

Измерване на скоростта на светлината с електрично и магнитно махало*

Васил Г. Йорданов¹, Васил Н. Гурев¹, Стоян Г. Манолев²,
Алберт М. Варонов³, Тодор М. Мишонов³

¹Софийски Университет Св. Климент Охридски,
Физически факултет, к-ра Атомна физика,
София 1164, бул. Джеймс Баучър 5

²СУ Гоце Делчев, ул. Първомайска 3, MKD-2460 Валандово,
Република Македония

³Софийски Университет Св. Климент Охридски,
Физически факултет, к-ра Теоретична физика,
София 1164, бул. Джеймс Баучър 5

Абстракт. Тази задача бе дадена на 4-тата Олимпиада по експериментална физика “Ден на светлината”, проведена на 23 април 2016 г. в София. Олимпиадата бе организирана от Регионалното сдружение на физиците от Струмица, Република Македония и от Софийския клон на Съюза на физиците в България.

ЗАДАЧА

Измерете скоростта на светлината c , като използвате дадения експериментален набор, показан на Фиг. 1. Може да следвате описаните по-долу инструкции. След олимпиадата, настоящият текст, както и постановката остават за участниците.

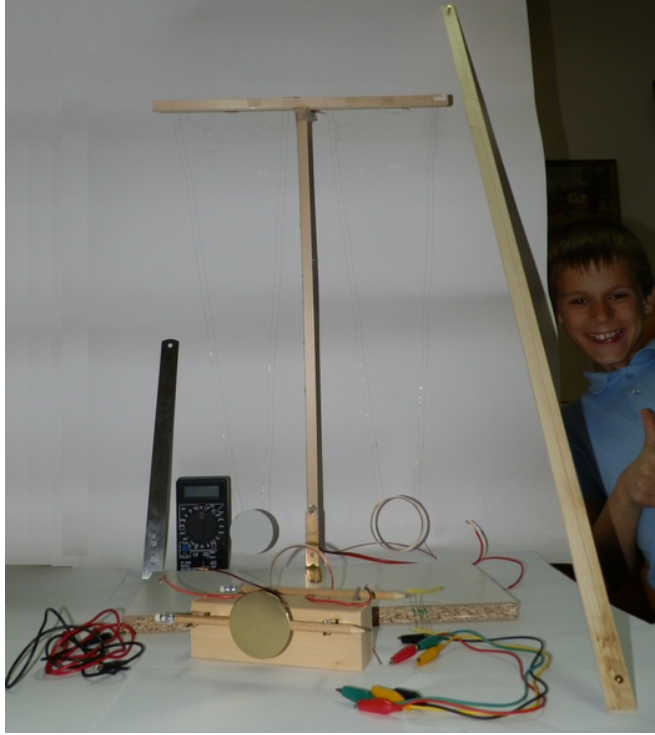
ЕКСПЕРИМЕНТ

Гравитационна част. Измерване на земното ускорение g

1. Измерете периода T (в секунди) на люлеене на висящия пръстен.

Заклатете леко пръстена в посока на оста му и пребройте колко трептения N_{osc} може да наблюдавате. Заклатете още веднъж и измерете времето за тези трептения T_N . Определете периода като отношението на пълното време и броя на трептенията $T = T_N/N_{\text{osc}}$. Повторете опита няколко пъти и намерете средната стойност на измерения период.

*Текстът, даден на учениците на английски, български, македонски, руски и сръбски, може да се намери в Интернет <http://arxiv.org/abs/1605.00493> [1]

