

Вярно или невярно?¹

В рубриката “Практикум абитуриента” списание *Квант*, 1, 2001 г. е отпечатан материал със заглавие “Кондензатори в електростатично поле”. В него авторът си поставя за цел чрез решенията на няколко задачи от електростатиката да покаже как се прилагат принципът на суперпозицията и законът за запазване на електричния заряд. Четейки някои от задачите обаче, бихме могли да си зададем въпроса “Дали Паули не е написал прочутата си резолюция “Това не е правилно, то дори не е погрешно!” по повод на нещо подобно?”. Ето за каква става дума.

Първата задача, върху която ще спрем внимание, е следната.

Незареден плосък кондензатор с капацитет C_1 се намира в хомогенно поле с интензитет \vec{E}_0 . Силовите линии на електричното поле са перпендикулярни на електродите на кондензатора, разстоянието между които е d . Кондензатор с капацитет C_2 , зареден до напрежение U_0 , се свързва успоредно на кондензатора с капацитет C_1 . Намерете зарядите на кондензаторите след свързването им. Кондензаторът с капацитет C_2 се намира извън полето \vec{E}_0 .

Приведеното решение използва, че началният заряд C_2U_0 на втория кондензатор преди свързването е равен на сумата от търсените заряди q_1 и q_2 след свързването, т.е.

$$q_1 + q_2 = C_2U_0.$$

Второ уравнение за неизвестните заряди авторът получава чрез приравняване напреженията на двата кондензатора:

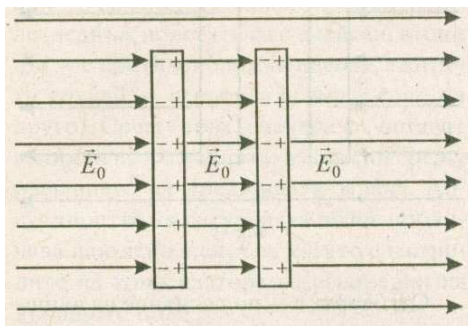
$$\frac{q_2}{C_2} = E_0d + \frac{q_1}{C_2}.$$

Отгук нататък решението се свежда до обикновена алгебра и не това е интересното. Интерес за нас в случая представлява дясната страна на второто равенство: пишейки това равенство, авторът смята, че между електродите на първия кондензатор интензитетите на двете полета – на външното поле и на полето на собствените му заряди q_1 – се събират! Затова към напрежението, дължащо се на заряда q_1 (което е $\frac{q_1}{C_1}$), прибавя напрежението, дължащо се на външното поле (E_0d).

Всичко това би било така, ако външното поле можеше да проникне между електродите на кондензатора. Как обаче би могло да стане това? Кондензаторът затова е кондензатор, защото електродите, които са проводници, **екранират** пространството между тях от влиянието на външните полета! И това твърдение е вярно, независимо от формата на електродите – и за плоски, и за цилиндрични, и за сферични, и за всякакви други кондензатори. Така че не може да се смята, че вътре в кондензатора, който е поставен във външно поле, се осъществява суперпозиция на двете полета – на външното, и на това, което се дължи на заряда на кондензатора.

Несъгласните с последното твърдение разсъждават по следния начин. Когато поставим незареден плосък кондензатор в хомогенно външно поле, върху външните повърхности на двата електрода се индуцират заряди с еднакви големини: там, където силовите линии на външното поле завършват – отрицателни, а там, където започват – положителни (фиг. 1). И понеже като цяло всеки от електродите е електронеутрален, върху вътрешните им повърхности остават заряди със същите големини и противоположни знаци. Тези заряди създават вътре в кондензатора поле, идентично с външното. И всичко изглежда достоверно!

¹ Физика, 5, 2002, с. 26–29.



Фиг. 1.

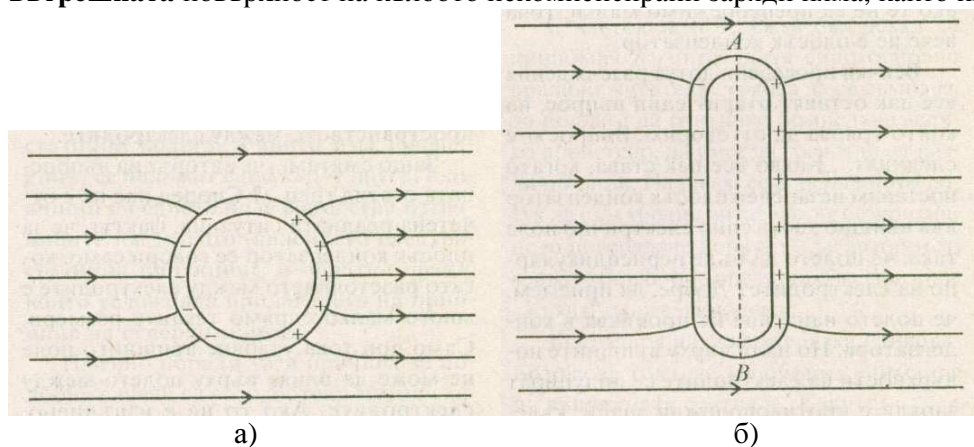
Ако приведеното разсъждение е вярно, вярно ще бъде и решението на задачата.

