

## Фундаментални експерименти и фундаментални експериментални закони в електродинамиката<sup>1</sup> Кои експерименти можем да наречем фундаментални?

Терминът *фундаментален експеримент* се среща както в учебната, така и в методическата литература. Няколко примера от областта на електродинамиката илюстрират това твърдение. В популярната у нас методика на преподаването на физиката в средното училище на Каменеци и Иванова като фундаментални се изброяват 12 (дванадесет!) експеримента: експериментите на Кулон, Оерстед, Ампер, Ом, Фарадей (за електромагнитната индукция), Херц, Рике, Толмен–Стюарт и Манделщам–Папалекси, Миликен и Йофе, Майкелсън и Морли, Рьомер–Физо, и Юнг (8, с.168). При това, добавяйки в този списък “и др.”, авторите явно допускат възможността за неговото по-нататъшно разширяване.

Очевидно изхождайки от друго, по-тясно разбиране за фундаменталността на един експеримент, Шамаш и съавторите му съкращават списъка на фундаменталните експерименти в електродинамиката до седем, като от гореизброените отпадат тези на Херц, Рике, Майкелсън, Рьомер–Физо и Юнг (18, с. 98). В същото време обаче за Сушченко и Недбаевска фундаментални са само експериментите на Ампер, Оерстед и Фарадей (15, с. 65).

Тези примери са вече достатъчни, за да се повдигнат някои въпроси. Първо – в какъв смисъл експериментът на Ом може да се нарече фундаментален? Второ, у нас е изработено разбирането, че елементите, върху които се гради една теория, не бива да бъдат твърде много на брой и от тази гледна точка числото 12 е неприемливо. Трето, защо в някои случаи опитите на Кулон не се смятат фундаментални? Поставянето на въпроси от този род би могло да продължи и по-нататък.

Казаното дотук е достатъчно, за да очертае проблема, който ни интересува. Очевидно е, че различни автори имат различно разбиране за това, кои експерименти могат да се смятат фундаментални и кои – не могат. Нещо повече – с голяма вероятност за доближаване до истината може да се твърди, че най-често авторите използват определението *фундаментален* в житейския му смисъл, като синоним на *важен*, *исторически* и др.п.

Тази ситуация е неудовлетворителна. Тя не задоволява, защото без внасяне на яснота по въпроса какво означава *фундаментален експеримент*, не е възможно да се очертае емпиричната база и въобще цялостната структура на теорията. За да се постигне последното, е необходимо (поне в рамките на електродинамиката) да се реши един понятиен проблем – от **житейско**, понятието *фундаментален експеримент* трябва да се превърне на **научно** и по такъв начин да се елиминира всякаква възможност за субективна оценка относно това дали определен експеримент е фундаментален.

В методическата литература не липсват опити да се реши този проблем. Така например в споменатия вече източник (18) за фундаменталните експерименти кратко се казва, че те са онези, които представляват “*повратни точки в развитието на науката*”, като по този начин интересуваният ни въпрос се трансформира във въпроса “Кои са повратните точки в развитието на дадена наука?”.

От друга страна у Разумовски се среща пояснението, че фундаментални експерименти (или главни открития) в смисъла, в който използва този термин П. Л. Капица, трябва да се смятат тези, “*които не са могли да бъдат предсказани от съществуващите теории*” (13, с. 11). Очевидно това е един критерий, свързан с историческото развитие на науката. Той обаче не е удобен, когато става дума за изучаване на една вече изградена теория, защото често окончателната структура на

<sup>1</sup> Физика, 6, 1992, с. 24–31.

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 завършената теория. Типичен пример в това отношение са експериментите на Ом – по времето, когато са извършени, техните резултати наистина не би могло да бъдат предсказани. Днес обаче те намират своето естествено обяснение в рамките на електродинамиката и фундаментални може да ги нарече само човек, който отъждествява *фундаменталност* и *важност*.

Сравнително най-пълно проблемът за смисъла на понятието *фундаментален експеримент* е изложен от Голин (3, с. 43), който пояснява:

*“В научнопопулярната и в методическата литература историческите опити се наричат различно: решаващи, ключови, велики, основополагащи и т.н. Особено често може да се срещне терминът “фундаментален експеримент”..., 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 спомагат за развитието на физиката в миналото и в настоящето.”*

С това твърдение не може да не се съгласим, но все пак е ясно, че и то не съдържа критерия, по който еднозначно да се определи кои именно експерименти трябва да смятаме фундаментални.