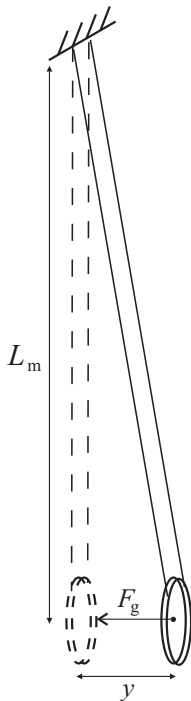


Фиг. 1. Проверете дали имате пълния набор елементи, показан на снимката: стойка, на която са закачени метална пластинка и пръстен от медни навивки, висящи на тънки медни проводници; дървено трупче, на което са закрепени друга метална пластинка и друг пръстен с медни намотки; два четворни държача за батерии с размер AA; 8 батерии от 1.5 V размер AA; два източника на напрежение, поставени в тръби с по три метални извода (електрода); реостат, направен от тънка летва, върху която е опънат тънък съпротивителен проводник от кантал; алуминиева пластинка, която се захваща с крокодил и като се държи с ръка и се използва за плъзгач; кабели с накрайници крокодил-крокодил; 4 съпротивления; метална линия с деления 0.5 mm и 1 мултиметър. Предполага се, че Вие носите още един мултиметър със съединяващите го кабели.

2. Определете кръговата честота $\omega = 2\pi/T$.
3. Измерете разстоянието L_m (в метри) от точката на окачване до центъра на висящия пръстен (вж. Фиг. 2).
4. Определете земното ускорение $g = L_m\omega^2$.

Напомняме известната формула за периода на махало

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L_m}{g}}. \quad (1)$$



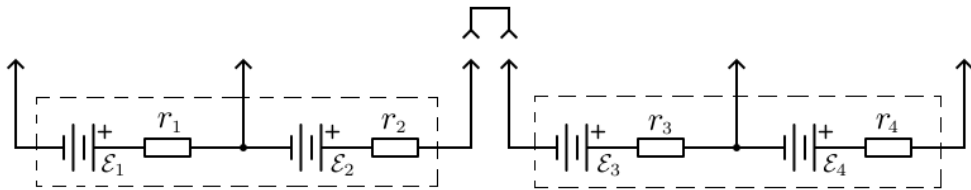
Фиг. 2. Пръстен с навита жичка виси на две тънки жички. Разстоянието от точката на окачване до центъра на пръстена е L_m . Когато махалото се отклони от равновесното си положение на малко разстояние y , върщащата сила е $F_g = -mgy/L_m$. Знакът минус означава, че силата е насочена срещу отместването.

5. С колко процента вашият резултат за земното ускорение g се различава от известната ви стойност?

Измерване на електродвижещите напрежения $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ и \mathcal{E}_4 на източниците за електричния експеримент с помощта само на амперметър и волтметър

Източникът на напрежение, който ще използвате за електричния експеримент, е съставен от много на брой малки батерии от 12 V, размер 23A, поставени в две пластмасови тръби. Всяка от тръбите има три метални извода (електрода) – по един във всеки край и един в средата. По средата между два от електродите е залепен етикет с надпис $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ или \mathcal{E}_4 . В съответните участъци последователно на батериите има поставено високоомно съпротивление r_i между всеки два от металните изводи, както е показано на еквивалентната схема на източника на напрежение на Фиг. 3. Това съпротивление е поставено с предпазна цел. Не разглобявайте източника на напрежение и не махайте предпазното съпротивление!

Точното измерване на електродвижещото напрежение само с предоставения ви волтметър не е възможно, тъй като вътрешното съпротивле-



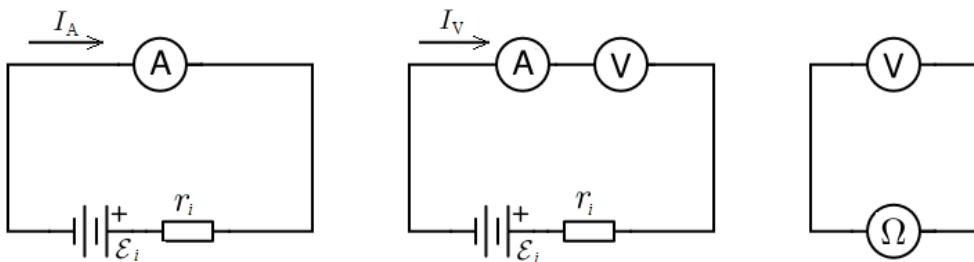
Фиг. 3. Еквивалентна схема на източника на напрежение за електричния експеримент. Пластмасовите тръби, в които са поставени батериите и съпротивлението, са означени с прекъснати линии. Винтовете (електродите), които излизат от тръбите, са означени схематично със стрелки, а захващащите ги крокодили – с допълващ знак.

