторно поле се наричат количествените зависимости, свързващи само характеристики на източниците на полето и характеристики на самото поле.

(Ограничението въпросните количествени зависимости да съдържат само съответните характеристики е необходимо, за да се елиминират например всички интегрални представяния за интензитета на електричното и за индукцията на магнитното поле, в дясната страна на които освен плътностите на зарядите и токовете фигурира и разстоянието от съответния източник до точката на наблюдение.)

Въпросът за източниците на електромагнитното, на електричното и на магнитното полета бе разгледан при изясняване експерименталните основи на електродинамиката. По-долу ще бъдат разгледани въпросите за *характеристиките* на източниците и на полетата. Доколкото, обаче, във всички интересувани ни случаи става дума за векторни полета, т.е. полета, чиито локални характеристики имат векторен характер, дотолкова въпросът за основните им закони се решава от известната в математичната физика теорема на Хелмхолц. Тази теорема има две формулировки – локална и глобална (интегрална). Без да се спираме на условията, при които е валидна теоремата, ще припомним само нейното съдържание:

**Едно векторно поле е определено, ако познаваме
– неговите ротация и дивергенция,
т.е. векторните и скаларните му източници
(локална формулировка);
– неговата циркулация по произволна
затворена крива и неговия поток през произволна
затворена повърхнина (глобална формулировка).**

Оттук и от определението за основен закон следва, че и самите основни закони на векторните полета могат да се изразят в две форми: глобална и локална, като в първия случай те ще свързват потоци и циркулации с глобални характеристики на източниците, а във втория – дивергенции и ротации с локални характеристики на източниците.

Известно е, че ако се ограничим с използване само на обикновени функции (т.е. не използваме обобщени функции), глобалната формулировка на теоремата на Хелмхолц и съответно – на основните закони, е по-обща, тъй като е приложима за произволни по вид източници на полето (точкови, линейни, повърхнинни и обемни), докато локалната, въпреки много по-големите възможности, които предлага за решаване на практически задачи, е

неприложима за точкови и линейни източници (поради достатъчно силните особености на полето). Освен това глобалната форма е по-обща и поради факта, че от нея освен диференциалните уравнения на полето (които обикновено се схващат като израз на локалната) могат да се получат и съответните гранични условия (които също представляват локални връзки).

Наред с по-голямата си общност, обаче, глобалната формулировка има и важното дидактическо преимущество, че, поради недостатъка от знания по математика, необходими за разглеждане на локалната, тя е единствената, която може под някаква форма да се използва в училище. Наистина, локалната формулировка е във вид на частни диференциални уравнения, които, разбира се, нямат място в един училищен курс по физика. За разглеждане на граничните условия не са необходими знания от висшата математика, но въпреки това и те не се включват в учебното съдържание в училище, тъй като с това не се разширява съществено кръгът от решимите практически проблеми.

И така, предвид теоремата на Хелмхолц, отговор на въпроса кои са основните закони на полетата ще получим след едно по-системно разглеждане на въпроса за характеристиките на полетата и техните източници.

3. Локални и глобални характеристики на полетата и на техните източници

Още Максвел отбелязва³, че първа крачка в страната на непознатото е разработването на математически понятия, които описват познатата теория толкова просто, колкото това е възможно. Именно от тази гледна точка следва да се оценяват въвежданите във всеки раздел на училищния курс по физика величини. За различни цели те могат да се класифицират по различни признаци. За интересувания ни случай е съществено, че всички величини могат да се разделят в две големи групи. Към първата, групата на *локалните величини*, принадлежат онези, които са дефинирани в определена точка на пространството, а към групата на *глобалните характеристики* – величините, които се дефинират върху определена крива, повърхнина или в дадена област.

Ще обърнем внимание върху един съществен и до сега неотбелязван в методическата литература факт, а именно, че като правило в училищния курс по физика за полето се въвеждат и използват локални характеристики, но за източниците му – глобални характеристики. Наистина, в общозадължителната подготовка като източник на електростатичното поле се разглеждат зарядите q на телата, а това, според дадените по-горе определения, са глобални величини – те характеризират телата като цяло. Само в свободноизбираемата подготовка се въвежда и локалната характеристика повърхнинна плътност σ на зарядите, като на практика тя се използва само за заряди по повърхността на проводници. По подобен начин като източник на стационарното магнитно поле се разглеждат големините J на токовете по проводниците, които също са глобални величини, защото се определят от количеството заряд, преминал за единица време през напречното сечение на проводника. (Локални характеристики на токовете за сега не се въвеждат дори в свободноизбираемата подготовка.)

В същото време и трите характеристики на полетата, които се въвеждат в общозадължителната подготовка – интензитетът E и потенциалът ϕ на електричното, и индукцията B на магнитното поле, са локални характеристики. (Електричното напрежение U , което в общия случай е глобална характеристика, в училище, където се изучават предимно консервативни полета, се оказва биллокална величина, т.е. такава, която зависи от две точки – началната и крайната.) Единствената глобална характеристика, която се въвежда в общозадължителната подготовка, е потокът Φ_B на магнитното поле през произволна повърхност (без нея е невъзможно да се разгледа законът на Фарадей за електромагнитната

³ Frank Philipp *Phylosophy of Science*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

индукция). Останалите глобални характеристики на полетата – циркулациите Γ_E и Γ_B на електричното и на магнитното поле по дадена крива и потокът Φ_E на електричното поле през дадена повърхнина, в общозадължителната подготовка не се въвеждат. Въпросното деление на характеристиките се вижда на приведената тук таблица.