Едно възможно решение на проблема може да се опрете на възприетата схема за представяне на електродинамиката като физична теория (11, с. 19). Това решение се опира на разграничаването и експлицитното обособяване на групата на *фундаменталните явления* в тази физична област (по въпроса за фундаменталните явления виж и (12)). Накратко, предлага се като фундаментални да се разглеждат онези електромагнитни явления, които не могат да се обяснят в рамките на възприетата структура на теорията.

В такъв случай критерият, който ни интересува, би имал следния вид:

***Фундаментални са експериментите,  
разкриващи количествените закономерности  
при фундаменталните явления.***

Доколкото в разработваната схема (11, 12) фундаменталните явления са четири, четири трябва да бъдат и фундаменталните експерименти в електродинамиката. Закономерностите на първото фундаментално явление – наличието на електрични сили на привличане и отблъскване между неподвижни заряди, се разкриват с опитите на Кулон, на второто – магнитното взаимодействие между постоянни токове – с експериментите на Ампер, а на третото, на електромагнитната индукция – с експериментите на Фарадей. По такъв начин от формулирания критерий следва, че фундаментални би трябвало да наричаме само експериментите на Кулон, на Ампер и на Фарадей.

Макар и логически издържана, подобна трактовка на понятието *фундаментален експеримент* крие и неудобства. Преди всичко докато е ясно, че експериментите на Кулон, на Ампер и на Фарадей съответстват на първите три от фундаменталните явления, за четвъртото – тока на отместване, в историята на физиката не съществува пряк експеримент, който да показва съществуването на това явление и да разкрива закономерностите, но които то се подчинява. (Известно е, че съществуването на ток на отместване първоначално бе **предсказано** от Максвел и едва по-късно **косвено** бе потвърдено с експеримента на Херц, довел до откриването на електромагнитните вълни.) Разбира се, експериментът на Херц може да се разглежда като четвърти фундаментален експеримент, но все пак трябва да се отчита, че той е само косвено

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

Друго неудобство, което следва от използването на предложениия критерий, се заключава в това, че опитът на Оерстед, който по традиция се причислява към фундаменталните, сега не попада в тяхната група, защото неговият резултат – отклонението на стрелката на компаса от посоката север–юг в съседство с проводник, по който тече ток, се обяснява в рамките на теорията на стационарните магнитни явления.

Тези неудобства, изразяващи се, казано най-общо, в несъответствия между най-често сочените в литературата като фундаментални експерименти и това, което следва от предложениия критерий, не са фатални, защото, както справедливо отбелязва Разумовски *“не е задължително в учебния курс фундаменталните опити да възпроизвеждат опитите, които са фундаментални исторически”* (14, с. 16).

С казаното дотук предлагаме едно решение на понятийния проблем. Наред с това обаче съществува и свързан с него (но по-лесен за разрешаване) терминологичен проблем. В началото бяха приведени примери, от които се вижда, че няма единство в названията на експериментите, които тук наричаме фундаментални. В случая употребата на термина “фундаментален” (а не основен, важен, исторически, основополагащ и др.п.) се обосновава с факта, че наистина прегледът на литературата показва преобладаващо използване на този термин пред другите (вж. отново приведения по-горе цитат от (3)). При това положение за останалите експерименти (на Ом, на Херц и т.н.) може да се използва онова от изброените вече определения (важен, исторически и т.н.), което най-добре характеризира мястото и ролята а даден експеримент в развитието на физиката, като употребеният термин трябва да се възприема в житейския смисъл, влаган в него, т.е. без претенции за научна строгост. Претенциите за такава строгост остават само по отношение на понятието *фундаментален експеримент*, като на него се отрежда важна структуроопределяща роля при изграждане на електродинамиката като физична теория.

### **Фундаментални експериментални закони в електродинамиката**

Тясно свързан с въпросите за фундаменталните явления и фундаменталните експерименти е и този за фундаменталните експериментални закони. И неговата същност се свежда до неяснотите около съдържанието на самото понятие и около термина, с който следва то да се обозначава.

