

За преговорно-обобщителната тема “Основни закони на електромагнитното поле”¹

В програмата за свободноизбираема подготовка по физика в 10. клас² са предвидени два часа за преговорно-обобщителен урок на тема “Основни закони на електромагнитното поле”. В учебното пособие³ темата не е разработена. Положителното на този факт е, че предоставя на учителя широко поле за творческа изява – сам да подбере и структурира учебното съдържание съобразно своето виждане, равнището на групата, с която работи и т.н.

По-долу целим да подпомогнем търсенията на учителите в тази насока, като предложим един от възможните варианти на учебното съдържание. Първата част може да се използва при провеждане на преговора в края на годината и от учителите, които преподават в 10. клас по програмата за общозадължителната подготовка.

Какви дидактически цели може да се поставят при провеждане на въпросния урок? Учениците изучават две години (9. и 10. клас) електромагнитните явления, време, през което е натрупани много факти. Кой от многобройните явления, понятия, закони, връзки и пр. следва да се преговарят, в какви насоки трябва да се търси обобщение на знанията? Един възможен отговор на този въпрос е: преговорът трябва да засегне онези понятия и закони, които, изнесени извън съвкупността на всички изучени понятия и закони и обобщени по подходящ начин, позволяват изграждането на една единна и в количествено отношение правдоподобна картина на електромагнитните взаимодействия. (По-долу ще се окаже, че достигането на тази цел изисква въвеждане и на някои нови, не изучавани в общозадължителната подготовка понятия, като с това не се излиза извън кръга на възможностите на учениците, избрали физиката като предмет за свободноизбираема подготовка.) С разработката на преговорно-обобщителната тема следва да се сложи ред в знанията на учениците – да се извърши окончателно отделяне, разграничаване на това, което във физиката се нарича *основни закони на електромагнитното поле* от съвкупността на всички изучени факти, свойства, закономерности и т.н., дължащи се на наличието на различни среди (диелектрици, проводници и пр.) в полето, т.е. на *взаимодействията на електромагнитното поле с веществата*.

Поставяйки проблема в тази плоскост, чрез примера с електромагнитните явления за сетен път даваме възможност на учениците да вникнат в типичната структура на една физична теория, структура, опираща се на определени *основни понятия*, система от *принципи и закони*, да разграничат тези елементи на теорията от използваните в нея моделни представи, без които не могат да се опишат явленията. Мястото на подобно структурно разграничение е именно тук, където учениците вече имат известен запас от натрупани знания за явленията и закономерностите. Наистина, всичко, което бихме могли да им кажем в 9. клас примерно за основните понятия, би било твърде декларативно и неубедително, защото те още нямат с какво да сравняват и съпоставят, за да разберат смисъла на казаното.

Затова при разработване на темата следва да се отчита не само пряката ѝ дидактическа цел, но и да се има предвид, че чрез акцентуването върху съответните моменти има възможност най-пряко да се съдейства за достигане на една от важните възпитателни цели на обучението по физика – *формирането на научен стил на мислене*.

¹ Физика, 1983, 3, с. 20–25, 4, с. 26–30.

² Става дума за програма от началото на 80-те години на 20. век.

³ Попов Хр. и др *Учебно пособие по физика за свободноизбираема подготовка в 10. клас на ЕСПУ, ДИ “Народна просвета”*, С., 1982.

В съответствие с така определените цели учебното съдържание може да се структурира по следния план:

1. Основни⁴ понятия на електродинамиката
2. Основни принципи, използвани при изграждане на електродинамиката
3. Основни закони на електродинамиката
4. Уравнения на електромагнитното поле (уравнения на Максвел)
5. Класическа електродинамика

В работата по първите три точки от този план следва особено да се наблегне върху смисъла, който тук се влага в термина *основни* (фундаментални), да се припомни на учениците, че някои основни понятия и закони те знаят от 8. клас, когато започва системното изучаване на механиката. Още тогава те са научили, че всеки раздел на физиката има свои понятия, които на дадената степен на познанието разглеждаме като *основни понятия*, без да можем да ги сведем към нещо по-просто или по-първично, и *основни закони* които са резултат от систематизиране и обобщаване на експериментални данни и в този смисъл не също могат да се изведат от други, по-обща закони. Затова например за *основните понятия* като правило не се дават обичайните дефиниции, които по принцип указват родовата принадлежност на понятието и видовете му особености, а, когато това се прави, то от физична гледна точка тяхната съдържателност е твърде бедна (ако не и никаква). Нужно е да се коментира понятието, постепенно да се изучават свойствата на обекта, за който се отнася то, и на тази база да се гради определена представа за него.