Таблица
за характеристиките на полето и на неговите източници

Характеристики	Локални	Глобални
На източниците на полето	1. Обемна плътност на заряда – k 2. Обемна плътност на ток – I	1. Заряд на тяло – Q 2. Ток – J
На полето	1. Интензитет на електричното поле – E 2. Индукция на магнитното поле – B	1. Поток на електричното поле – Φ_E 2. Циркулация на електричното поле – Γ_E 3. Поток на магнитното поле – Φ_B 4. Циркулация на магнитното поле – Γ_B

От таблицата се вижда и **основното противоречие**, с което се сблъскваме при опита да въведем в училищния курс основните закони на полетата: в училище изграждаме една **нехомогенна** понятийна система. Тя включва *глобалните* характеристики на източниците (Q и J), но вместо съответните им глобални характеристики на полетата Φ_E , Φ_B , Γ_E и Γ_B – въвеждаме *локалните* (E и B).

Избраният по-горе критерий за определяне на основните закони изисква в едно равенство да се свържат характеристики на полето и характеристики на източниците му. Ясно е, обаче, че в едно равенство не могат да се свържат например глобални характеристики на полето с локални характеристики на източниците (или обратно) – величините трябва да бъдат от един и същи вид. И понеже вече бе отбелязано, че локалната форма на основните закони далеч надхвърля училищните възможности, единствената възможност да се включат тези закони в учебното съдържание е да се "хомогенизира" съвкупността от характеристиките на полето и източниците му, като се въведат всички глобални характеристики на полето.

За разлика от чуждата методическа литература, у нас липсват разработки по въпроса за въвеждане на глобалните характеристики на електромагнитното поле. Тук отделяме известно място на въпроса за въвеждане и осмисляне на величините Φ_E , Γ_E и Γ_B (опит във въвеждането на Φ_B вече е натрупан). Към този въпрос може да се подходи от гледна точка на необходимостта "да се търсят все по-кратки знакови форми за изразяване на огромни по своята съдържателна ценност знания...", за да може "да се усвояват максимум знания чрез минимум изразни средства"⁴. За случая на векторните полета в качеството на подобни *кратки знакови форми* могат да се разглеждат глобалните характеристики на полетата. Именно те са най-подходящите "величини, които не се поддават на непосредствено наблюдение" (вж. източника, цитиран под номер 1), в термините на които могат да се формулират основните закони. Голямото тяхно преимущество от гледна точка на училищната практика е скаларният им характер, който в това отношение контрастира с векторната природа на локалните характеристики на полетата, която природа затруднява разбирането и усвояването на основните закони и свойства на полетата. (Разбира се, тези твърдения в никакъв случай не следва да се схващат като призив за изхвърляне на локалните характеристики от учебното съдържание – става дума освен тях да се използват и глобалните.)

⁴ Андреев М. *Дидактика*, С., Народна просвета, 1987.

Както бе вече отбелязано, въпросът за въвеждане на величината поток на векторно поле през определена повърхнина се разглежда за магнитното поле във връзка със закона на Фарадей за електромагнитната индукция. Това подготвя почвата за въвеждане по аналогия и на величината поток на електричното поле през повърхност, която величина е необходима за разбиране на закона на Максвел за тока на отместване. До сега в училище се обръща внимание преди всичко на геометричното тълкуване на тези величини – като брой векторни (съответно силови или индукционни) линии, пресичащи повърхността. Смисълът на потока, обаче, може да се изясни и от друга гледна точка, когато той се разглежда като произведение от лицето на повърхността и средната стойност на нормалната компонента на векторното поле спрямо повърхността. Именно подобно разглеждане, за разлика от нагледно – геометричното, дава възможност за практическото използване на величината поток при решаване на количествени задачи.

Въпросът с въвеждането на втората глобална характеристика на векторните полета – тяхната циркулация Γ , е по-труден, защото за разлика от потока, днес в общозадължителната подготовка не се използва циркулацията на никое поле. Като величини циркулациите на електричното и на магнитното поле се въвеждат в пособията за свободноизбираема подготовка и за изучаване на физиката на второ равнище. И в този случай, обаче, се набляга върху математическата дефиниция на величината (като сума) и на физическия ѝ смисъл, който в случая на силови полета е ясен – циркулацията Γ е пропорционална на работата на съответната сила при преместване на заряд или магнитен полюс по кривата. Тази дефиниция и съответното тълкуване не предоставят удобен апарат, който може да послужи за пресмятане на циркулации в конкретните случаи. Ето защо по-удачно е циркулацията да се разглежда като произведение от дължината на кривата и средната тангенциална компонента на векторното поле по нея.

