

3. Фундаментални експерименти и фундаментални експериментални закони в електродинамиката

Добре известно е, че "Първ етап в изучаването на теорията е запознаването с нейния емпиричен базис."¹ Един от най-съществените елементи на емпиричната база на теориите са техните фундаментални експериментални закони. Правилното изясняване на мястото и ролята на експерименталните физични закони и тяхната класификация е от принципно важно значение за вникване в структурата на теориите. Както се отбелязва², разбирането "на експерименталния характер на физичните закони има крайно важно значение: то прави физиката наука за природата, а не система от умозрителни построения; от друга страна то привиква към мисълта за ограничената приложимост на установените физични закони, на основаните върху тях теории и разкрива перспективи за по-нататъшното развитие на науката."

Необходимостта при обучението по физика да се формират знания за същността на експерименталното познание е добре обоснована в методическата литература и е пряко свързана с мястото, което експериментът като такъв играе във физическите изследвания³: първо, като "източник на нови знания за факти, които впоследствие се систематизират и обобщават в закони и в теории; второ, само експериментът служи като надежден критерий за истинността на всяка теоретична концепция, хипотеза, положение; трето, чрез експеримента се осъществява връзка на физичните знания с техниката, производството и бита.". Въпросът за фундаменталните експериментални закони в електродинамиката е свързан с първото от посочените три обстоятелства, определящи мястото на експеримента въобще.

Въпросът за това, кои от опитно откритите закони в една теория трябва да се считат фундаментални и да се причислят към основата на теорията е от принципно значение за изясняване структурата на последната и е тясно свързан с друго често срещано понятие – понятието фундаментални (в рамките на разглежданата теория) експерименти. Като правило тези два термина се срещат винаги, когато се коментира методиката на обучение по електродинамика. Един дори и бегъл преглед на учебната и на методическата литература показва, обаче, че и в този случай не съществува единство в употребата на термините *фундаментален експеримент* и *фундаментален експериментален закон*. По-подробното запознаване с въпроса разкрива всъщност два проблема. Единият проблем е понятиен – различните автори влагат различен смисъл в прилагателното *фундаментален*. Вторият проблем е чисто терминологичен – различни автори, за да изразят едно и също качество (което тук наричаме фундаменталност) използват различни термини.

По-долу ще бъдат изследвани тези два проблема, но не въобще, а в рамките на електродинамиката, като ще бъде предложено едно възможно тяхно решение. При това те ще бъдат разгледани поотделно за експериментите и за законите.

3.1. Проблемът с фундаменталните експерименти

Терминът фундаментален експеримент (или фундаментален опит) е завоювал солидно място в методическата литература, тъй като "фундаменталните научни опити изпълняват в училищния курс по физика роля, сходна с ролята им в науката: те служат за обосноваване и за проверка на теориите"⁴. Най-често, обаче, смисълът на този термин не се уточнява. В потвърждение на последното твърдение може да се посочат множество примери (вж. напр.⁵ и мн. др.).

¹ Пинский А.А., В.Н.Юшин *Учебный эксперимент при изучении основных физических теорий*, Физика в школе, 1985, 5.

² *Элементарный учебник физики*, под ред.акад. Ландсберга, т.1, М., Наука, 1985.

³ Голин Г.М. *Вопросы методологии физики в курсе средней школы*, М., Просвещение, 1987.

⁴ Иванова Н.Н. *К изучению фундаментальных научных экспериментов*, Физика в школе, 1981, 2.

⁵ Джанколи Д. *Физика*, М., Мир, 1989, т. 2.

В⁶ например, авторът в два съседни пасажа използва както термина "фундаментален опит", така и термина "основополагащ опит", без да изяснява смисъла нито на единия, нито на другия. В⁷, наред с фундаментален опит, същият автор използва и термина "главни открития", за който има пояснение, че е използван от П. Л. Капица в смисъл на открития, които "не са могли да бъдат предсказани от съществуващите теории". Очевидно, това е един критерий, свързан с историческото развитие на науката. Той, обаче, не е удобен когато става въпрос за изучаване на една вече изградена теория, защото много често окончателната структура на теорията е такава, че редица от откритията, които при изграждането ѝ не са могли да бъдат предсказани, в края на краищата се оказват обяснени в рамките на изградената теория. Типичен пример в това отношение са резултатите от опитите на Ом – по времето, когато са извършени, тези резултати наистина не би могло да бъдат предсказани. Днес, обаче, те намират своето естествено обяснение в рамките на електродинамиката.

Липсата на общоприето разбиране за смисъла на понятието "фундаментален опит" става особено очевидна когато авторите посочват кои от опитите в електродинамиката трябва да се разглеждат като фундаментални. Така например в⁸ като фундаментални се сочат 12 опита – опитите на Кулон, Оерстед, Ампер, Ом, Фарадей (за електромагнитната индукция), Херц, Рике, Толмен–Стюарт и Манделщам–Папалекси, Миликен и Йофе, Майкелсон и Морли, Рьомер–Физо и Юнг. Нещо повече, добавяйки в края на този списък "и др.", авторите допускат и по-нататъшното му разширяване.

Очевидно изхождайки от едно по-тъсно разбиране за фундаменталност на опитите, според което към тази група се причисляват само опити, които представляват "повратни точки в развитието на науката", в⁹ броят на фундаменталните опити в електродинамиката е съкратен до седем (Кулон, Оерстед, Ампер, Ом, Фарадей, Миликен, Толмен–Стюарт и Манделщам–Папалекси. По такъв начин, обаче, те само трансформират интересувания ни въпрос в нов: кои са *повратните точки* в развитието на една наука, който въпрос също стои без отговор.

Още по-малък брой фундаментални опити фигурира в¹⁰, където като такива се сочат само опитите на Ампер, Оерстед и Фарадей (пренебрегнат е дори опитът на Кулон?!).