И така, въпросът е кое твърдение е вярно: **че външното поле прониква между електродите на плоския кондензатор, или обратното, че електродите екранират вътрешното пространство.** (Подобен въпрос не възниква при сферичен кондензатор – при него повърхностите са затворени и екранировката е очевидна.)

За тези, които се колебаят в избора на отговор на поставения въпрос, предлагаме следните разсъждения, опиращи се само на две твърдения:

- *електричното поле не се променя, ако неговите източници не променят пространственото си разположение;*
- *безкрайно малки изменения а разположението на източниците не могат да предизвикат краен ефект* (нещо като принцип за непрекъснатост).

Нека разгледаме следната поредица от преобразования. На фиг. 2,а е изобразена познатата картина на силовите линии на полето, което се установява, когато незаредено кухо метално кълбо се намира в хомогенно електростатично поле. Очевидно е, че по **вътрешната** повърхност на кълбото некомпенсирани заряди няма, както няма и поле.



Фиг. 2

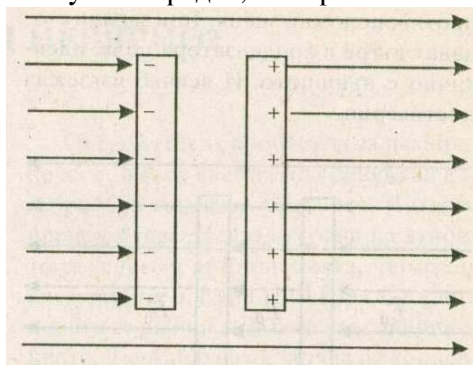
Ако сплескаме кълбото така, както е показано на фиг. 2,б, видът на силовите линии извън кълбото се изменя, но вътре положението си остава като преди – няма некомпенсирани заряди, няма поле. При това е важно, че по периферията на получения диск (окръжността AB) некомпенсирани заряди няма – там плътността им е нула, защото точно по периферията се сменя знакът на индуцираните по външната повърхност заряди.

Да си представим сега, че разрежем диска на две половини по периферията (т.е. по равнината, в която лежи окръжността AB) – тъй като некомпенсирани заряди запазват местата си, запазва се и полето. Нищо няма да се измени и ако направим безкрайно малка промяна, като изправим периферията на двете половини така, че да се получи плосък кондензатор – между електродите му поле не възниква! Така получихме

плосък кондензатор във външно поле, но вътре в кондензатора поле не възниква. И доколкото полето *не трябва да зависи от начина*, по който е създадено, следва да заключим, че дали ще внесем в поле готов кондензатор, или ще го получим чрез описаната по-горе редица от деформации, е все едно – в пространството между електродите поле няма да проникне.

Защо смятаме, че авторът на въпросната статия греша? Според нас не е отчетена реалната ситуация, фактът, че за плосък кондензатор се говори само, когато разстоянието между електродите е много малко спрямо техните размери. Само при това условие външното поле не може да влияе върху полето между електродите. Ако условието не е изпълнено, полето между електродите не е хомогенно и това вече не е плосък кондензатор.

Всички проведени дотук разсъждения все пак оставят открит един въпрос, на който трябва да отговорим. Въпросът е: какво все пак става, когато поставим незареден плосък кондензатор във външно хомогенно електрично поле така, че полето да бъде перпендикулярно на електродите? Ако приемем, че полето наистина не прониква вътре в кондензатора, се изправяме пред следната трудност: нали върху външните повърхности на електродите се индуцират заряди с противоположни знаци, върху които ще завършват и започват силовите линии на хомогенното поле (фиг. 3) – това не нарушава ли закона за запазване на заряда? Нали преди внасяне на кондензатора в полето всеки от електродите му е незареден, а на фиг. 3 вече има заряд?



Фиг. 3.

Отговорът е – под влияние на външното поле разноименните заряди (положителни от левия електрод и отрицателни от десния са отишли в безкрайност – факт, който на фиг. 3, която е с крайни размери, няма как да се изобрази (припомняме – по определение за плосък кондензатор размерите на електродите са **много** по-големи от разстоянието помежду им). А ако все пак размерите са крайни? Тези заряди отиват към периферията на електродите, може би някои от тях наистина проникват и по вътрешните им стени и там (около ръбовете) вече нито външното поле е хомогенно, нито полето между електродите – нула. Отчитането на ръбните ефекти обаче не е наша задача.