Основни понятия в теорията на електромагнитните взаимодействия

В такъв именно контекст следва да се развие първата точка от плана, в която се припомня, че електродинамиката борави с *две основни понятия*: понятието **електричен заряд** и понятието **електромагнитно поле**. Въпреки че в 9. клас е затгнато, сега вече по-пълно може да се развие твърдението, че електричният заряд е основно понятие. Учениците трябва да разберат, че твърдението

зарядът на една частица е количествена характеристика на способността ѝ да участва в електромагнитните взаимодействия,

въпреки че има формалната изисквана от логиката структура на една дефиниция, по същество не представлява определение на понятието електричен заряд, защото понятието не се отнася към някое по-общо физично понятие – такова просто няма (терминът “характеристика”, който в твърдението играе роля на родово понятие, не е физичен термин и има твърде широк смисъл). Затова и самото понятие придобива смисъл на *физична величина* едва след като се укаже измервателна процедура за определянето му. Тук трябва да се припомни фактът, че такава процедура може да се основава на закона на Кулон. (Целесъобразно е това твърдение да се илюстрира с решаването на подходяща задача, в която се търси зарядът на някое наелектризирано тяло.)

След като зарядът е въведен като *величина*, т.е. след като се знае как да се измерва, може да става дума вече и за свойствата му. Целесъобразно е тук да се споменат седем експериментално установени негови свойства:

- съществуват два вида заряди, условно наречени положителни и отрицателни, при което едноименните заряди се отблъскват, а разноименните се привличат;
- няма безмасови заряди – всяка частица, която има електричен заряд, непременно има и маса;
- съществува закон за запазване на електричния заряд;

⁴ В по-късни работи вместо термина *основни* за подсилване е използван терминът *фундаментални*.

- съществува елементарен електричен заряд – зарядът на всяка свободно съществуваща частица е целочислено кратен на $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C;
- зарядът на едно тяло не зависи от скоростта на движение на тялото;
- зарядът е адитивна величина;
- взаимодействието на два заряда не зависи от наличието на други заряди около тях (принцип на суперпозицията).

И докато от гледна точка на логиката фундаменталността на понятието електричен заряд се изразява в това, че няма по-общо от него **физично** понятие, от гледна точка на физиката фундаменталността се изразява в това, че нито едно от изброените седем свойства не може да се обясни, да се изведе от някаква теоретична схема – всички те са резултат само от експерименталните изследвания.

Може да се обърне внимание и на още една принципно важна особеност на величината електричен заряд. За целта трябва да се отчете, че *взаимодействието* винаги представлява двустранен акт: едно заредено тяло действа с определени сили върху другите заредени тела (това е, така да се каже, *активната* страна на взаимодействието). Същевременно обаче това тяло изпитва въздействие от страна на другите тела (*пасивна* страна на взаимодействието). От никъде не следва, че за характеризиране на способността на едно тяло да действа върху другите с електрични сили и за характеризиране на силовите въздействия на тези други тела върху даденото, е достатъчна една единствена величина (допустимо е да си мислим, че за описване на активната страна на взаимодействието е необходим един заряд, а за описване на пасивната страна – друг заряд). И само законът на Кулон (т.е. в крайна сметка – експериментът), в който зарядите на двете тела участват равноправно (симетрично), гарантира, че една и съща величина, зарядът q , характеризира тялото както в активно отношение (интензитетът на създаденото от него поле е пропорционален на заряда – $E \sim q$), така и в пасивно отношение (действащата върху тялото електрична сила е пропорционална на **същия** този заряд $q - F = qE$).

Второто основно (фундаментално) понятие в електродинамиката е понятието *електромагнитно поле*, материалният обект, посредством който се осъществяват взаимодействията между зарядите. Тук преговорът не може да отиде много по-далеч от изученото в 9. клас: действието на един заряд върху друг се осъществява посредством създаденото от първия заряд поле, както и обратно – вторият заряд също създава поле, което действа с определена сила върху първия заряд. Това е пунктът, в който, при желание, учителят може да изложи двата подхода за разглеждане на взаимодействията, т.е. да запознае учениците с принципите на близкото и на далечното действие (което в 9. клас не е правено, но има своето значение, тъй като дава възможност по-добре да се схване смисълът на полевия подход).