Изложеният подход към въвеждането на величините поток Φ и циркулация Γ използва понятията средна нормална компонента спрямо една повърхност и средна тангенциална компонента спрямо крива. Тъй като случаите, които се разглеждат в училище, обикновено обхващат относително прости криви и повърхности (части от прави, окръжности, равнини, цилиндри, сфери и пр.), не е трудно да се съобрази колко са средните стойности на въпросните компоненти и по такъв начин въведеният апарат вече става работещ – той се използва не само за формулиране на основните закони, но и за решаване на важни задачи.

4. Относно прехода от емпирични към основни закони

Както вече бе отбелязано, преходът от емпирични към основни закони е една нетривиална операция, имаща важно методологично значение, поради което следва да ѝ се отдели подобаващо внимание. Доколкото тя се осъществява по различен начин при първата и при втората двойка от фундаменталните експериментални закони, по-долу отделяме специално внимание на първия случай.

4.1. Полева формулировка на законите на Кулон и Ампер

При построяване теорията на електромагнитните явления може да се смята, че с установяване на законите на Кулон и Ампер (за магнитната сила) започва краят на емпиричния етап в познанието и същевременно се прави първа стъпка към етапа на теоретичното познание. Докато първата част от това твърдение е очевидна, втората се нуждае от известно пояснение. Наистина, според очертаната от самия Максвел схема, след установяване на основните експериментални факти трябва да се въведат подходящи математически понятия, с които да се изразят следствията от тези закони, а това вече е етап от теоретичното познание. Както бе отбелязано по-горе, адекватни на училищните нужди

такива понятия са глобалните характеристики на полетата и техните източници. С тяхна помощ като директни теоретични следствия от закона на Кулон се извеждат две твърдения:

– циркулацията на електростатичното поле по всяка затворена крива е нула, т.е.:

$$(4,1) \quad \Gamma_E = 0;$$

– потокът на електричното поле през всяка затворена повърхност е равен на деления с електричната константа ϵ_0 заряд, заграден от повърхността:

$$(4,2) \quad \Phi_E = Q/\epsilon_0.$$

(теорема на Гаус).

По подобен начин от закона на Ампер за магнитната сила също следват две твърдения за магнитното поле:

– циркулацията на стационарното магнитно поле по всяка затворена крива е равна на умножения с магнитната константа μ_0 общ ток, обхванат от кривата:

$$(4,3) \quad \Gamma_B = \mu_0 J$$

(закон на Ампер за тока);

– потокът на магнитното поле през произволна затворена повърхнина е нула

$$(4,4) \quad \Phi_B = 0.$$

Известно е, че от физична гледна точка (4,1) и (4,2) в съвкупност са еквивалентни на експерименталния закон на Кулон, т.е. както те могат да се изведат от него, така и той може да се изведе от тях. Същото може да се каже и за другите два закона – (4,3) и (4,4) са еквивалентни на закона на Ампер за магнитната сила. Именно от тази гледна точка представянето на законите на Кулон и на Ампер във вида, съдържащ се в равенствата от (4,1) до (4,4) може да се разглежда като първи етап на теоретичното познание за електромагнитните явления. Замяната на емпиричните закони, чиято първоначална форма съдържа механични величини като сили и разстояния, с техните теоретични следствия, формално представлява смяна на езика, на апарата, но именно тази смяна, този преход към използване на полеви понятия е онази първа крачка към теоретичното познание, която Максвел описва като "опростяване и редуциране на резултатите от предишните изследвания до една форма, в която съзнанието вече може да ги обхване. Резултатите от това опростяване може да вземат форма на чисто математическа формула или на физична хипотеза." (цит. по източника с номер 3). В случая резултатите са представени във вид на четири формули, всяка със своето дълбоко физично съдържание, за което ще стане дума по-нататък.

4.2. Методологична страна на прехода от експериментални към основни закони

В 4.1 бяха разгледани само първите два от фундаменталните експериментални закони на електродинамиката, върху които се изграждат електростатиката и теорията на стационарното магнитно поле. При явленията, наблюдавани при променливи източници, се установяват още два фундаментални експериментални закона – законът на Фарадей за електромагнитната индукция

$$(4,5) \quad \Gamma_E = -\frac{d\Phi_B}{dt},$$

и законът на Максвел

$$(3,4,6) \quad \Gamma_B = \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt},$$

като условността в определението "експериментален" за закона на Максвел бе вече изяснявана. Вижда се, че формулировката на тези закони е направо в полеви термини, поради което не се налага, както при първите два закона, съдържанието им да се превежда от един език на друг. Оттук следва и отбелязаната вече тяхна двойствена роля: според един критерий те следва да се отнесат към фундаменталните експериментални закони, а в същото време според друг – те представляват и основни теоретични закони, тъй като се формулират в термините на глобалните характеристики на полето. Разбира се, това не е преимущество на

предлаганата класификационна схема, но едва ли е и фатален недостатък – то в края на краищата още веднъж показва, че идеални схеми не съществуват.