И все пак, ситуацията като че ли си остава малко объркана: ако разсъждаваме по един начин, следва, че в кондензатора трябва да има поле, ако разсъждаваме по друг – няма да има. Необходимо е да погледнем от малко по-обща теоретична гледна точка, за да разберем коя е причината за тази **нееднозначност**. Преди да назовем тази причина ще обърнем внимание, че дотук ние непрекъснато смесвахме две неща: **идеалния** плосък кондензатор, чиито размери на електродите са безкрайни, и **реалния** плосък кондензатор, чиито размери са крайни и полето в който не е напълно хомогенно. Обикновено разсъжденията се отнасят за идеалната ситуация.

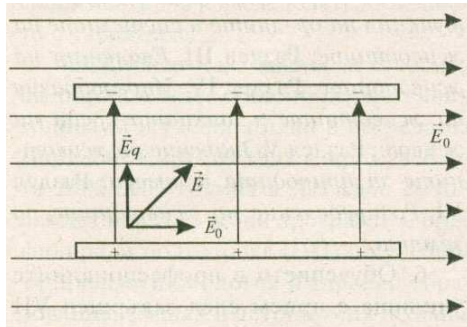
А сега – за причината за нееднозначността. От електродинамиката е известно, че диференциалните уравнения за интензитета (или за потенциала) на електростатичното

поле имат **единствено** решение само, когато са изпълнени определени гранични условия, част от които се отнасят за наличието на източници на полето в безкрайност. Точно това изискване не е изпълнено при плоския кондензатор – в този случай в безкрайност не само има заряди, но и количеството им върху всяка външна повърхност на кондензатора е безкрайно. Ето защо, не бива да се учудваме, че като разсъждаваме по един начин излиза, че в разглеждания по-горе случай поле в кондензатора има, а като разсъждаваме по друг начин – поле няма. С други думи крайното положение зависи от “историята”, от това, как сме достигнали до него.

Въпреки че с това разглеждането на въпроса може да приключи, ще обърнем внимание върху още една задача от цитираната в началото статия, в погрешното решение на която вече не може да има съмнения. Нейното условие е следното.

Плосък кондензатор се намира във външно хомогенно поле с интензитет \vec{E}_0 , перпендикулярен на електродите. На електродите, имащи площ S , са разположени заряди $+q$ и $-q$. Разстоянието между електродите е d . Каква минимална работа трябва да се извърши, за да се разменят местата на пластините? А да се разположат успоредно на полето? Да се извадят от полето?

Авторът решава задачата, като търсената работа пресмята чрез разликата между енергиите на полето във всяко едно от трите крайни състояния и енергията на началното състояние. Ясно е, че в съответствие с неговия подход във всеки от случаите той смята, че между електродите се осъществява суперпозиция на полето на кондензатора и на външното поле (веднъж полетата са с еднакви, втори път – с противоположни, а в третия случай – с перпендикулярни посоки). Срещу това, разбира се, остават възраженията, изложени при предишната задача. Абсурдността на ситуацията обаче проличава особено ясно в случай, когато електродите на кондензатора са успоредни на външното поле.



Фиг. 4.

Тази ситуация е показана на фиг. 4. Ако наистина външното поле \vec{E}_0 се сумира векторно с полето \vec{E}_q , създадено от зарядите на кондензатора, *общото поле \vec{E} няма да бъде перпендикулярно на електродите!* Такова поле не може да бъде **електростатично!** Свободните заряди по повърхността на електродите ще започнат да се движат насочено в направление на външното поле, т.е. ще тече ток. Нарушено е едно от основните свойства на електростатичното поле в присъствие на проводници – че силовите линии на полето са перпендикулярни към повърхността на проводника във всяка нейна точка.

Предполагам, че повече коментари не са необходими. Колебая се как да квалифицирам ситуацията. Явно авторът предлага задачи, с които успешно се демонстрира и приложението на принципа на суперпозицията, и на закона за запазване на електричния заряд. Но това са самоцелно съставени задачи, в които не се отчитат реалните свойства на обектите, за които се отнасят.

Ако трябва да формулирам по-конкретно, авторът не отчита факта, че **когато две статични полета, в които има проводници, се наложат едно върху друго, влиянието на едното поле размества източниците на другото (явлението електростатична индукция) и с това го променя, както и обратно, факт, който усложнява прилагането на принципа на суперпозиция.**

Именно поради тази причина за подобни случаи са разработени методи като метода на огледалните изображения, метода на инверсните изображения и т.н.

Настоящата бележка идва да подчертае още веднъж необходимостта от критично осмисляне на всичко прочетено в учебници, книги, статии, интернет (особено!) и т.н. Вижда се, че безкритичното доверяване дори на такъв безспорен авторитет като сп. *Квант*, може да подведе.