ние r_i на източника е сравнимо по стойност с вътрешното съпротивление на волтметъра.

- Измерете електродвижещите напрежения \mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2 , \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_4 само с помощта на амперметър и волтметър.

Свържете амперметъра с един от дяловете от източника на напрежение, както е показано в лявата схема от Фиг. 4 и измерете тока I_A , който протича през него. В източника на напрежение има високоомно съпротивление, което ограничава тока и няма опасност да протече голям ток през амперметъра. Повторете измерването за всички четири дяла от източниците на напрежение и нанесете резултата в таблица, както е показано в примерната Табл. 1.

Свържете амперметъра и волтметъра последователно към източника на напрежение, както е показано в средната схема от Фиг. 4,



Фиг. 4. Измерване на напрежението на един дял от източника на напрежение \mathcal{E}_i за електростатичния експеримент. Вътре в тръбите между всеки два болта е скрито голямо съпротивление r_i ($i = 1, 2, 3, 4$), ограничаващо тока. Лява фигура: Между два съседни болта (електрода) включвате амперметър и токът, който протича е I_A . Средна фигура: Когато към амперметъра е включен последователно и волтметър, токът I_V е по-малък, а волтметърът показва напрежение U . Дясна фигура: Схема за пряко измерване на вътрешното съпротивление на волтметъра R_V , използвайки друг мултиметър, превключен като омметър.

Табл. 1. Примерна таблица за експериментални резултати за токовете и напрежението, измерени по схемите от Фиг. 4, както и за изчислената стойност на електродвижещото напрежение за различните дялове на източниците на напрежение.

i	I_A [mA]	I_V [mA]	U [V]	\mathcal{E} [V]	r [Ω]	R_V [Ω]
1						
2						
3						
4						

и измерете тока I_V , който протича през веригата и напрежението U , което показва волтметъра. Повторете измерването за всички четири дяла от източниците на напрежение и нанесете резултата в таблица, както е показано в примерната Табл. 1.

За всеки един дял на източника на напрежение запишете в примерната Табл. 1 електродвижещите напрежения, изчислени по формулата

$$\mathcal{E} = \frac{U}{1 - I_V/I_A}. \quad (2)$$

7. Какво е вътрешното съпротивление на всеки един дял на източниците на напрежение?

Като използвате данните от Табл. 1, определете вътрешното съпротивление за всеки един дял на източника на напрежение

$$r = \frac{U}{I_A - I_V}, \quad (3)$$

за всяко от четирите измервания.

8. Определете вътрешното съпротивление на волтметъра.

Като използвате данните от Табл. 1, определете вътрешното съпротивление на волтметъра

$$R_V = \frac{U}{I_V}, \quad (4)$$

за всяко от четирите измервания и пресметнете средната стойност от всички измервания.

Вътрешното съпротивление на омметъра може да измерите пряко по дясната схема от Фиг. 4. Сравнете изчислената средна стойност с пряко измерената. Колко процента е разликата?

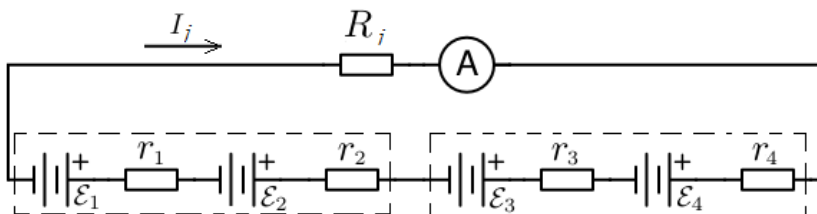
9. Изведете формули (2), (3) и (4).