Независимо от това дали в разглеждането ще се включи принципът на далечното действие, необходимо е да се подчертае, че както и при първото основно понятие, при електричния заряд, така и сега по принцип не може да се отговори на въпроса “какво представлява” полето и затова на този познавателен етап то се причислява към основните понятия. Чрез експерименталното изучаване на свойствата на електромагнитното поле обаче за него се изгражда определена представа, която става толкова по-детайлна, колкото по-дълбоко се вниква в тези свойства.

Следващата стъпка включва систематизиране на знанията за двете характеристики на полето – интензитета \vec{E} на електричното и индукцията \vec{B} на магнитното поле. Тук е съществен фактът, че посредством тези характеристики полето се свързва с неговите прояви, изразяващи се в наличието на електрични ($F_e = qE$) и на магнитни ($F_m = qvB \sin \alpha$) сили. С други думи, като знаем как се измерват сили, заряди, скорости и ъгли, фактически можем да определяме опитно и характеристиките на

полето \vec{E} и \vec{B} и оттам – да съдим за неговите свойства. При това, съпоставянето на формулите за двете сили позволява да ги разграничим ясно една от друга: *електрична* се нарича онази част от общата електромагнитна сила, действаща на един заряд, която не зависи от движението на заряда, докато *магнитната* сила действа само на движещи се заряди. Разбира се, тези разглеждания биха получили своята максимална завършеност, ако се работи с група, чиито познания по математика са достатъчни и позволяват да се запише векторният израз за силата на Лоренц $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$.

Целесъобразно е също тук, при разглеждане на второто основно понятие, да се отдели време и за класификация на полетата. Според изученото в 9. клас *електростатични* се наричат полетата на неподвижни заряди, *стационарни* (съответно *стационарно електрично* и *стационарно магнитно*) – полетата на заряди, които се движат така, че както разпределението на зарядите в пространството, така и характеристиките на създадените от тях полета, не се променят с времето и, накрая, *променливи* полета – тези, за които в дадена точка на пространството \vec{E} и \vec{B} се променят с течение на времето. Сега вече тази класификация може да се попълни с често срещания случай на магнитно поле, създадено от постоянни магнити. Може да се съобщи, че по аналогия с електростатиката, тези полета често се наричат *магнитостатични*. И тъй като в количествено отношение учениците нямат познания за тези полета, може да се съобщи, че по своите свойства магнитостатичните полета много приличат на електростатичните. В частност, силата на взаимодействие между два магнитни полюса се описва със съответен пълен аналог на закона на Кулон. Така отчасти ще се запълни една празнина, получена като резултат от недостига на време в 9. клас.

При излагане на тази схема на последователно обобщаване, на преход от по-прости към по-сложни случаи (статични – стационарни – променливи) трябва да се изясни, че само в първите два случая (т.е. – когато полетата не зависят от времето) можем да говорим отделно за електрично и отделно за магнитно поле. И едва при променливите полета става ясно, че физическият обект е един – *електромагнитното поле*, а \vec{E} и \vec{B} са само две негови характеристики.

За съжаление, извън тази стройна и пълна класификация на полетата остава един важен за практиката случай – случаят на *квазистационарните полета*. Разделът за **променливи токове** се изучава доста подробно, но някак не остава време и място той да се включи в общата схема. По принцип в случая става дума за *променливи* полета, но когато се интересуваме от **относително** бавни промени с времето и в **относително** малки пространствени области (каквито са случаите на процесите в електричните мрежи в рамките на един град, или процесите вътре в един радиоприемник). В много отношения квазистационарните процеси приличат на стационарните (което се вижда и от названието им), но имат и своите принципно различни свойства – например при тях вече електричното и магнитното поле са “зацепени” чрез електромагнитната индукция. В същото време те принципно се различават и от собствено променливите полета, защото в квазистационарния случай се пренебрегва токът на отместване, което всъщност означава, че се изпускат всички типично вълнови процеси.

Основни принципи на електродинамиката

Втората точка от плана за систематизиране на знанията на учениците включва разглеждане на някои твърдения, които са резултат от обобщаване на огромен експериментален материал и които в известен смисъл може да се разглеждат като основни принципи, използвани при изграждане на електродинамиката.