Дори и най-беглият преглед на литературата показва значителни различия в смисъла, който отделните автори влагат в интересуващото ни понятие. Така например Брански различава следните три типа 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.”* (2, с. 33).

Вижда се, че критерият за фундаменталност, който използва авторът, а логико–гносеологичен 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, отчитащи избраната структура на дадена физична теория.

Съществуват автори, за които фундаменталността на един закон се определя от големината на областта на неговата приложимост. Така например Намиас в (20, с. 557) твърди, че *“законът на Био–Савар съвсем не е фундаментален закон на електромагнетизма”*, като от по-следващите разсъждения става ясно, че авторът не го

смята фундаментален, тъй като има ограничена област на приложение – той не е в сила например за променливото електромагнитно поле. Ако се следва тази логика, ще се окаже, че и законът на Кулон не е фундаментален. От тази гледна точка фундаментални са само уравненията на Максвел, но тях човек трудно би отнесъл към *експерименталните закони*.

От съвсем други съображения се ръководи Джанколи, когато твърди, че *“Законът на Био–Савар (както и законът на Кулон) не се причислява към фундаменталните закони като законите на Ампер и теоремата на Гаус”* (4, с. 204). (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. тези, които свързват характеристиките на дадено поле с характеристиките на неговите източници (при това – в глобалната им форма). В потвърждение на това са приведените на с. 192 и с.225 твърдения, че законите на Ампер и Фарадей (за електромагнитната индукция) са фундаментални закони на електродинамиката.

В методическата литература терминът *фундаментален закон* се среща често. Най-близо до нашето схващане за неговия смисъл се среща в (6, с. 73), където авторът обръща внимание, че *“Има закони, валидността на които се доказва от опита и само от опита... Други закони, открити опитно, днес имат теоретично обяснение и могат да бъдат изведени на основата на теорията...”*.

В еди или друг вариант подобни твърдения се срещат във всеки учебник по методика на обучението по физика. В приведения цитат от (6) авторът не назовава интересуващите ни закони *фундаментални*, но че има предвид именно този термин става ясно на с. 74, където по повод закона на Кулон отбелязва: *“... задължително следва да се подчертае фундаменталността на закона, т.е. фактът, че той представлява онова изходно знание, с което днес оперира науката, и че не съществуват положения, от които той може да бъде изведен.”* За съжаление обаче по-нататък авторът не си поставя за цел да коментира и други фундаментални експериментални закони на електродинамиката, за да може да се проследи как прилага формулираното по-горе разбиране за фундаменталността на един закон.

И така, споделяйки мненията, изказани в (6, с. 73), приемаме, че:

*Един експериментален закон е фундаментален, ако той е резултат само от систематизация и обобщение на опитни данни, т.е. – не може да се получи като следствие от друг, по-общ закон.*

Фундаменталността на един закон обаче не е обективно негово качество: в един подход той може да се разглежда като фундаментален, а в друг – не. Тази нееднозначност се отбелязва от редица автори. Така например в известния си учебник Матвеев пише: *“Изборът на опитните факти, които могат да бъдат взети в експерименталната обосновка на теорията, е нееднозначен.”* (7, с. 11).

Нееднозначността в избора на фундаменталните експериментални закони лесно може да се подкрепи с примери от литературата. Така например по един начин изглежда електродинамиката като физична теория, когато към емпиричната ѝ основа се причисляват законите на Кулон, Ампер, Био–Савар и Фарадей (10, с. 91), а по съвсем друг – когато вместо законите на Ампер и на Био–Савар се използва изразът за силата на Лоренц (1, с. 33).

В (16, с. 4) пък като фундаментални закони, върху които се основава класическата електродинамика, Федорченко изброява законите на Кулон, Био–Савар,

Фарадей, принципа на суперпозицията и твърдението, че токът представлява движение на електрични заряди.

Накрая, като последен пример, ще посочим отново учебника на Матвеев (7, с.13), където авторът директно изброява експерименталните резултати, върху които изгражда теорията на електромагнитните явления: инвариантността на електричния заряд, закона на Кулон, принципа на суперпозицията на електричното поле, закона на Био–Савар, принципа на суперпозицията 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.