Измерване на електродвижещите напрежения $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ и \mathcal{E}_4 на източниците за електричния експеримент с помощта на амперметър и резистори

Тази серия от задачи е за по-малките ученици, състезаващи се в категория S. По-големите ученици могат да се върнат към нея, след като приключат с останалите задачи.

10. Измерете съпротивленията R_1^*, R_2^*, R_3^* и R_4^* на предоставените ви четири резистора и представете резултатите таблично.
11. Свържете схемата, дадена на Фиг. 5 и измерете тока I , когато сте поставили резистор $R_1 = R_1^*, R_2 = R_1^* + R_2^*, R_3 = R_1^* + R_2^* + R_3^*$ и $R_4 = R_1^* + R_2^* + R_3^* + R_4^*$.

Нанесете измерените стойности в таблица, както е показано на примерната Табл. 2. В последната колона на таблицата запишете реципрочната стойност на тока.



Фиг. 5. Измерване на напрежението на един дял от източника на напрежение за електростатичния експеримент. Токът през веригата I_j се измерва при различни външни съпротивления R_j и така се определя вътрешното съпротивление на източника, скрито в тръбата.

12. Използвайки резултатите от Табл. 2, представете графично зависимостта на съпротивлението R_j от реципрочната стойност на тока $1/I_j$.

Табл. 2. Примерна таблица за експериментални резултати за токовете и напрежението, измерени по схемите от Фиг. 5 за различните дялове на източниците на напрежение

i	R_j [k Ω]	I_j [μ A]	$1/I_j$ [μ A $^{-1}$]
1			
2			
3			
4			

Съпротивлението R_j и реципрочната стойност на тока I_j са свързани със следната зависимост

$$R_j = \mathcal{E}_{\text{tot}} \frac{1}{I_j} - r_{\text{tot}}, \quad (5)$$

където \mathcal{E}_{tot} е сумарното електродвижещо напрежение на всички последователно свързани източници на напрежение, а r_{tot} тяхното сумарно вътрешно съпротивление.

13. *Определете електродвижещото напрежение $\mathcal{E}_{\text{tot}} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_4$ и вътрешното съпротивление $r_{\text{tot}} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$ на двата последователно свързани източници на напрежение.*

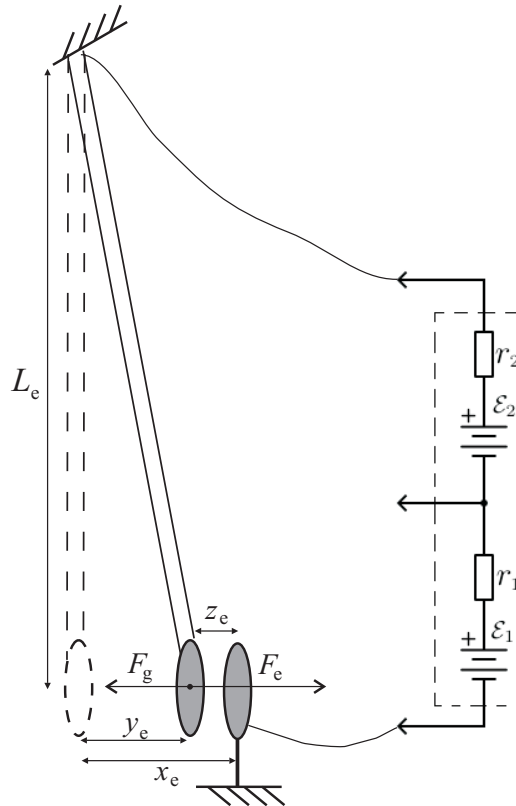
Прекарайте права, която минава най-близко до експерименталните точки. От ъгловия коефициент може да определите електродвижещото напрежение \mathcal{E}_{tot} на батерията, а от пресечната на правата и ординатата може да определите вътрешното съпротивление на батерията r_{tot} .