Един от тях е познатият още от механиката принцип (или закон) за запазване на енергията. Последователно приложен в теорията на електромагнитните взаимодействия, той води до важното заключение, че самото поле притежава енергия и, което е още по-важно – тази енергия може да се пренася от една пространствена област в друга. Това всъщност е и основният аргумент в полза на твърдението, че полето е материален обект. Същевременно следва да се припомнят и конкретните разсъждения, чрез които в 10. клас се стига до извода, че полето притежава енергия.

Друг основен принцип е този за суперпозицията, според който взаимодействието между два заряда не зависи от присъствието на други заряди в околното пространство. Понякога (както бе направено по-горе) това свойство се третира като основно свойство на зарядите. Евристичната роля на този принцип е голяма, защото той често позволява закономерности, които са установени в конкретни и достатъчно опростени случаи, да обобщаваме и за по-сложни случаи (такъв е случаят например при преход от закон на Кулон към теорема на Гаус, от закон на Ампер към закон на Био–Савар и др.).

Третото твърдение с общността и силата на принцип, е законът за запазване на електричния заряд (също причислен по-горе към свойствата на зарядите). Обобщението, което следва да се направи в тази посока е да се подчертае, че “запазване” не означава, че заряди не могат да изчезват и да се раждат – учениците в 10. клас вече са учили за аниhilация. Затова трябва да се използва по-общата формулировка, съгласно с която *общият заряд на една затворена система не зависи от времето*. В тази си форма принципът (законът) за запазване на електричния заряд изисква само, ако заряди се раждат или унищожават, това да става по двойки от еднакви по големина разноименни заряди.

Основни закони на електродинамиката

В третата точка от плана на преговорно-обобщителната тема следва да се припомнят основните експериментални закони на електродинамиката, т.е. онези количествени съотношения, които се получават само чрез систематизиране и обобщаване на резултатите от опитите, без да следват или да могат да се обяснят чрез други по-общии закони. При това трябва да се има предвид, че не може да се прекара рязка граница между изложените по-горе принципи и основните експериментални закони. Така например законът за запазване на електричния заряд спокойно може да бъде причислен и към основните експериментални закони, както и да бъде разглеждан като израз на основно свойство на зарядите. Разликата между тези понятия е твърде условна и използването на едно или друго от тях може да се отдаде на традицията. По начало

основните експериментални закони на електродинамиката дават връзка между характеристиките \vec{E} и \vec{B} на полето и характеристиките на неговите източници – зарядите и тяхното движение (токовете).

Това определение подсказва, че започвайки с електростатиката и обобщавайки постепенно разглежданията за по-сложните случаи, трябва да преговорим последователно законите на Кулон, на Ампер, но Био–Савар, на Фарадей (за електромагнитната индукция и закона на Максвел за тока на отместване (който прави изключение в смисъл, че не е открит опитно, а първо е предсказан въз основа на теоретични съображения, а по-късно потвърден експериментално).

Първият основен експериментален закон – *законът на Кулон*, описва взаимодействието между неподвижни електрични заряди. Тъй като става дума за експериментален закон, на първо място трябва да се постави въпросът за неговата точност. Доколкото в него участват две величини – заряди и разстояние, преди всичко следва да се подчертае, че *въпрос за това, дали електричната сила е точно право*

пропорционална на зарядите *не стои, не може по принцип да се поставя*, защото самата величина електричен заряд **се дефинира** чрез закона на Кулон. Важен е въпросът за точността на закона по отношение на разстоянието. Той от своя страна има два аспекта: първо, дали степента на разстоянието в знаменателя е точно две и, второ, в какъв интервал за разстояния е проверена валидността на закона. Принципно значение на отговорите на тези въпроси е причина експериментите за проверка на закона на Кулон с все по-голяма точност, на все по-малки и на все по-големи разстояния да не престават. Тъй като данните в това отношение се променят едва ли не ежегодно, възможно е предварително да се постави на ученици задачата да направят справка за тях (най-вече в интернет). При липса на такива е достатъчно да се подчертае, че до днес не е открит нито един случай, който да говори за някакви отклонения от закона на Кулон.