Този кратък преглед показва, че най-често при употреба на термина "фундаментален опит" авторите не се ангажират с неговото дефиниране и обикновено го използват като синоним на *много важен* опит.

Сравнително най-пълно проблемът за смисъла на понятието "фундаментален опит" е изложен в цитирания под номер 3 източник, където се казва: "В научно-популярната и методическа литература историческите опити се наричат различно: решаващи, ключови, велики, основополагащи и т.н.. Особено често може да се срещне терминът "фундаментален опит" ..., при това се привеждат не една десетка исторически опити. Самата дума "фундаментален" предполага обаче, че броят на такива опити не трябва да бъде голям. Разбира се, не всички изучавани в училище исторически опити са действително фундаментални, макар всички те в определена степен да способстват за развитието на физиката в миналото и настоящето."

От приведения цитат се вижда, че неговият автор отбелязва както понятийния, така и терминологичния проблем, които бяха споменати тук в началото. Същият автор нарича

⁶ Разумовский В.Г., В.В.Усанов, Л.С.Хижнякова *Некоторые итоги перехода на новое содержание образования и пути дальнейшего совершенствования учебного процесса по физике*, Физика в школе, 1976, 1.

⁷ Разумовски В.Г. *Теоретични и експериментални основи на методиката на развитието на творческите способности на учащите се в процеса на обучение по физика*, С., Физика и математика, 1- 2.

⁸ *Методика преподавания физики в средней школе* Под ред.С.Е.Каменецкого и Л.А.Ивановой, М., Просвещение, 1987.

⁹ Шамаш С.Я. и др. *Методика преподавания физики в средней школе. Молекулярная физика. Электродинамика*, М., Просвещение, 1987.

¹⁰ Сущенко С.С., Л.С.Недбаевская *Структурирование учебного материала*, Физика в школе, 1988, 4.

фундаментални онези опити, които слагат "начало на нови раздели на физиката", като разграничава тези опити от опитите, откриващи нови явления. Ясно е, че посоченото твърдение не може да се използва като критерий, който да даде еднозначен отговор на въпроса дали един опит е фундаментален или не.

Приведените примери показват, че различията при употребата на термина "фундаментален експеримент" се дължат на различните определения, използвани за разграничаване на фундаменталните експерименти измежду останалите (или по-често – на липсата на такова определение). Ясно е също така, че в случая ролята на субективния фактор е твърде голяма, тъй като освен личните разбираня на авторите, доколкото тук става дума за оценка на приносите на отделни учени, влияние оказват и съображения за приоритет на отделни нации.

3.2. Критерий за фундаменталност на един експеримент

Възможно ли е да се елиминира влиянието на субективната оценка когато се решава дали един експеримент в електродинамиката е фундаментален или не? Възможно ли е да се посочи критерий, който еднозначно да определя кои опити са фундаментални и кои – не, без при това да се стига до драстични противоречия с вече установената практика за употреба на това понятие?

Тези въпроси са поставени в¹¹. Конкретно за случая на електродинамиката там се предлага решение на основата на възприетата схема за представянето ѝ като физична теория. Това решение се опира на разграничаването и експлицитното обособяване на групата на *фундаменталните явления* в тази област на физиката (по въпроса за фундаменталните явления вж. и¹²). Там бе обосновано разглеждането като фундаментални на онези явления, които не могат да се обяснят в рамките на възприетата структура на теорията. Ако се следва този подход и се въведе понятието фундаментално явление (разбирано в горепосочения смисъл), логично е като критерий за фундаменталност на един експеримент да бъде възприета съответствието му с някое от фундаменталните явления. В такъв случай въпросният критерий би имал следния вид:

Фундаментални са онези експерименти, които разкриват количествените закономерности при фундаменталните явления.

Доколкото в разработваната схема фундаменталните явления са четири, четири трябва да бъдат и фундаменталните експерименти в електродинамиката. Закономерностите на първото фундаментално явление – привличането и отблъскването между неподвижни електрични заряди, се разкриват с експериментите на Кулон, на второто – магнитното взаимодействие между постоянни токове – с експериментите на Ампер, а на третото – на електромагнитната индукция – с експериментите на Фарадей. Следователно от формулирания критерий следва, че фундаментални би следвало да наричаме само експериментите на Кулон, Ампер и Фарадей.

Макар и логична, подобна трактовка на понятието *фундаментален експеримент* среща и някои възражения. Преди всичко докато е ясно, че експериментите на Кулон, Ампер и Фарадей съответстват на първите три фундаментални явления, за четвъртото – тока на отместване, в историята на физиката не съществува пряк опит, който да разкрива неговите закономерности. (Известно е, че съществуването на това явление първо бе предсказано теоретично от Максвел, и едва по-късно – потвърдено с опита на Херц, довел до откриване на електромагнитните вълни.) Разбира се, този опит може да се разглежда като четвърти фундаментален опит в електродинамиката, но все пак трябва да се отчита, че той е само

¹¹ Попов Хр. *Изучаване основите на електродинамиката*, С., МНП, 1989.

¹² Попов Хр. *Фундаментални явления в електродинамиката*, Физика, 1992, 5.

косвено свързан с четвъртото фундаментално явление, тъй като наличието на електромагнитни вълни и наблюдаваните при тях зависимости се обясняват не само с тока на отместване, но и с електромагнитната индукция.