Теорията на електромагнитните явления, обаче не се свежда до механично обединение на експерименталните закони. Тук се натъкваме на един проблем, който често се определя като централен проблем на философията на науката – как да се направи преходът от фактите на сетивното познание, от всекидневния опит към общите научни принципи. Класиците на физиката нееднократно се спират на този въпрос и едно от най-ясните твърдения по него принадлежи на Айнщайн⁵, според който към фундаменталните закони на физиката "води не логически път, а само основаната на проникването в същността на опита интуиция." (тук терминът фундаментален закон се употребява в смисъла, който ние влагаме в термина основни закони). Отново Айнщайн формулира⁶ и "основната антиномия на теоретическото познание: теорията се ражда от опита и заедно с това не от опита."

Постановката, че основните положения на една теория не могат да се изведат нито дедуктивно (защото сами по себе си представляват максимално общи обобщения и не съществуват други, по общи от тях, от които да се изведат логически), нито индуктивно (въпреки че се опират на опитни факти, защото винаги е налице и творческият момент – озарението) се застъпва и в редица учебници, които обръщат внимание на методологическата страна на проблемите. Така например в⁷ се подчертава, че: "Основните принципи на една нова теория не следват по единствен начин от опита – те винаги включват един творчески акт, един скок на въображението – а в началото са неорганизираните данни от външния свят и тези важни неща се прикриват, когато физиката се представя като логическа структура, изградена от еднозначни отговори на ясно поставени въпроси." Като се вижда от този пространен цитат, ударението се поставя върху необходимостта в обучението да се разкрива въпросният скок, прекъснатостта в логиката на изграждането на теорията.

Конкретно за случая на електродинамиката разглежданият проблем многократно се дискутира и в методичната литература. Така например в⁸ се подчертава необходимостта "да се покаже на учащите се, че първо, основа на общите закони на електродинамиката са не логически разсъждения, а опитни факти и, второ, че най-общите количествени съотношения на електродинамиката не се извеждат, а представляват обобщена формулировка на наблюдаваните физически закономерности."

При изграждането на електродинамиката прекъснатостта в логиката се разкрива най-ясно при прехода от теория на стационарните към теорията на променливите полета и по-конкретно - при тока на отместване, въведен в теорията благодарение на интуицията на Максвел. Поради тази причина, например, основните закони на електродинамиката – уравненията на Максвел, се сочат като класически пример за математическа.

Наред с логически скок, обаче, преходът от експерименталното към теоретичното познание притежава още една особеност, добре подчертана в⁹: "...теорията не се получава, нито може да се получи от експеримента. Тя е мислена крачка в абстрактното и общото, постулирайки валидност в бъдещето за всички опити, включително и тези, които никога не са били направени в миналото." Към това може да се добави само, че освен постулиране на общовалидност във времето, теорията постулира общовалидност и по отношение на мястото – т.е. валидност на законите навсякъде във Вселената, дори и там, където опити не са правени и най-вероятно никога няма да бъдат правени.

⁵ Эйнштейн А. *Собр. научных трудов*, т.4, М., Наука, 1965.

⁶ Эйнштейн А. *Физика и реальность*, М., Наука, 1965.

⁷ French A.P. *Some thoughts on introductory Physics courses*, Am.J.Phys., e56 (2), p.110.

⁸ Вольштейн С.А. *Элементы Максвелловской электродинамики в школе*, Минск, Народная асвета, 1973.

⁹ Rohrlich F. *Classical Charged Particles*, Addison - Wesley publishing company inc., Reading, Massachusetts, Syracuse, N.Y., 1964.

Тази особеност на прехода от емпирично към теоретично познание като правило също се скрива в процеса на обучение, а отбелязването ѝ не изисква почти никакви допълнителни усилия – достатъчно е при прехода към променливи полета да се подчертае, че за законите (4,2) и (4,4), установени в два частни случая (електростатика и стационарно магнитно поле), постулативно приемаме, че запазват валидността си и в най-общия случай на променливи полета.

5. Уравненията на Максвел – основни закони на електромагнитното поле

От предложеното в началото определение следва, че като основни закони на електродинамиката следва да се разглеждат уравненията на Максвел, които, от гледна точка на структурата на теорията, представляват нейното ядро. Коментирани в особености на прехода от емпирично към теоретично знание налагат да постулираме валидността на две от теоретичните следствия на законите на Кулон и Ампер (за магнитната сила), а именно тези, съдържащи се в равенствата (4,2) и (4,4) и за случаите на променливи полета. От друга страна е ясно, че при променливите полета равенство (4,1) трябва да се замени с фундаменталния експериментален закон на Фарадей за електромагнитната индукция (4,5), а съгласно хипотезата на Максвел, към дясната страна на (4,3) трябва да се добави и токът на отместване от (4,6), т.е. (4,3) да се замени с т.нар. *обобщен закон на Ампер за тока*. По такъв начин достигахме до уравненията на Максвел в тяхната глобална форма със съответният им математически прочит:

$$(5,1a) \quad \Gamma_E = -\frac{d\Phi_B}{dt},$$

т.е. – циркулацията на електричното поле по произволна затворена крива е равна на взетата със знак минус скорост на промяната на магнитния поток, заграден от кривата;

$$(5,1б) \quad \Gamma_B = \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 I,$$

т.е. – циркулацията на магнитната индукция по произволна затворена крива е равна на умножената с μ_0 сума от тока на зарядите и тока на отместване, обхванати от кривата;

$$(5,1в) \quad \Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0} Q,$$

т.е. – потокът на електричното поле през произволна затворена повърхност е равен на разделения с ϵ_0 заряд, заграден от повърхността;

$$(5,1г) \quad \Phi_B = 0,$$

т.е. – потокът на магнитната индукция през произволна затворена повърхност е нула.