14. *Изведете формула (5).*

Електростатично определяне на ϵ_0

15. *Качествен електричен експеримент.*

С помощта на кабел с крокодили свържете последователно двата източника на напрежение, без да свързвате към тях волтметъра. Внимавайте с полярността на батериите. Свържете (+) с (-) на двата източника. Сумарното напрежение $U_4 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_4$ се пресмята като сума от определените по-рано в секция електродвижещи напрежения. Пак използвайки свързващите кабели с крокодили, подайте това напрежение върху кръглите пластини през излизщите от тях проводници. Нека първоначално пластините са далеч една от друга (по далече от 1 cm), но са успоредни и разположени на една ос, минаваща през центъра им. Вижте още и схемата показана на Фиг. 6. Постепенно придвижвайте трупчето, докато висещата пластина внезапно се залепи за неподвижната пластинка, закрепената към трупчето. Внимателно повторете експеримента по бавно така, че да изчакват трептенията да затихнат. Придвижвайте трупчето така, че винаги пластините да са успоредни. След като махалото загуби равновесие и пластините се залепят, прекъснете връзката им към източника на напрежението. Използвайте кабел с крокодили и свържете на късо жиците излизачи от двете пластини.



Фиг. 6. Електрично махало за измерване на диелектричната проницаемост ε_0 на вакуума. Дължината на махалото е L_e . Отместването от равновесното положение на махалото малко преди да се залепи към привличащата го неподвижна пластинка е $y_e = x_e - z_e$. Тук z_e е разстоянието между пластините малко преди махалото да се устреми към трупчето. А x_e е разстоянието между равновесното положение на махалото и неподвижната пластинка. Електричното поле между пластините се създава от последователно свързани батерии с електродвижещи напрежения \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 . Големите съпротивления, които ограничават тока са означени с r_1 и r_2 . Съпротивленията, както и батериите, са скрити в пластмасова тръба, означена символично с прекъсната линия. В равновесие електричната сила на привличане между пластините F_e се уравнисява с гравитационната сила F_g .

Тогава пластините се отделят една от друга и след като трептенията затихнат, измерете разстоянието x_e между пластините на този плосък кондензатор.

- Повторете внимателно този експеримент като измервате разстоянието x_e между пластините, с точност 0.5 mm , за различни напрежения: $U_4 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_4$, $U_3 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3$, $U_2 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$ и

Табл. 3. Таблица с експериментални резултати от електричния експеримент

i	U [V]	x_e [mm]	U^2 [V ²]	x_e^3 [mm ³]
1				
2				
3				
4				

$$U_1 = \mathcal{E}_1.$$

Запишете резултатите от измерванията в примерната Табл. 3. С помощта на калкулатор допълнете таблицата с две допълнителни колони x_e^3 и U^2 .

17. Представете графично върху милиметрова хартия зависимостта x_e^3 от U^2 и определете наклона k_e на правата, минаваща най-близо до експерименталните точки.
18. Измерете масата m_e на висящата пластинка.
За целта използвайте електронната везна, която се намира при квестора. За измерването не откачайте висящата пластинката от стойката. Поставете везната върху високата подложка, която върви заедно с нея. Направете измерването, докато пластинката е закачена за тънката медна нишка, като внимавате нишката да не оказва допълнителни сили върху пластинката по време на измерването.
19. Измерете диаметъра D_e на двете пластини.
20. Измерете разстоянието от центъра на пластинката до летвата на окачване L_e .
21. Определете диелектричната проникваемост на вакуума ε_0 чрез приближена зависимост между x_e и U , която е изведена при предположение, че $x_e \ll D_e$

$$x_e^3 = k_e U^2, \tag{6}$$

където k_e е линейният коефициент

$$k_e = \frac{27}{32} \pi \varepsilon_0 \frac{L_e D_e^2}{m_e g}. \tag{7}$$

Използвайки тази формула и експериментално измерената стойност на k_e , определете диелектричната проникваемост на вакуума