При поставяне на проблема за намиране критерий за фундаменталност на един експеримент бе обърнато внимание на изискването този критерий да не води до големи различия с възприетата досега практика в употребата на разглежданото понятие. От това изискване следва втора трудност: въпреки досегашната училищна практика, опитът на Оерстед вече не попада в групата на фундаменталните. Това е следствие от свободата в избора на фундаменталните явления. Наистина – Оерстед открива явление, което не може да се обясни чрез първото фундаментално явление (привличане и отблъскване на неподвижни заряди). Резултатите от опита на Оерстед обаче не се използват за развиване теорията на стационарното магнитно поле, тъй като чрез него не са установени количествени зависимости. Затова тази теория се развива не на основата на закономерностите при взаимодействие на ток с магнитна стрелка (магнитен дипол), а на тези, при взаимодействие на ток с ток, защото при този избор (както ще се изясни по-нататък) се осигурява най-съдържателна аналогия при изграждането на двата първи раздела на електродинамиката – електростатиката и теорията на стационарното магнитно поле. При това положение резултатите от опита на Оерстед се обясняват чрез второто фундаментално явление и, въпреки традицията да го разглеждаме като фундаментален, въз основа на възприетия критерий трябва да му бъде отказано това качество.

Коментираното различие между това, кои опити в литературата най-често се наричат фундаментални и кои следва да се считат такива според предложението критерий, не е фатално, защото както се отбелязва справедливо в¹³ "не е задължително в учебния курс фундаменталните опити да възпроизвеждат опитите, които са фундаментални исторически."

С формулирания по-горе критерий се предлага едно възможно решение на понятийния проблем, т.е. предлага се отговор на въпроса кои експерименти да считаме фундаментални. Терминологичният проблем е по принцип по-лек и в случая употребата на термина "фундаментален" (а не основен, важен, исторически, основополагащ или др.п.) се обосновава с факта, че наистина прегледът на литературата показва преобладаващото използване на този термин пред другите. При това положение за останалите опити (на Ом и т.н.) може да се използва онова от споменатите вече прилагателни (важен, исторически и т.н.), което най-добре характеризира мястото и ролята на даден опит в развитието на физиката, като употребеният термин трябва да се възприема в житейския смисъл, който се влага в него, т.е. без претенции за научна строгост. Претенциите за такава строгост остават само за понятието *фундаментален експеримент*, на което се отрежда важна структуроопределяща роля при изграждане на електродинамиката като физична теория.

3.3. Проблемът с фундаменталните експериментални закони

Терминът *фундаментален експериментален закон* се среща значително по-често от термина фундаментален експеримент както в методологическата, така и в учебната, и в методическата литература. Различният (понякога противоположен) смисъл, който отделните автори влагат в него, показва, че и в този случай не става дума за един научен термин, а че най-често се има предвид неговият най-широк, житейски смисъл, еквивалентен на важен, основен, с историческо значение и др.п. И доколкото и той навлиза все по-често в понятийната система на учебното съдържание (при това далеч не само на електродинамиката), необходимо е да се уточни неговото съдържание по такъв начин, че той да добие статута на едно добре определено научно понятие.

¹³ Разумовский В.Г. *Развитие творческих способностей учащихся в процессе обучения физике*, М., Просвещение, 1975.

Много примери илюстрират различните схващания по въпроса кои експериментални закони следва да се считат фундаментални. Така например в¹⁴ се различават следните типове експериментални закони: "...регулярности, получени по индуктивен път, или елементарни емпирични закони; закони, получени в резултат на установяване връзки между такива елементарни закони – интегрални емпирични закони; закони, изразяващи връзка между интегралните закони – фундаментални емпирични закони.". Вижда се, че критерият за фундаменталност тук е логико-гносеологически и поради това едва ли е подходящ за нашите цели – в случая би следвало да се търси критерий, който се опира на методолого-дидактически съображения, т.е. такива, отчитащи избраната структура на физичните теории.

За някои автори фундаменталността на един закон се определя от големината на областта на неговата приложимост. Така например в¹⁵ се твърди, че "Законът на Био–Савар съвсем не е фундаментален закон на електромагнетизма.", като от по-следващите разсъждения става ясно, че авторът не го счита фундаментален, тъй като има ограничена област на приложение – той не е в сила например за променливото електромагнитно поле. Ако се следва тази логика, обаче, ще се окаже, че и законът на Кулон не е фундаментален и, че фундаментални са само законите, намерили математическия си израз в уравненията на Максвел. Очевидно е, че и тази постановка не е приемлива когато става дума за изграждане на понятийната система на училищния курс по физика.

Във връзка със закона на Кулон, опит за определяне кои закони може да се разглеждат като фундаментални в типичния за английските учебници стил дават авторите на известния Нафилдски проект¹⁶: "Подобно на закона на Нютон за гравитацията той (законът на Кулон – б.м.) се разглежда като фундаментален закон, докато законите на Ом и Хук не са такива. Какви са причините един закон да бъде фундаментален? Класът може да предложи някои от следните причини:

- Законът е най-общ, без изключения.
- Законът може да се използва за обяснение на много други неща.
- Никой не е открил нещо по-дълбоко, което от своя страна би обяснило закона.
- Законът не изглежда твърде сложен."

Ясно е, че и този набор от критерий, някои от които (например последният) – не твърде определени, не е в състояние да даде еднозначен отговор на въпроса кои закони трябва да разглеждаме като фундаментални.

Съвсем други съображения ръководят автора на източника, цитиран под номер 5, когато твърди, че "Законът на Био–Савар (както и законът на Кулон) не се причисляват към фундаменталните закони, такива като законите на Ампер и теоремата на Гаус.". (Закон на Ампер авторът нарича закона, според който циркулацията на стационарното магнитно поле по затворена крива е пропорционална на обхванатия от кривата ток.) Ясно е преди всичко, че тук на една плоскост се поставят както експериментални закони, така и закони, получени по теоретичен път. Освен това от приведеното твърдение следва, че като фундаментални авторът разглежда законите на полетата, т.е. законите, които свързват характеристиките на дадено поле с характеристиките на неговите източници (при това – в глобалната им форма). В потвърждение на това са приведените пак там твърдения, че законите на Ампер и Фарадей (за електромагнитната индукция) са фундаментални закони на електродинамиката.