Докато приведените словесни формулировки са напълно еквивалентни на съответните математически равенства, на основата на локалната форма на уравненията съществува и друг прочит на математическото съдържание на основните закони, който, обаче акцентува на качествената страна на зависимостите. Съгласно този прочит:

$$(5,2a) \quad \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

изразява, че промените на магнитното поле с времето са векторни източници, т.е. определят вихрите на електричното поле, поради което създаденото от тях електрично поле е вихрово;

$$(5,2б) \quad \text{rot} \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \vec{I}$$

изразява, че промените на електричното поле с времето (токът на отместване) и движението на зарядите (обикновените токове) са векторни източници, т.е. определят вихрите на магнитното поле, поради което създаденото от тях магнитно поле е вихрово;

$$(5,2в) \quad \operatorname{div} \vec{E} = \frac{k}{\epsilon_0}$$

изразява, че електричните заряди са скаларни източници на електричното поле;

$$(5,2г) \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0$$

изразява, че магнитното поле няма скаларни източници.

Избраният начин за представяне на уравненията на Максвел илюстрира два важни методологични принципа, експлицирането на които е съществен момент в обучението. Първият от тях е принципът на съответствието, чиито смисъл изисква всяка по-обща теория да съдържа в себе си по-частната, указвайки границите на приложимостта на последната. Наистина, в случая е очевидно, че когато полетата са статични или стационарни, т.е. когато $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0$ и $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$, (5,1а) и (5,1б) преминават съответно в (3.4,1) и (3.4,3), както изисква този принцип. По такъв начин се потвърждава важната особеност на теоретичните закони, която се изразява в това, че те в неявен вид съдържат в себе си съответните емпирични закономерности, които могат да бъдат изведени от тях. С други думи, докато от емпиричните закони към теоретичните има прекъсване в логиката на изводите, по обратния път логиката е безупречна.

От тази гледна точка може да се оцени и ролята на глобалните закономерности (4,1), (4,2), (4,3) и (4,4) при изграждането на електродинамиката – те служат като своеобразно междинно звено, разположено между експерименталните закони от една страна и основните закони на теорията – от друга.

Вторият от споменатите по-горе принципи е принципът на последователните обобщения, съгласно който историческият път на изграждане на теориите е пътът от частното към общото, от по-простите към по-сложните явления. Наистина, до уравненията на Максвел в училищния курс достигахме, тръгвайки от най-простия случай на електрични взаимодействия на неподвижни заряди (закони (4,1) и (4,2)) и минаваме през стационарните магнитни взаимодействия (закони (4,3) и (4,4)), за да стигнем до най-общия случай на променливи полета, описвани с уравненията (5,1). Липсата на последователен логически път от експерименталните закони до тези уравнения означава, че всъщност ние ги постулираме и с това повдигахме следващия въпрос – въз основа на какво им вярваме. Разбира се, тук би могло да се отговори както в източника, цитиран под номер 3 "В "логиката на науката" по отношение на общите принципи има значение не начина, по който достигахме до тях по индукция, а пътят, по който получаваме останалата част на науката от тях чрез дедукция." Далеч по-съдържателен резултат в училище бихме постигнали, ако намерим форма да изясним (пак там), че "Съществуват два критерия за признаване истинността на един научен принцип. Единият, използван в древността и средновековието - ако той е логическо следствие от друг разбираем принцип. Другият критерий, използван в днешната наука е да се получат от него резултати, следствия, които могат да бъдат проверени опитно. Вторият критерий не е никога убедителен докрай: той утвърждава, че принципът може да бъде верен, но не, че трябва да бъде верен. Защото едни и същи резултати може да се обяснят с различни принципи. Тогава експерименталните резултати не казват кой от принципите е верен."

Разбира се, приведенният цитат страда от недостатъка, че визира само единия вид следствия от принципите или от теориите – *обяснителните*. Същото важи, обаче, и за другите, *предсказателни* следствия – никога няма сигурност, че едно явление, предсказано в една теория, не може да се предскаже и от друга. С това всъщност се поставя въпросът за единствеността на уравненията на Максвел като система, която адекватно отразява закономерностите на електромагнитните явления, въпрос, който очевидно ще стои винаги открит. Важното в случая е, че електродинамиката на Максвел издържа проверката и на двата критерия за вярност, формулирани в 3. Наистина, уравненията (5,1) могат да бъдат

получени от принцип, който е по-разбираем (или най-малкото – по-общ) от тях – например чрез вариационния принцип от подходящ Лагранжиан, а и всички техни следствия до днес са в съгласие с опитните резултати. (Разбира се, предмет на разглеждане в училище може да бъде само вторият критерий.)