След като се изяснят тези принципни въпроси следва да се подчертае принципно важното обстоятелство, че тъкмо законът на Кулон позволява чрез равенството $F = qE$ да въведем характеристиката на полето – неговия интензитет. Обезателно трябва да се споменат и двете важни следствия от закона – консервативността на електростатичните сили и изучената в свободноизбираема подготовка теорема на Гаус.

По подобен начин се припомня, че за магнитните взаимодействия на постоянни токове основни са законите на Ампер и на Био–Савар. Първият, от който следва формулата $F_m = qvB \sin \alpha$, позволява да се въведе характеристиката на полето – неговата индукция, като осигурява измервателна процедура за определяне на \vec{B} и в това отношение е пълен аналог на формулата $F_e = qE$ от електростатиката. Вторият, законът на Био–Савар, свързва характеристиката на полето с разпределението на неговите източници – токовете, т.е., по принцип позволява да се пресметне (а не да се измери!) индукцията \vec{B} , когато се познават токовете, създаващи полето. От тази гледна точка той е аналог на формулата $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ за интензитет на полето на точков заряд в електростатиката.

Останалите два основни закона – на Фарадей за електромагнитната индукция и на Максвел за тока на отместване (чиито количествен израз ще приведем малко по-долу), определят съответно електричното поле, породено от променливо с времето магнитно поле и обратно – магнитното поле, което се поражда от промени на електричното поле.

От този преглед се вижда, че законите на Кулон и на Био – Савар са установени за твърде частни случаи на взаимодействия – когато зарядите са неподвижни, или токовете – постоянни. Сега, в рамките на систематизацията и обобщаването на знанията следва да се поставят въпросите, какво става, когато тези условия не са изпълнени, какво е например електричното поле, създадено от произволно движещи се заряди, или магнитното поле на променливи токове.

Пълен отговор на тези въпроси в рамките на училищния курс не може да се даде. Трябва да е ясно обаче, че този отговор трябва да се търси на основата на експерименти, различни от тези, които са правила Кулон и Ампер. Резултатите показват, че някои от установените в частните случаи свойства и зависимости се запазват, а други – не. Така например теоремата на Гаус е валидна и за поле на движещи се по произволен начин заряди; магнитните индукционни линии са без начало и без край не само за поле на постоянни, но и за полетата на произволни токове и т.н. Известно е обаче, че други свойства не са общовалидни – консервативността на електричните сили, например, е налице само в статични и стационарни полета.

Променливите електрични полета са вихрови и това е друг начин да кажем, че породените от тях електрични сили не са консервативни.

Разгледаният дотук материал може да състави учебното съдържание на първия час за преговор, систематизация и обобщение. В него ударението пада предимно върху преговора и систематизацията на знанията.

Уравнения на електромагнитното поле

За втория час остават за разглеждане последните две точки от общия план на темата. В тях целта е по-друга: да се изведат знанията на учениците за електромагнитното поле на едно качествено по-високо равнище. Това обаче не може да стане с помощта само на познатите понятия, налага се да се въведе и едно ново понятие, което, за щастие, има свой аналог в 9. клас, така че не е необходимо въвеждането му да се превръща в център на урока.

И така, четвъртата точка от плана предвижда обсъждане на уравненията на електромагнитното поле, т.е. – уравненията на Максвел. Тези уравнения са своеобразен синтез от основните експериментални закони, но не бива да се забравя (нещо повече – следва винаги да се подчертава), че те не са следствие, не се извеждат от основните експериментални закони. Такъв извод не съществува – законите на Кулон, Ампер, Фарадей предоставят преди всичко известни съображения за написване на едно или друго уравнение, но не гарантират, че това е единственото уравнение, което правилно описва явленията. За да стане смисълът на казаното по-ясен, достатъчно е да припомним, че токът на отместване е внесен в уравненията без никаква експериментална обосновка, единствено на базата на закона за запазване на електричния заряд и от съображения за симетрия, които обаче не са достатъчни, за да укажат точния вид на съответния член, който трябва да се добави в уравненията.

С други думи, на учениците трябва да стане ясно, че уравненията на Максвел, най-общите уравнения на електродинамиката, не се извеждат или “доказват”, по същество те се постулират. За да схванат по-добре мястото, което се отрежда на тези уравнения, е уместно да се използва паралелът с механиката: в изграждането на електродинамиката уравненията на Максвел играят същата роля, каквато принципите на Нютон играят в изграждането на механиката. А това означава, че след като веднъж по някакви съображения са записани, тези уравнения по-нататък се използват за описание на наблюдаваните явления, за предсказване на нови такива и ние ще им вярваме дотогава, докато се открие електромагнитно явление, което те не могат да обяснят, или пък се окаже, че някое тяхно следствие (предсказание) не се потвърждава от експериментите.