Когато се коментира разбирането на автора на 5 за фундаменталността на законите в електродинамиката, не може да се отмени едно негово твърдение, което макар и рядко, все пак се среща в учебната литература. Става дума за твърдението, че "Законът на Кулон следва

¹⁴ Бранский В.П. *Философские основания проблемы синтеза релятивистских и квантовых принципов*, Л., Ленингр. унив., 1973.

¹⁵ Namias V. *Comment on "Displacement current - A direct derivation"*, Am.Journ.of Phys., 57 (6), 1989.

¹⁶ *Physics Teachers' guide*, Unite 7, Magnetic Fields, Naffield Advanced science, Longman Group Ltd, Burnt Mill, Harlow, Essex, U.K., 1980.

от теоремата на Гаус." – твърдение, подкрепено със съответния "математически извод". Както тук, така и в други подобни случаи обаче се премълчава един принципно важен факт – фактът, че при "извода" на закона на Кулон съществено се използва твърдението, че полето на точковия заряд притежава радиална симетрия – твърдение, което е независимо от теоремата на Гаус и трябва да се разглежда като допълнителен резултат от експериментите. Казано по-общо, законът на Кулон наистина може да се изведе, но за целта освен теоремата на Гаус трябва да се използва и независимото от нея твърдение, че електростатичното поле е консервативно.

Особено задълбочен научен анализ от физична гледна точка на нееднозначността при определяне кои закони трябва да се разглеждат като "експериментални факти" или "аксиоми" в електродинамиката е представен например в¹⁷.

В методическата литература терминът фундаментален закон се среща често. Най-близко до нашето схващане за неговия смисъл намираме в¹⁸, където се обръща внимание, че "Има закони, справедливостта на които се доказва от опита и само от опита...Други закони, открити опитно, днес имат теоретично обяснение и могат да бъдат изведени на основа на теорията...".

Същият смисъл има и твърдението¹⁹, че съществуват "основни положения, които ние наричаме природни закони. Това са положения, които науката не доказва, защото не разполага с по-основни твърдения, на базата на които да ги докаже. Те се считат като твърдения, директно екстрахирани от заобикалящата ни действителност и отразяващи нейни най-съществени черти".

В един или друг вариант подобни твърдения се срещат във всеки учебник по методика на обучението по физика. В приведения цитат от 18 авторът не назовава интересуващите ни закони фундаментални, но че има предвид именно този термин става ясно по-нататък, където по повод закона на Кулон отбелязва "...задължително следва да се подчертае фундаменталността на закона, т.е. факта, че той представлява онова изходно знание, с което днес оперира науката и не съществуват положения, от които той може да бъде изведен." За съжаление, обаче, по-нататък авторът не си поставя за цел да коментира и другите фундаментални експериментални закони на електродинамиката, за да се проследи как прилага формулираното по-горе разбиране за фундаменталност на един закон.

Не всички автори на методични пособия обръщат обаче внимание на важната група на фундаменталните експериментални закони. Така например в²⁰ се различават само закони, които се установяват по опитен път и после намират своето обяснение в теориите и закони, които "се извеждат теоретично, а след това се потвърждават опитно". В тази опростена схема очевидно няма място за фундаменталните експериментални закони – факт, който я прави определено непълноценна.

На наличието на експериментални закони с по-особен статус се обръща внимание и в учебната литература. Типичен е например коментарът, който се прави към закона на Фарадей за електромагнитната индукция в²¹: "Извънредно важно е да се съзнава, че това равенство (става дума за самия закон – б.м.) представлява независим експериментален закон – то не може да се изведе от други експериментални закони и определено не е, както се твърди понякога, следствие от запазването на енергията, приложено за енергетичния баланс на токове в магнитно поле."

Примерите в това отношение могат да се множат почти неограничено.

¹⁷ Vinti J.P., D.J.X.Montgomery *Note on the Presentation of Maxwell's Equations*, Am.J.Phys., 17, 1949.

¹⁸ Иванова Л.А. *Активизация познавателной деятельности учащихся при изучении физики*, М., Просвещение, 1983.

¹⁹ Златев Ив. *Научно мислене и нестандартно мислене*, Физика, 1989, 4.

²⁰ Мошчански В.Н. *Формиране на мироглед у учащите се при изучаване на физика*, С., Народна просвета, 1977.

²¹ Reitz J.R., F.J.Milford *Foundations of Electromagnetic Theory*, Addison-Wesley Reading, Massachusetts, 1967.

3.4. Кои закони може да се разглеждат като фундаментални
Въз основа на всичко казано дотук приемаме:

Един експериментален закон е фундаментален, ако е резултат само от систематизация и обобщение на опитните данни, т.е. в рамките на приетата схема за изграждане на теорията не може да се получи като следствие от друг, по-общ закон.

Фундаменталността на даден закон, обаче, не е обективно негово качество: в един подход определен закон може да се разглежда като фундаментален, а в друг – не. Тази нееднозначност се отбелязва от много автори²²: "Изборът на опитните факти, които могат да бъдат взети в експерименталната обосновка на теорията е нееднозначен." Така например по един начин изглежда електродинамиката като физична теория, когато към емпиричната ѝ база се причисляват законите на Кулон, Ампер, Био–Савар и Фарадей, както е в²³, а по съвсем друг – когато вместо законите на Ампер и на Био–Савар се използва например силата на Лоренц.

Накрая, като последен пример ще посочим отново учебника, цитиран в бележката с номер 22, където авторът директно изброява експерименталните резултати, върху които изгражда теорията на електромагнитните явления: инвариантността на електричния заряд, закона на Кулон, принципа за суперпозиция на електричното поле, закона на Био–Савар, принципът за суперпозиция на магнитното поле, израза за силата на Лоренц, закона на Фарадей за електромагнитната индукция, тока на отместване на Максвел, закона за запазване на електричния заряд и закона за запазване на енергията.