От приведените примери се вижда, че въпреки яснотата на въпроса кои закони следва да се смятат фундаментални, когато те трябва конкретно да се изброят, различията между отделните автори са значителни. Очевидно е освен това, че често се смесват твърдения с различен по обхват характер – както специфични за електромагнитните явления закономерности (законите на Кулон, Фарадей и т.н.), така и общофизични такива (закон за запазване на енергията, принцип на суперпозицията и др.)

Всичко това очертава необходимостта в случая на електродинамиката да се избере по-конкретен критерий за фундаменталност. При това е уместно той да бъде така подбран, че:

- да ограничи съществено броя на фундаменталните закони в сравнение с броя им у Матвеев;
- да остави в групата на фундаменталните закони твърдения с еднакъв характер, от един и същи тип;
- прилагането му да не оставя място за съмнение по въпроса, дали все пак някой фундаментален закон не е пропуснат.

Като се имат предвид тези изисквания, с оглед особеностите на обучението по физика в средното училище, целесъобразно е в качеството на търсения критерий да приемем следното твърдение (11, с. 20):

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

Доколкото в (12) вече приехме, че фундаменталните явления са четири, то четири ще бъдат и фундаменталните експериментални закони. А доколкото на всяко фундаментално явление съответства и фундаментален експеримент, то се получава еднозначно съответствие между експерименталната база на теорията: фундаментални явления → фундаментални експерименти → фундаментални експериментални закони. Този факт има важно значение, защото подчертава красотата и стройността на електродинамиката като физична теория.

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

- **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 закономерности при третото фундаментално явление – електромагнитната индукция;

– **законът на Максвел**, който описва количествените закономерности при четвъртото фундаментално явление – тока на отместване.

За да изключим всяка неясност относно фундаменталните експериментални закони, ще уточним, че закон на Ампер наричаме формулата за магнитната сила, с която токов елемент  $d\vec{l}'$  действа на токов елемент  $d\vec{l}$ , отстоящ от него на разстояние  $r$  в посока на единичния вектор  $\vec{r}_0$ :

$$d^2\vec{F}_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times (d\vec{l}' \times \vec{r}_0)}{r^2},$$

а закон на Максвел – формулата за циркулацията по затворена крива на магнитното поле, създадено от променливо с времето електрично поле (ток на отместване):

$$\Gamma_m = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_e}{dt} \quad \text{или, в разгърнат вид} \quad - \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{r} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{s}.$$

Въпрос на отделно разглеждане е например въпросът, как тези закони могат да бъдат дискутирани в училище (вж. напр. (11, с. 33)).

Ограничаването на съвкупността на фундаменталните експериментални закони до посочените четири поставя въпроса какво представляват тогава останалите твърдения, изброени от Матвеев. Отговорът на този въпрос е следният. Такива резултат с несъмнен експериментален произход, като закона за запазване на заряда, инвариантността на заряда, принципа на суперпозицията и др.п., могат да бъдат отнесени към свойствата на самия заряд. Това е един подход, който не е нов и се прилага например в (1, с.25).

Използването на избрания критерий за фундаменталност повдига още един въпрос – може ли законът на Максвел да се отнесе към експерименталните закони, когато е известно, че той е резултат от теоретични разглеждания (хипотеза на Максвел) и че едва по-късно намира потвърждение в опитите на Херц. Утвърдителният отговор на този въпрос може да се обоснове с два аргумента. Първият е формален, защото се позовава на прецедент – и у Матвеев (7, с. 13), и в (17, с. 721) въпросният закон се причислява към интересуващата ни група. Вторият аргумент е по същество – както отбелязва Нагел:

*“...не може да се отрече, че някои експериментални закони ... са предложени първо въз основа на теоретични разглеждания и едва тогава са потвърдени от преки експерименти. Важното е обаче, че един експериментален закон не се смята за установен, докато не станат достъпни директни опитни доказателства за него.”*  
(19, с. 85).

С казаното дотук може да се смята, че понятийният проблем е решен (поне в рамките на интересуващата ни теория). Все още стои обаче терминологичният проблем. Терминът *фундаментален експериментален закон* не е общоприет. Срещат се различни негови варианти (само *експериментален закон*, или само *фундаментален закон*), както и други термини – “основни положения”, “независими експериментални закони”, “фундаментални природни закони” и др. Предпочитанието, което даваме на определението *фундаментален* може да се обоснове преди всичко с все по-широкото му разпространение в литературата. Доколкото при търсене на подходящ термин за разглежданите закони използването на определението *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 голямата група на експерименталните закони, в която влизат законите на Ом, на Фарадей за електролизата и др., които 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 определен смисъл също са фундаментални, но не са преки следствия от обобщаването и систематизирането на експерименталните данни.