Смисълът на уравненията на Максвел може да бъде изразен по няколко начина. За нашите цели е удобна онази тяхна форма, в която се дава връзка на източниците на полето не директно с неговите локални характеристики \vec{E} и \vec{B} , а с четири определени, свързани с тях величини. Първите две от тях са познати – това са потокът Φ_E на електричното поле през дадена повърхност (въведен по-рано в часовете за свободноизбираема подготовка) и потокът Φ_B на магнитното поле (въведен още в 9. клас). Сега, при преговора, е достатъчно да се припомни, че, грубо казано, потокът на всяко поле през една повърхност е величина толкова по-голяма, колкото по-голяма е съответната локална характеристика (\vec{E} или \vec{B}), колкото по-голяма е площта на повърхността, и колкото по-малък е ъгълът между вектора на полето и перпендикуляра към повърхността.

С третата от необходимите глобални величини учениците по същество са запознати, макар и под друго име, от 9. клас. Става дума за електродвижещото напрежение между две точки. Това, което е необходимо сега, е да се преосмисли

определението за тази величина, като му се придаде и подходяща за случая математична форма. Според определението от 9. клас, ЕДН ϵ по една крива е равно на работата на електродвижещите сили при пренасяне на заряд $+1$ С по кривата. Третата глобална величина – *циркуляцията Γ_E на електричното поле по дадена крива* се дефинира по същия начин – като работа на електричните сили при пренасяне на заряд $+1$ С по кривата. За да придадем математична форма на определението използваме, че електричната сила, която действа на заряд $+1$ С, е точно \vec{E} . Тогава, ако с $\vec{\Delta l}$ отбележим едно малко преместване по кривата, работата на електричната сила при преместване по този елемент е $\Delta A = \vec{E} \cdot \vec{\Delta l}$, а общата работа, т.е. циркуляцията на електричното поле по цялата крива ще бъде сума от работите, извършени при всички малки премествания:

$$\Gamma_E = \sum \vec{E} \cdot \vec{\Delta l}.$$

По аналогичен начин се дефинира и четвъртата необходима глобална величина – магнитодвижещото напрежение, или още – *циркуляцията Γ_B на магнитната индукция по дадена крива*. Ако една крива се намира в магнитно поле с индукция \vec{B} , циркуляцията на индукцията по тази крива се определя чрез сумата:

$$\Gamma_B = \sum \vec{B} \cdot \vec{\Delta l},$$

където $\vec{\Delta l}$ са елементите, на които мислено се разделя кривата и които са толкова малки, че можем да ги смятаме праволинейни, а полето върху всеки един от тях – константно.

За да придобие все пак някакъв по-осезаем смисъл нововъведената величина, може да се използва аналогията между електричните заряди и полюсите на постоянните магнети: както електричната сила, действаща на точков заряд, има направлението на \vec{E} , така и магнитната сила, действаща на магнитен полюс, има направлението на \vec{B} . Затова, както Γ_E е пропорционално на работата на електричните сили при пренасяне на заряд по кривата, така и Γ_B е пропорционално на работата на магнитните сили при пренасяне на магнитен полюс по съответната крива. По този начин пресметнатата по една **затворена** крива циркуляция Γ_B ще бъде мярка за неконсервативността на магнитните сили.

След като са припомнени и въведени всички четири необходими величини, може да се премине по същество към разглеждане смисъла на отделните уравнения на Максвел. Най-лесно е да се започне с онова от тях, което се покрива с познатата теорема на Гаус:

Потоъкът Φ_E на електричното поле през произволна затворена повърхност S е пропорционален на заградения от повърхността електричен заряд Q_S :

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0} Q_S$$

Според смисъла на това уравнение, електричните заряди са един възможен източник на електрично поле и колкото по-голям е зарядът, толкова по-голям е потокът на полето през обгръщащите го повърхности.

Вижда се, че дори в статичния случай, когато теоремата на Гаус е следствие от закона на Кулон, нейната формулировка има изключителна общност – тя е валидна при произволна форма, големина и разположение на зарядите, докато законът на Кулон е валиден само за два точкови заряда.