Освен, че оставя забележимо усещане за неудовлетвореност, защото у нас има изградено определено разбиране, че фундаментът на една теория не бива да съдържа толкова много и толкова разнообразни елементи, посоченият списък от експериментални резултати поражда и някои въпроси. Защо например в него не фигурира важният експериментален резултат, че електричният заряд е адитивна величина? Възможно ли е да се изгради електродинамиката като теория без да се използва този факт? Отговорът на този въпрос е очевидно отрицателен. Освен това в списъка е включен законът за запазване на енергията – защо, обаче, липсва законът за запазване на импулса? Това е още един въпрос без отговор, тъй като липсва критерий за определяне фундаменталността на един експериментален закон.

3.5. Критерий за фундаменталност на един експериментален закон в електродинамиката

От приведените примери се вижда, че въпреки яснотата по въпроса кои закони следва да се считат фундаментални, когато те трябва конкретно да се изброят, различията при различните автори са значителни. Поставените в края на предишната точка въпроси показват, че не е удачно да се използва едно толкова широко и недобре определено разбиране за това, кои експериментални резултати следва да разглеждаме като фундаментални експериментални закони *на електродинамиката*. Необходимо е за конкретния случай на тази теория да се избере ясен критерий за фундаменталност. При това уместно е пред този критерий да се поставят следните изисквания:

– да ограничи броя на фундаменталните закони – те да бъдат значително по-малко, отколкото например в някои от посочените примери;

²² Матвеев А.Н. *Електричество и магнетизм*, М., Высшая школа, 1973.

²³ *Основы методики преподавания физики в средней школе*, Под ред. Перышкина и др., М., Просвещение, 1984.

– прилагането му да не оставя място за съмнение по въпроса дали все пак някой фундаментален закон не е пропуснат.

Имайки предвид тези изисквания е целесъобразно и напълно в съответствие с тук развиваната логика, като критерий за фундаменталност на един експериментален закон да се приеме следното твърдение:

Фундаментални са онези експериментални закони на електродинамиката, които описват количествените зависимости при фундаменталните явления.

Доколкото приемаме, че фундаменталните явления са четири, то четири ще бъдат и фундаменталните експериментални закони. А доколкото на всяко фундаментално явление съпоставихме фундаментален експеримент, то се получава еднозначно съответствие между трите елемента от експерименталната база на теорията: фундаментални явления – фундаментални опити – фундаментални експериментални закони. (При това положение вече фактът, че експериментът на Оерстед не се оказва сред фундаменталните, не изглежда толкова фрапиращ, защото опит на Оерстед има, но закон на Оерстед – не.) Полученото съответствие между фундаментални явления, експерименти и експериментални закони има важно значение защото той подчертава красотата и стройността на електродинамиката като физична теория.

Прилагането на формулирания по-горе критерий ни води до заключението, че като **фундаментални експериментални закони** следва да се разглеждат следните:

- **законът на Кулон, който описва количествените закономерности при първото фундаментално явление – наличието на електрични сили, с които си взаимодействат неподвижните заряди;**
- **законът на Ампер, който описва количествените закономерности при второто фундаментално явление – наличието на магнитни сили, с които си взаимодействат постоянните токове;**
- **законът на Фарадей, който описва количествените зависимости при третото фундаментално явление – електромагнитната индукция;**
- **законът на Максвел, който описва количествените зависимости при четвъртото фундаментално явление – тока на отместване.**

Лесно се вижда, че съвкупността от изброените четири закона удовлетворява изискванията, които по-горе бяха поставени пред критерия, определящ дали един закон е фундаментален или не. Наистина – този критерий ограничи броя на фундаменталните закони до четири, което е приемливо число, когато го оценяваме като брой на фундаментални елементи на дадена теория.

Второ изискване бе критерият да отбере като фундаментални само еднотипни закони. Кое е общото между горепосочените четири закона, което позволява да бъдат считани в определен смисъл еднотипни? – фактът, че всеки от тях представлява връзка между характеристиките на полето от една страна (E или B) и някой от източниците на полето – заряди, токове, промени на електричното и промени на магнитното поле с времето.

Последно изискване бе пълнотата на съвкупността от фундаментални закони да не буди съмнение. Сега, след като тези закони са обвързани с фундаменталните явления, чиято съвкупност е пълна, изпълнението на това изискване е очевидно. Това означава, че петти фундаментален експериментален закон в съвкупността на експерименталната информация, с която разполагаме днес, не може да има място.

Същевременно, обаче, ограничаването на броя на фундаменталните експериментални закони до посочените четири поставя и някои въпроси, на които следва да се отговори. Първият въпрос е: като какви ще се разглеждат останалите експериментални твърдения, които са в основите на електродинамиката? Може ли да се отрече, че законът за запазване на електричния заряд, например, е фундаментален експериментален закон (защото в предлаганата схема той наистина остава извън групата на фундаменталните закони)?

За да отговорим на подобни въпроси първо ще обърнем внимание на факта, че твърденията, останали извън групата на фундаменталните експериментални закони, могат да се разделят в две групи. В едната попада законът за запазване на енергията (и на импулса), който е установен в механиката и е въздигнат в ранг на общофизичен принцип. Доколкото при изграждането на електродинамиката се използват наготово редица понятия и закономерности от механиката, не е необходимо споменаването на този закон при специфичните за електродинамиката фундаментални експериментални закони.