5.1. За възможността за включване основните закони на полето в учебното съдържание

Предишните разглеждания показват, че в глобалната си форма основните закони на електромагнитното поле представляват твърдения, засягащи такива абстрактни понятия като поток и циркуляция на векторно поле. Изразите на тези закони (формули от (4,1) до (5,1)), макар и твърде прости по вид, са по същество доста сложни, тъй като знаковите форми, свързани с въпросните понятия, са натоварени с твърде голямо количество информация. Всичко това поставя остро въпроса: доколко и по какъв начин може да се изучават основните закони на електродинамиката в училище?

Общо взето, сред специалистите по методика на обучението преобладава мнението, че в средното училище трябва да се представят поне основните идеи, съдържащи се в уравненията на Максвел. Това личи например от казаното в¹⁰: "Общонаучната математична подготовка на учениците не дава възможност в училище да се изучават уравненията на Максвел без вулгаризация. Но на десетокласниците е необходимо да се разкрият основните идеи на Максвел в достъпна за тях форма и в съвременни представи." Този цитат се отнася до общозадължителната подготовка. Едно изложение на идеите на Максвел намираме както в нашите учебници от 70-те години, в редица руски и западни учебници. Доколкото нашите разглеждания не се ограничават с възможностите на общозадължителната подготовка, обаче, по нататък ще се спрем на въпроса и кои от важните, принципни следствия на уравненията на Максвел могат да бъдат разгледани в избираемите форми на обучение. В противен случай, ако се ограничим само с идеите на уравненията и не покажем поне няколко примера, в които тези уравнения работят, в силно мотивираните да изучават физика ученици неизбежно ще остане определено чувство за неудовлетвореност. За съжаление, глобалната форма на уравненията, която сме принудени да излагаме в училище, не дава достатъчно възможности в тази насока, но това е неизбежната цена, която трябва да се плати за отказа от локалната формулировка на теорията.

5.2. Качествени еквиваленти на основните закони

Основните закони изразяват връзките между характеристиките на полето и характеристиките на неговите източници. По-горе бяха приведени глобалната и локалната форми на съответните уравнения ((5,1) и (5,2)) и съответния математически смисъл, който те съдържат, като в локалния случай той бе изложен само на едно качествено равнище. Ясно е, обаче, че и първият, и вторият вид твърдения са просто словесен прочит на уравненията и заучаването или възпроизвеждането им не говори в никакъв случай за разбиране идеите на Максвел, ако няма увереност, че е ясен смисълът на употребените термини.

Доколкото в обучението, особено когато се има предвид общообразователният минимум, не е задължително да се преследва пълно усвояване на количествената страна на зависимостите, трябва да се обърне внимание и на възможностите за изясняване на качествената страна на основните закони. Идеята за използване на подобни качествени формулировки, разбира се, не е нова и нейното значение например за обобщаване на частните прояви на полето е обсъждана нееднократно.

¹⁰ *Методика преподавания физики в средней школе*, Под ред. С.Е. Каменецкого и Л.А. Ивановой, М., Просвещение, 1987.

Съществуват две възможности – първо, да се изясни онова, което в методическата литература се нарича физичен смисъл на законите и, второ, да се използват геометрични нагледни.

5.2.1. Физичен смисъл на основните закони

Когато се обсъжда физичният смисъл на основните закони, най-често се има предвид идейната им страна. Изясняването на този смисъл изисква разглеждане преди всичко на въпроса в какви термини следва да се изразяват връзките между характеристиките на полето и източниците му. В това отношение като че ли нещата са ясни поне що се отнася до уравненията за потоците на магнитното и електричното поле ((4,2), (4,4), (5,1в и г)).

Общоприето е като физичен смисъл на равенството $\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0} Q$ да се разглежда твърдението, че електричните заряди са източници на електричното поле в смисъл, че те създават полето. По аналогичен начин физичният смисъл на другият основен закон, за потока на магнитното поле – $\Phi_B = 0$, е, че не съществуват магнитни заряди.

Доста по-сложен е въпросът с термините, които трябва да се използват при изясняване смисъла на законите за циркулациите. Безспорно тук е само тълкуването на тока J в (5,1б) като източник на магнитното поле. Усложненията са свързани с тълкуванията ролята на членовете, свързани с промените на магнитното (в (5,1а)) и на електричното поле (в (5,1б)). На пръв поглед проблемът изглежда терминологичен, но фактически е значително по-дълбок.

В рамките на класическата електродинамика причинно-следствените връзки не са така праволинейно ясни, както изглежда първоначално. Известно е например, че в различни периоди различни фактори са считани първични – най-често зарядите като причина за полето, но нерядко и зарядите – като особени точки на полето. Именно това прави рисковано използването езика на причинно-следствените връзки (т.е. глаголи от рода на създава, поражда, предизвиква и др.п.). Известно е, че едва квантовата електродинамика изяснява в какъв смисъл зарядите са източници на полето, т.е. на виртуалните фотони, посредством които се осъществява взаимодействието на зарядите. На равнището на класическата физика, обаче, проблемът допуска различни тълкувания.

Най-последователна е позицията, защитавана в¹¹, където се отрича ролята на промените на магнитното и на електричното поле като източници съответно на магнитното и на електричното: "Грешка е да се интерпретира това уравнение (става дума за (5,2а) – б.м.)