След това се припомня, че електрично поле може да се породи и по друг начин – от променливо магнитно поле и това явление – електромагнитната индукция се подчинява на закона на Фарадей. Единствената разлика от ученото до сега е, че вместо индуцирано електродвижещо напрежение, съответното уравнение на Максвел съдържа неговия еквивалент – циркуляцията на породеното електрично поле:

Циркуляцията Γ_B на електричното поле по всяка затворена крива L е пропорционална на промяната за единица време на потока Φ_B на магнитното поле през една повърхност, имаща L за свой контур:

$$\Gamma_B = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

И така, второто от уравненията на Максвел се припокрива със закона на Фарадей за електромагнитната индукция, в това е неговият физичен смисъл. Според него втори тип източници на електрично поле са промените на магнитното поле с времето, като породеното по такъв начин електрично поле е вихрово, т.е. силовите му линии са затворени криви.

Третото от уравненията на Максвел е свързано с познатия от 9. клас факт, че индукционните линии на стационарното магнитно поле (полето на постоянни токове) са (изобщо казано) затворени криви. Опитът показва, че това свойство се запазва и за променливите магнитни полета. За да се получи от този факт твърдение с ясен количествен смисъл, трябва да се разгледа една произволна по форма, но **затворена** повърхност. Спрямо нея индукционните линии на полето са два типа: линии, които изобщо не я пробождат (лежат или изцяло вътре, или изцяло вън от нея), и такива, които я пробождат. Линиите от първия тип не допринасят нищо към потока Φ_B на полето през повърхността. Същото може да се каже обаче и за линиите от втория тип: щом са затворени, те пробождат повърхността четен брой пъти – колкото пъти излизат от пространството, заградено от повърхността, толкова пъти и влизат в него (за да се затворят). И понеже всъщност потокът Φ_B е пропорционален на броя на линиите, които излизат през повърхността, намален с броя на тези, които влизат, то следва да заключим, че общият поток е нула. Това е съдържанието и на третото от уравненията на Максвел:

Потокът Φ_B на магнитното поле през всяка затворена повърхност е нула:
 $\Phi_B = 0.$

Физичният смисъл на това уравнение е, че не съществуват магнитни заряди, от които да започват или свършват индукционните линии.

Четвъртото от уравненията на Максвел посочва източниците на магнитното поле. Неговата формулировка се опира на въведената по горе величина циркуляция Γ_B на магнитното поле. Тя гласи:

Циркуляцията Γ_B на магнитното поле по произволна затворена крива L е пропорционална на обхванатия от кривата ток I и на промяната за единица време на потока Φ_E на електричното поле през една повърхност, имаща L за свой контур:

$$\Gamma_B = \mu_0 I + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\Delta\Phi_E}{\Delta t}.$$

Първата част от това твърдение е пряко следствие от установения за стационарни полета закон на Био–Савар, който в такъв смисъл остава валиден и в случая на произволни (а не само на постоянни) токове. Втората част на твърдението е количествен израз на зависимостта, съдържаща се в закона на Максвел за *тока на отместване*.

Това са четирите уравнения на Максвел, които определят хода на електромагнитните явления **във вакуум**. Те са достатъчни за определяне на характеристиките на електромагнитното поле \vec{E} и \vec{B} , стига да познаваме разпределенията на зарядите Q и на токовете I в пространството и на това, как те се изменят с времето.

И така, като се обобщи всичко казано дотук, може да се отбележи, че според тях както електричното, така и магнитното поле имат два типа източници. Електричното поле се създава от заряди и от промени на магнитното поле, а магнитното поле – от токове и от промени на електричното поле. Фактът, че промените на едното от полетата поражда другото поле, говори, че всъщност полето е само едно, едно единно електромагнитно поле, и само за удобство говорим за неговите две части като за нещо самостоятелно. Уравненията показват още, че като се изключи породеното от заряди електрично поле, в останалите три случая получените полета са вихрови.

В края на разглеждането на тази точка е важно да се подчертае, че онези закони, които по-горе определихме като основни експериментални закони на електродинамиката, за частните случаи, в които важат, са следствия от уравненията на Максвел, получават се от тях.