Във втората група твърдения попадат такива експериментални резултати като законът за запазване на електричния заряд, принципите за суперпозиция на електричното и на магнитното полета, инвариантността на заряда и т.н. Те обаче, бидейки твърдения от по-друг характер, могат да се отнесат към свойствата на едно от фундаменталните понятия в електродинамиката – понятието електричен заряд. Такъв подход е възприет например в²⁴, а така също и в източника, цитиран в бележка номер 11. Това дава отговор на поставения въпрос, но същевременно разкрива и слабостите на подхода. От една страна се вижда, че той все пак допуска субективизъм, макар този субективизъм да се проявява на друго равнище (при избора на критерия). От друга страна при този подход съществува реална опасност да се принизи ролята на такива важни твърдения като закона за запазване на електричния заряд и принципа на суперпозицията, да се прикрие или да не изпъкне достатъчно ясно тяхната важност и техният експериментален произход.

Съществува още един проблем, произтичащ от прилагането на избрания критерий – според него в групата на фундаменталните експериментални закони попада и законът на Максвел, който описва закономерностите на вихровото магнитно поле, породено от променливо с времето електрично поле. Известно е, че този закон въобще не е експериментален, че той е резултат от теоретичните разглеждания на Максвел, довели до хипотезата за тока на отместване. Нещо повече, както се отбелязва²⁵ във връзка с пряката експериментална проверка на този закон, "Съмнително е, че дори и със съвременни технологии може да бъде измислен задоволителен експеримент и изглежда нито един такъв не е съобщен в литературата." (Опитите на Херц са индиректно потвърждение на закона.) Очевидна е връзката между този проблем и аналогичният му, дискутиран при изясняване на въпроса кои опити следва да считаме фундаментални. Също така е очевидно, обаче, че логически мястото на този закон е тъкмо при фундаменталните експериментални закони на електродинамиката. Именно поради това той е посочен като такъв както в източника, посочен в бележка номер 22, така и в редица други учебници.

Предлаганият тук подход към закона на Максвел е допустим и от по-общи съображения, защото, както се отбелязва²⁶ "...не може да се отрече, че някои експериментални закони...са предложени първо въз основа на теоретични разглеждания и едва след това потвърдени от преки експерименти. Важното е, обаче, че един експериментален закон не се счита установен, докато не станат достъпни директни опитни доказателства за него."

Според нас, всички неудобства, свързани с класификацията на закона за запазване на заряда, със закона на Максвел и т.н., може да бъдат пренебрегнати, като се има предвид

²⁴ Астахов А.В., Ю.М.Широков *Курс физики II, Электромагнитное поле*, М., Наука, 1980, т. 2.

²⁵ Walker G.B. *The axioms underlying Maxwell's electromagnetic equations*, Am. J. Phys., 53 (12), 1985.

²⁶ Nagel E. *The Structure of Science*, Harcourt, Brace & World, Inc., N.Y., 1961.

колко строен и съвършен вид придобива експерименталната основа на теорията при възприемане на горепосочения критерий за фундаменталност.

3.6. Терминологичният проблем, свързан с експерименталните закони

Накрая няколко думи и по терминологичния проблем. Терминът "фундаментален експериментален закон" не е общоприет. Срещат се различни негови варианти (само експериментален закон или само фундаментален закон), както и други названия (напр. основни положения, природни закони, независими експериментални закони, фундаментални природни закони и т.н.). В почти всички наши публикации до 1989 г. за въпросните закони употребяваме определението "основни". Сега вече го заменяме с *фундаментални*, за да избегнем смесването на фундаменталните експериментални закони с основните закони на съответните полета (статична, стационарна или променлива).

Предпочитанието, което тук се отдава на прилагателното "фундаментален", може да се обоснове преди всичко с широката му употреба. Освен в учебната физическа и методическа литература, примери от която бяха приведени по-горе, то е завоювало място и в журналните статии. Използването на термина "фундаментален", обаче може да се оправдае и с позоваване на класиците – известно е²⁷, че самият Кулон в своя мемоар "Конструкция и приложение на електричната везна, основана на свойството на метални жички да притежават сила на усукване, пропорционална на ъгъла на усукване" (1785) нарича откритата от него зависимост $1/r^2$ "фундаментален закон на електричеството" (к.м.).

Доколкото при търсене на подходящо название за разглежданите закони използването на прилагателното "експериментален" не се нуждае от обосновка, ще обърнем внимание само върху факта, че в случая е съществена едновременната употреба на "фундаментален" и на "експериментален" – ако липсва първата част, въпросните закони може да се смесят с групата от експериментални закони, в която влизат законите на Ом или на Фарадей за електролизата, например, които закони притежават съвсем друг статус в структурата на електродинамиката като физична теория. Изпускането на втората част ("експериментален") може да доведе до смесване с основните закони на полетата, които в известен смисъл също са фундаментални, но не всички от тях са преки следствия от обобщаването и систематизацията на експерименталните данни.

3.7. Кой закон наричаме закон на Ампер

Според казаното по-горе, втори фундаментален експериментален закон в електродинамиката е законът на Ампер, върху който се гради цялата теория на стационарното магнитно поле. Неговата фундаменталност е подчертана още от Максвел, който, дискутирайки опитите и резултатите на Ампер в своя "Трактат за електричеството и магнетизма"²⁸ пише: "Тези изследвания са завършени по форма, идеални по точност и резумирани във формула, от която могат да бъдат изведени всички явления и която трябва завинаги да остане фундаментална формула на електродинамиката."

Когато става дума за закона на Ампер, обаче, отново се натъкваме на два проблема – един терминологичен и един – по същество.

Известно е, че по отношение названията на законите в теорията на магнитните взаимодействия няма общоприета терминология, като предпочитанията на авторите нерядко се определят от националната им принадлежност. По-долу са приведени няколко примера, които достатъчно добре илюстрират ситуацията.

²⁷ Филонович С.Р. *Кавендиш, Кулон и электростатика*, М., библ.Знание, сер.Физика, 1988, 8.