Накрая – една бележка по отношение на коментирания четири закона. 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 (5, с.76). 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 другата двойка – законите на Фарадей и Максвел, използват само полева терминология, т.е. те съответстват на подхода на близкото действие.

Обяснени ето на този факт се съдържа в едно обобщение и доразвиване на мисълта изказана от Мултановски в (9, с. 75). Наистина, в статичния и в стационарния случай точковият заряд и токовият елемент могат да се разглеждат като елементарни източници на съответното поле (електростатично или стационарно магнитно), тъй като връзката между характеристиките на полето ( $E$  или  $B$ ) и характеристиката на източника му се изразява чрез относително прости формули. В случая на променливи полета обаче (за които именно се отнасят законите на Фарадей и Максвел) поради ефектите от крайната скорост на разпространение на промените на полето (закъсненията) подобна връзка, макар и по принцип да може да се запише, би имала твърде сложен вид, за да послужи като основа за изграждане на електродинамиката.

Коментираният тук особеност на фундаменталните експериментални закони има като свое странично следствие факта, че последните два от тях (на Фарадей и на Максвел) в същата форма, в която са формулирани тук, играят роля и на **основни закони** за променливите полета, т.е. в предложената схема за изграждане на електродинамиката по отношение на тях съществува определена двойственост – те са едновременно и *фундаментални експериментални закони*, и *основни закони* на електромагнитното поле. В същото време, основните закони на електростатичното поле и на стационарното магнитно поле се получават само като определени теоретични следствия от съответните закони на Кулон и на Ампер.

### Литература

1. Астахов А. В., Ю. М. Широков *Курс физики*, т. 2., М., Наука, 1980.
2. Бранский Б. П. *Философские основания проблемы синтеза релятивистских и квантовых принципов*, Л., Ленингр. Унив., 1973.
3. Голин Г. М. *Вопросы методологии физики в курсе средней школы*, М., Просвещение, 1987.
4. Джанколи Д. *Физика*, т. 2., М. Мир, 1989.
5. Друянов Л. А. *Место закона в системе категории материалистической диалектики*, М., Высшая школа, 1981.
6. Иванова Л. А. *Активизация познавательной деятельности учащихся при изучении физики*, М., Просвещение, 1983.
7. Матвеев А. Н. *Электричество и магнетизм*, М., Высшая школа, 1973.
8. *Методика преподавания физики в средней школе*, Под ред. С. Е. Каменецкого и Л. А. Ивановой, М., Просвещение, 1987.
9. Мултановский В. В., А. С. Василевский *Курс теоретической физики*, М. Просвещение, 1990.

10. *Основы методики преподавания физики в средней школе*, Под ред. Перышкина и др., М., Просвещение, 1984.
11. Попов Хр. *Изучаване основите на електродинамиката*, С., МНП, 1989.
12. Попов Хр. *Фундаментални явления в електродинамиката*, Физика, 5, 1992.
13. Разумовски В. Г. *Теоретични и експериментални основи на методиката на развитието на творческите способности на учащите се в процеса на обучение по физика*, Физика и математика, 1, 2, 1974.
14. Разумовский В. Г. *Развитие творческих способностей учащихся в процессе обучения физике*, М., Просвещение, 1975.
15. Сущенко С. С., Л. С. Недбаевская *Структурирование учебного материала*, Физика в школе, 4, 1988.
16. Федорченко А. М. *Теоретическая физика. Классическая электродинамика*, Киев, ГИИО “Вища школа”, 1988.
17. *Физика*, Перев. с англ. под ред. Ахматова А. М., М. Наука, 1965.
18. Шамаш С. Я. и др. *Методика преподавания физики в средней школе. Молекулярная физика. Электродинамика*, М. Просвещение, 1987.
19. Nagel E. *The Structure of Science*, Harcourt, Brace&World inc., N.Y., 1961.
20. Namias V. *Comment on “Displacement current – A direct derivation”*, Am. J. Phys., 6, 57, 1989.