Класическа електродинамика

Премахвайки към последната точка от темата, която е посветена на класическата електродинамика, може да се подчертае, че дотук се преговарят, систематизират и задълбочават знанията, като за зарядите и токовете се говори абстрактно, без да се разглеждат другите свойства на заредените тела (например това, че всяка заредена частица и всяко заредено тяло притежава и инертност, която се характеризира количествено с неговата маса) и фактът, че тези тела винаги се намират в някаква среда, която също има определени свойства, които влияят на взаимодействията на зарядите и токовете. Сами по себе си уравненията на Максвел не са достатъчни за обясняване на електромагнитните явления по две причини.

Първо, за да се включат в разглежданията и средите, в които се движат зарядите (текат токовете), трябва да се направят някои моделни предположения относно тяхната структура. Това се налага от факта, че тези среди са изградени от огромен брой (от порядък на 10^{23}) заредени частици, отчитането на точните движения на които е невъзможно (още повече, че тези движения не се подчиняват на законите на класическата механика). Учениците са запознати с двата най-прости модела: модела на диелектричните среди, изградени от еластично свързани заряди, и модела на проводящите среди, в които има свободни заряди. (Че в случая се касае именно за модели, макар и работещи в много случаи отлично, става явно при по-дълбокото разглеждане на явленията, което се прави например в теорията на твърдото тяло.)

Второ, уравненията на Максвел се разгледаха по-горе като връзки, от които се търсят характеристиките на полето \vec{E} и \vec{B} , при което се смята, че разположението и движението на зарядите е известно. От динамиката обаче е известно, че това движение се определя от действащите върху зарядите и токовете сили, а те (в почти всички случаи, срещани в училище) са електромагнитни сили и на свой ред зависят от \vec{E} и \vec{B} . Затова, ако всичко трябва да изглежда смислено и завършено, към уравненията на Максвел следва да се добавят и уравненията на динамиката, които определят

движението на зарядите. За голямата част от изучаваните случаи са подходящи законите на класическата механика на Нютон.

По такъв начин, разглеждайки уравненията на Максвел за електромагнитното поле във вакуум съвместно с уравненията на динамиката на Нютон, и използвайки моделните представи за наличието на свързани и на свободни заряди, се получават основите, се гради разделът на физиката, известен под името *класическа електродинамика*. По същество подобен синтез е направил Лоренц – след неговите работи физиците получават възможност да обяснят практически всички наблюдавани до тогава (началото на 20. век) електромагнитни явления, включително и оптичните (разбира се, без тези, в които се проявява квантовият характер на светлината, или особеностите в поведението на микрочастиците, дължащи се на това, че те се подчиняват не на класическата, а на квантовата механика).

В настоящата статия обърнахме внимание само на учебното съдържание, което може да се вложи в преговорно-обобщителната тема. Въпросите, свързани с най-подходящите форми и методи, които могат да се използват при осъществяването ѝ в клас, не са предмет на разглеждане. Ако учителят реши да използва форми, в които участието на учениците е по- активно и са планирани от по-рано, съдържанието може да се третира само като насочващо, ориентиращо към проблемите, а по-обстойното им изложение може да се потърси в подходящи източници. По-долу е посочена литература, подбрана с оглед на това, да могат учителите да я набавят.

Литература:

1. Астахов А. В., Ю.М. Широков *Электромагнитное поле*, (Курс физики, т. II), М., Наука, 1980.
2. Борисов М. и др. *Физика, учебник за 10. клас на общообразователните трудово-политехнически училища*, С., Народна просвета, 1972.
3. Дуков В. М. *Электродинамика (История и методология макроскопической электродинамики)*, М., Высшая школа, 1975.
4. Златев Ив. и др. *Физика, учебник за 10. клас на общообразователните трудово-политехнически училища*, С., Народна просвета, 1978.
5. Китайгородский А. И. *Физика для всех, Электронь I*, т. III, М., Наука, 1982.
6. Орир Дж. *Физика*, т. I и т. II, М., Мир, 1981.
7. Парсел Э. *Электричество и магнетизм (Берклеевский курс физики)*, т. II, М., Наука, 1975.
8. Попов Хр. и др. *Ръководство за учителя по физика в 9. клас*, С., Народна просвета, 1981.
9. Фейнман Р., Р. Лейтон, М. Сендс *Фейнмановски лекции по физика*, С., Наука и изкуство, 1970.
10. Ширков Д. В. (ред.) *Маленькая энциклопедия, Физика микромира*, М., Советская энциклопедия, 1980.