²⁸ *Максвел и развитие физики XIX - XX веков*, Отв.ред. Л. С. Полак, М., Наука, 1985.

Така например в източника, цитиран в бележка с номер 22, закон на Ампер се нарича изразът за магнитната сила, с която магнитно поле с индукция \vec{B} действа върху токов елемент $d\vec{l}$:

$$(1) \quad d\vec{F} = d\vec{l} \times \vec{B}.$$

Същата формула в²⁹ обаче е представена като закон на Лаплас. У Матвеев (22) закон на Био–Савар–Лаплас е наречен законът за магнитната сила, която действа върху магнитен полюс от страна на токов елемент, а закон на Био–Савар (както и в³⁰ и на много други места) – формулата, която определя индукцията на магнитното поле, създадено от токов елемент $d\vec{l}'$ на разстояние r от източника в посока на единичния вектор \vec{r}_0 :

$$(2) \quad d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}_0}{r^2}.$$

В същото време важната формула, определяща магнитната сила, с която токовият елемент $d\vec{l}'$ действа на друг токов елемент $d\vec{l}$, разположен на разстояние r от $d\vec{l}'$ в посока на единичния вектор \vec{r}_0 :

$$(3) \quad d^2 F_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times (d\vec{l}' \times \vec{r}_0)}{r^2}$$

в 22 остава безименна, като само е отбелязано, че тя е предложена в този вид за пръв път от Грасман в 1844 г. За същата формула Джексън в³¹ съвсем предпазливо твърди, че тя е "математическа формулировка на резултатите от опитите на Ампер по изследване силата на взаимодействие между затворени токови контури", като по-нататък тя се цитира като "формула на Ампер", а названието "закон на Ампер" се резервира за глобалната (интегралната) формулировка на един от основните закони на полето.

В учебника, цитиран под номер 30, резултатите от експериментите на Ампер за установяване на магнитната сила, с която токовият елемент $d\vec{l}'$ действа на друг токов елемент $d\vec{l}$ се представят с формулата:

$$(4) \quad d^2 F_m = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(d\vec{l} \cdot d\vec{l}')}{r^2} \vec{r}_0.$$

За нея авторът пише: "Доколкото първите подобни експерименти са извършени от Ампер, уравнението понякога се нарича уравнение за силата на Ампер; но има няколко други закона, носещи името на Ампер, затова ние просто ще го разглеждаме като основно уравнение за магнитната сила."

Същият израз (4), обаче, в³² е назван със сложното и очевидно неприемливо име "фундаментален закон на Био–Савар–Лаплас–Оерстед–Ампер".

Според³³ обаче, формула (3) изразява закон на Био–Савар, а закон на Ампер (в изяснените по-горе означения) е изразът:

$$(5) \quad d^2 F_m = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2(d\vec{l} \cdot d\vec{l}') - 3(d\vec{l} \cdot \vec{r}_0)(d\vec{l}' \cdot \vec{r}_0)}{r^2} \vec{r}_0.$$

В³⁴ същата формула (5) се представя като закон на Ампер за пряко взаимодействие между токови елементи.

²⁹ Degurse A.-M. et all. *Physique, premieres s/e*, Paris, Hatier, 1988.

³⁰ Shadowitz A. *The Electromagnetic Field*, Mc Graw-Hill, N.Y., 1975.

³¹ Джексън Дж. *Классическая электродинамика*, М., Мир, 1965.

³² Федорченко А.М. *Теоретическая физика. Классическая электродинамика*, Киев, ГИИО "Выща школа", 1988.

³³ Christodoulides C. *Comparison of the Ampere and Biot-Savart magnetostatic force laws in their line-current-element forms*, Am.Journ.of Phys., 56, 4.

³⁴ Whitney C.K. *Current elements in relativistic field theory*, Phys.Lett.A 128 (N5), 1988.

Тези примери достатъчно добре характеризират терминологичният проблем, свързан със законите на магнитните взаимодействия. От достъпните ни съвременни източници той е осветлен най-пълно (включително и с изясняване на някои от причините за възникване на описаното положение) в³⁵ и³⁶.

По-интересно е, обаче, че дори сега, повече от век и половина след установяване на експерименталните зависимости на стационарното магнитно поле, продължава да буди интерес и да се дискутира активно в журналната литература един проблем по същество – проблемът кой израз всъщност трябва да се разглежда като основен експериментален закон в тази област. Кандидатите са два – съдържащите се във формули (3) и (5) закони. (Формула (4) не се разглежда отделно, защото когато се пресмята общата сила, с която токът по един затворен контур действа върху тока по друг затворен контур, се получава същият резултат, както и от формула (3)). И доколкото формулите (1) – (5) имат смисъл само когато се подразбира прилагането им за затворени контури, дотолкова формулите (3) и (4) трябва да се разглеждат като еквивалентни.

Както се отбелязва например във вече цитираните източници, формулите (3) и (5) дават еднакви резултати, когато с тяхна помощ се пресмята общата магнитна сила, която действа върху един затворен токов контур от страна на друг такъв контур. Разлика се получава само когато се пресмята силата, с която един контур действа върху един от своите елементи, като тя (разликата) зависи от радиуса на кривината и изчезва, когато токовият елемент е част от прав участък. Въпросната разлика се състои в това, че формула (5) предсказва като следствие от магнитното взаимодействие възникване на определени напрежения в токовия елемент, докато от формула (3) това не следва. Освен това докато формула (5) се проверява опитно (именно тя съдържа получените от Ампер зависимости), предимство за формула (3) е фактът, че тя е съвместима с релятивистичната теория на полето³⁷. Видимото противоречие между предсказанията на двете формули се сменя едва ако се отчетат крайните размери на напречните сечения на проводниците, по които текат токовете и възможните преразпределения на плътностите на токовете в тях.