като означаващо, че $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ е причина, а $rot \vec{E}$ – следствие. \vec{E} и $rot \vec{E}$, както и \vec{B} и $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ са все

ефекти; причините са k и \vec{I} . От тази гледна точка е по-добре уравнението да се запише във

вида $rot \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$. Причината, поради която то обикновено се записва като уравнение за

$rot \vec{E}$ е, че, като едно от четирите уравнения на Максвел, ...то очевидно следва изискванията на теоремата на Хелмхолц, въпреки че в действителност векторните източници не са дадени." Поради тези съображения авторът интерпретира закона на Фарадей за

електромагнитната индукция нетрадиционно: според него разпределението и движението на

зарядите има два ефекта (две следствия) – единият е $rot \vec{E}$, а другият – $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$, като двата

взаимно се компенсират ($rot \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$).

¹¹ Shadowitz A. *The Electromagnetic Field*, Mc Graw-Hill, N.Y., 1975.

Всъщност, че промените на полетата с времето не са източници на електромагнитното поле най-ясно се вижда при запис на основните закони в релативистично ковариантен вид, когато равноправието между производните по времето и тези по пространствените променливи е очевидно. Затова автори, които държат на прецизността на изразните средства, когато описват отношението между промените с времето и полетата, често използват неутрални изрази като например¹² "променливото електрично поле се съпровожда от магнитно поле" или "променливото магнитно поле се оказва свързано с електрично поле".

Въпреки тези съображения, обаче, в учебната литература исторически се е утвърдил един начин за изразяване на отношението между промените на полетата с времето и самите полета, който, макар и не прецизен, е по-нагледен, без да води до някакви заблуждаващи представи. При него се счита, че промените на едното поле (електричното или магнитното) пораждат, създават, предизвикват поява, водят до възникване, възбуждат и др.п. другото поле. Очевидно е, че въпреки всички теоретични съображения, при толкова дълбоко вкоренена традиция, за изразяване физическия смисъл на основните закони на полетата трябва да се използва установения начин. (Много по-добре би било, ако например се използва по-неутрален начин на изразяване, например "че с всяко променливо с времето магнитно поле е свързано електрично поле" (вместо "поражда", "създава" и пр.), но ако начинът на изразяване трябва да се променя, за да се изрази по-точно същността на явленията, това не може да започне от училищния курс по физика – необходимо е това да стане на по-високо равнище, например в университетските курсове, с които се готвят бъдещите учители по физика.)

И така, от тази гледна точка физическият смисъл на основните закони е както следва:

- на (3.5,1а) – че променливото магнитно поле създава (е източник на) вихрово електрично поле;
- на (5,1б) – че променливото електрично поле и токовете, предизвикани от движещи се заряди създават (са източници на) вихрово магнитно поле;
- на (5,1в) – че електричните заряди създават (са източници на) електрично поле;
- на (5,1г) – че не съществуват магнитни заряди.

Ясно е, че тези твърдения не са напълно еквивалентни на законите, защото не съдържат количествените отношения, но те изразяват именно *идеите*, заложиени в тези закони.

(Следва да се припомни, че навсякъде в приведените разсъждения термините електрично поле и магнитно поле следва да се разбират в смисъл на локални функции $\vec{E}(\vec{r}, t)$ и $\vec{B}(\vec{r}, t)$, които определят силово въздействие.)

5.2.2. Геометричен смисъл на основните закони

Идеите на основните закони могат да се изразят и на геометричен език, т.е. в известен смисъл можем да говорим за геометричен смисъл на тези закони. В този случай се използва възможността за онагледяване на векторните полета посредством векторни линии, при което се спазват определени правила по такъв начин, че от картината на тези линии се добива представа както за посоката, така и за големината на полето във всяка точка на пространството. Основните закони на полетата дават информация за това от кои точки започват векторните линии, какъв е видът им, около кои направления се закривяват.

В този смисъл отделните основни закони изразяват съответно:

- (5,1а) – че променливото магнитно поле създава *вихрово* електрично поле, чиито затворени силови линии обхващат посоката на промяната на електричното поле и са така

¹² Парселл Э. *Електричество и магнетизм*, М., Наука, 1975.

насочени, че гледано срещу тази посока, ориентацията им е по посока на движение на часовниковите стрелки;

– (5,1б) – че токовете и променливото електрично поле създават *вихрово* магнитно поле, чиито затворени индукционни линии обхващат посоката на тока и посоката на промяната на електричното поле така, че гледано срещу тази посока, ориентацията им е противоположна на посоката на движение на часовниковите стрелки;

– (5,1в) – че силовите линии на електричното поле, създадено от зарядите имат начало и край като започват от положителни и завършват върху отрицателни заряди;

– (5,1г) – че индукционните линии на магнитното поле нямат начало и край.