Като изхождаме от съображението, че формула (3) предлага най-големи удобства при преход към полево описание на взаимодействията и като се опираме на факта, че именно тя се поставя в основата на теорията на стационарното магнитно поле в някои от най-разпространените съвременни учебници по електродинамика³⁸, както и 31, по-нататък **под закон на Ампер за магнитната сила ще разбираме именно твърдението, съдържащо се във формула (3)**. При това трябва да се има предвид, че втората част от това название е съществена, защото посредством нея този фундаментален експериментален закон се отличава от другия закон на Ампер, който свързва циркулацията на магнитната индукция по затворена крива и обхванатия от кривата ток и който по същество представлява вече основен закон на полето, а не експериментален закон.

8. Някои коментarii към фундаменталните експериментални закони

И така, съгласно всичко казано по-горе, като фундаментални експериментални закони на електродинамиката разглеждаме законите на Кулон, на Ампер, на Фарадей и на Максвел. Тук ще изложим някои свързани с тях съображения, които следва да се отчитат в една или друга форма при онтодидактическата преработка на теорията.

1. Известно е, че законите на Кулон и Ампер играят двойка роля в теорията. От една страна в тях се съдържат опитно установени количествени съотношения (например обратно пропорционална зависимост на силите, с които си взаимодействат два зарядови или токови

³⁵ Strnad J. *Stefan's equations of electrodynamics*, Europn Journal of Physics, 1989, 10 (4).

³⁶ Hovey A. *On the magnetic field generated by a short segment of current*, Am.Journ.of Phys., 1989, 57 (7).

³⁷ Whitney C.K. *On the Ampere / Biot - Savart discussion*, Am.Journ.of Phys., 56 (N10),1988.

³⁸ Пановский В., М.Филипс *Классическая электродинамика*, М., Гос.изд.физ-мат.литературы, 1963.

елемента от квадрата на разстоянието между тях). В същото време, обаче, те имат смисъл и на теореми за съществуване, защото включват определение на величината, съответстваща на разглежданото физично понятие. С други думи трябва непременно да се отчита, че законът на Кулон дефинира физичната величина електричен заряд, т.е. правата пропорционалност между електричната сила и големините на зарядите не е резултат от експериментите на Кулон. Този факт е изяснен добре в източника, посочен под номер 27, където се обръща внимание, че "Кулон е приемал като очевидно, че силата е пропорционална на произведението от "електричните маси" на телата и не се е опитвал да обоснове това твърдение опитно...Тук, както и в други области, където още не е формирана ясна система от понятия за количествено описание на явленията, най-важните нови понятия и връзките между величините се въвеждали и използвали без строга формализация."

2. Законът на Ампер е единственият експериментален закон, необходим за изграждане теорията на стационарните магнитни взаимодействия. Във въпросната област, обаче, понятието *електричен ток* играе роля на *фундаментално понятие*, т.е. в рамките на тази частна теория токът е първично понятие и цялата теория може да се изгради, без да се поставя въпросът какво всъщност представлява електричният ток. Когато, обаче, се излезе извън рамките на стационарните явления и се изгражда общата теория на електромагнитните взаимодействия, токът губи статута на частнонаучна категория, като се изяснява, че той представлява всъщност движение на електрични заряди. Този факт е експериментален и при едно строго изграждане на теорията трябва да се разглежда още един фундаментален опит. Подобна строгост обаче надхвърля границите на необходимостта за обучението в училище, поради което няма да усложняваме схемата в тази насока.

3. Известно е, че природните закони са обективни, но законите на науката, като продукт от човешката дейност, носят и субективния отпечатък от тази дейност – конкретният вид на последните зависи от възприетия модел за дадено явление. По какъв начин се отразява тази зависимост когато става дума за фундаменталните експериментални закони на електродинамиката?

Един поглед върху четирите закона показва, че те по естествен начин се групират два по два. Законите на Кулон и Ампер са формулирани в термините на сили, разстояния и др.п. понятия, характерни за подхода на далечното действие. Формулировките на другите два закона – на Фарадей и Максвел, използват само полева терминология, т.е. те съответстват на подхода на близкото действие.

Обяснението на този факт се съдържа в едно обобщение и доразвиване на мисълта, изказана в³⁹. Наистина, в статичния и в стационарния случаи точковият заряд и токовият елемент могат да се разглеждат като естествени елементарни източници на полето (съответно електростатично и стационарно магнитно), тъй като връзката между характеристиката на полето (E , B) и характеристиката на източника му се изразява чрез относително прости формули. В случая на променливи полета, обаче, (за които именно са валидни законите на Фарадей и Максвел) поради ефектите от крайната скорост на разпространение на промените на полето (закъсненията) подобна връзка, макар по принцип да може да се запише, би имала твърде сложен вид, за да може да послужи като основа за изграждане на електродинамиката.

В същото време резултатите, съдържащи се и в законите на Кулон и на Ампер биха могли да се представят в полева форма, т.е.като връзки между характеристики на източници и на полета, но това е свързано с тяхна декомпозиция по на две равенства, което като подход е възможно, но не и при първоначалното запознаване с основите на електродинамиката.

Коментираната тук особеност на фундаменталните експериментални закони има като свое странично следствие факта, че последните два от тях – законите на Фарадей и на

³⁹ Мултановский В.В., А.С.Василевский *Курс теоретической физики*, М., Просвещение, 1990.

Максуел, в същата форма, в която са формулирани тук, играят роля и на основни закони на променливото поле, т.е. в избраната схема за изграждане на електродинамиката по отношение на тях съществува определена двойственост – те са едновременно и фундаментални експериментални закони, и основни закони на съответното поле. В същото време основните закони на електростатиката и на стационарното магнитно поле се получават само като определени теоретични следствия от законите на Кулон и Ампер.