Вижда се, че и тук става дума само за качествен израз на основните закони, но този израз е особено нагледен и подходящ за използване в училище, особено в общозадължителната подготовка. Разбира се, първите две твърдения (свързаните със (5,1а и б)) може да не се изказват пълно, като последните им части, засягащи ориентациите на векторните линии се пропуснат. Лесно се забелязва, че всички тези твърдения в една или друга форма и днес се изучават в училище. Те, обаче, се поднасят във форма, която не съответства на мястото им в теорията – вместо да се идентифицират като основни закони или като нещо, тясно свързано с основните закони, те най-често се причисляват към свойствата на съответното поле. Разбира се, не може да се каже, че подобно представяне е погрешно, но когато става дума за изясняване структурата на теорията, те трябва да се назоват така, както се полага – като изрази на основните закони на езика на силовите, съответно на индукционните, линии.

6. Терминологичният проблем

Както и в други случаи, в научната, методическата и в учебната литература няма единство в терминологията, свързана с основните закони на полетата. Това пролича и в редица от приведените дотук цитати. За едни автори те са "фундаментални закони на електричеството и магнетизма", за други – "фундаментални положения на електродинамика" или "водещи принципи". При това, като правило, авторите нито правят опит да обосноват използваните квалификации, нито се стараят да бъдат особено последователни при употребата им. Липсата на общоприето виждане по въпроса кои закони следва да се считат основни води и до по-съществени грешки, както например причисляването към основните закони на електродинамика и на материалните връзки ($D = \epsilon\epsilon_0 E$ и т.н.), които очевидно страдат от липса на общност и са валидни само за линейни среди.

Въпросът дали трябва да се говори за закони или за принципи няма решение. Както вече бе отбелязвано, редица автори отбелязват, че разликата между закон и принцип е по-скоро терминологична, отколкото принципна, че понятията закон и принцип на науката са едностепенни и трудно различими и др.п. От тази гледна точка е ясно, че четирите уравнения на Максвел, които са математичен израз на основните закони на електромагнитното поле и съставляват ядрото на класическата електродинамика, представляват всъщност принципите на електродинамика, че последната, както механиката, както термодинамиката, се гради по метода на принципите и само традицията е наложила термина *уравнения на Максвел*, а не "принципи на Максвел". Подобна трактовка не е нова и има широка подкрепа в литературата, посветена на методологията на науката. Така например в¹³ уравненията на Максвел се разглеждат като "...математическа формулировка на основните постулати или "аксиоми" на класическата електродинамика, играещи същата роля, която в класическата механика играят законите на Нютон."

Опит за обосновка на терминологията се намира например в източника, цитиран под номер 1, се предлага онези теоретични закони, които влизат в ядрото на теорията, да се

¹³ Джексон Дж. *Класическая электродинамика*, М., Мир, 1965.

наричат фундаментални закони. Предложението е логично и според него уравненията на Максвел би трябвало да се наричат фундаментални закони на електродинамиката. Тук тази терминология не се възприема, защото при използването ѝ настъпва смесване между фундаменталните експериментални закони и тези просто фундаментални закони. Не е целесъобразно да се отстъпва от предложението законите на Кулон, Ампер и Фарадей да се наричат фундаментални експериментални закони заради опасността по този начин те да се разтворят в множеството други експериментални закони и да не се открие ясно ролята им за изграждането на теорията.

Поради тази причина дотук и по-долу за въпросните закони се използва названието *основни закони на полетата*. Споменаването на полетата в названието подчертава, че това са теоретични закони, а определението *основни* показва, че от тях следват всички свойства на полетата.

6.1. Относителност на понятието *основни закони на полето*

В 4.2 вече бе обърнато внимание на факта, че поради полевата си формулировка законът на Фарадей за електромагнитната индукция може да се разглежда едновременно и като фундаментален експериментален закон, и като основен закон на електромагнитното поле. Друг аспект на относителността на понятието *основен закон* се разкрива, когато разглеждаме един закон веднъж в рамките на една частна теория и втори път – в рамките на някоя по-обща теория. Този аспект проличава в следните два примера.

Електродинамиката е физичната теория, обхващаща всички електромагнитни явления. В нея, обаче, могат да се обособят и се обособяват по-частни теории, които се занимават например само със статичните или само със стационарните явления. Така например, разгледана отделно, електростатиката представлява самостоятелна физична теория и в нейните рамки също може да се говори за фундаментален експериментален закон (законът на Кулон) и за основни закони на електростатичното поле. В този случай теоремата на Гаус ($\Phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0}$) и твърдението за консервативност на полето ($\Gamma_E = 0$) играят роля на

основни закони на електростатиката и следователно представляват ядрото на електростатиката. В същото време, разгледани в рамките на цялата електродинамика тези твърдения представляват просто преформулиране на фундаменталния експериментален закон на електростатиката (закон на Кулон) от езика на механиката, който си служи със термини като сила, разстояние, скорост и пр., в полеви термини (потоци, циркулации и др.). В този случай те следва да бъдат причислени към основата на електродинамиката.

По същия начин в теорията на стационарните магнитни явления законът на Ампер за магнитната сила играе роля на фундаментален експериментален закон, а законът на Ампер за тока ($\Gamma_B = \mu_0 J$) и твърдението за липса на магнитни заряди ($\Phi_B = 0$) представляват основните закони, т.е. ядро на тази частна теория. В рамките на електродинамиката, обаче, двете равенства представляват просто формулировка на закона на Ампер за магнитната сила на полеви език и, както по-горе, следва да се отнесат към основата на по-общата теория.