$$\varepsilon_0 = \frac{32}{27\pi} \frac{m_e g}{L_e D_e^2} k_e. \tag{8}$$

22. Към таблицата добавете още един стълб $x_e^3 \left(1 - \frac{4}{3\pi} \frac{x_e}{D_e}\right)$, като пресметнете малката поправка $\frac{4}{3\pi} \frac{x_e}{D_e}$. Повторете описания по-горе метод за едно по-точно определяне на диелектричната проницаемост на вакуума чрез формулата

$$x_e^3 \left(1 - \frac{4}{3\pi} \frac{x_e}{D_e}\right) = \frac{27}{32} \pi \varepsilon_0 \frac{L_e D_e^2}{m_e g} U^2. \quad (9)$$

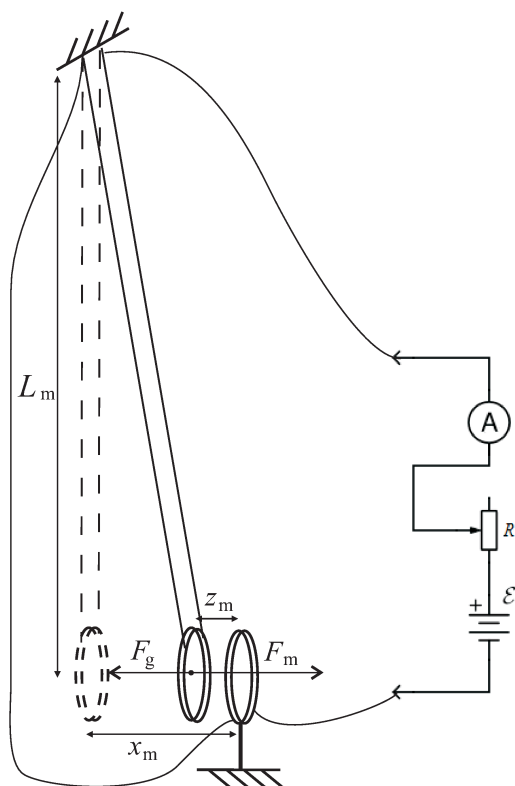
Тази формула позволява достигане на процентна точност при използването на дадената постановка. Каква е разликата в определянето на ε_0 по двата метода?

Магнитостатично определяне на μ_0

23. *Качествен магнитен експеримент*

Поставете двата пръстена успоредно на разстояние $x_m = 20$ mm, отчитано между средата на навивките. Използвайте кабели с крокодили и слобете схемата показана на Фиг. 7. Нека проследим пътя на тока, който тръгва от (+) на батерията. Първо преминава през съпротивителната канталова жица, опъната върху летвата. Такова променливо съпротивление се нарича още реохорд. Веригата се съединява от алуминиевия плъзгач зашипан с крокодил, който се държи с ръка. После токът преминава през амперметъра, висящия токов пръстен, неподвижния токов пръстен със същия брой навивки $N = 50$ и през (-) на батерията се завръща в захранващия източник.

Когато допрете плъзгача до съпротивителната жица намотките потрепват. Ако бобините се отблъскват, сменете полярността на свързването на една от тях. Токовете трябва да са успоредни и при включване на тока бобините да се привличат. Движете плъзгача по жицата, като гледате едновременно амперметъра и висящата навивка. Започнете с малки токове и, като движите плъзгача, запомнете положението, при което махалото губи устойчивост и висящият пръстен се устремява към неподвижния. Повторете експеримента бавно, като изчаквате трептенията да затихнат. Запишете най-малкия (критичния) ток I , при който спокойно висящият пръстен се залепва внезапно за неподвижния.



Фиг. 7. Магнитно махало за измерване на μ_0 , магнитната проницаемост на вакуума. Дължината на махалото е L_m . Разстоянието от неподвижната намотка до равновесното положение на махалото е x_m . А разстоянието между токовите пръстени в момента преди висящият да се устреми към неподвижния е z_m . Магнитното поле между намотките се създава от тока на 4 или 8 последователно свързани батерии от 1.5 V, поставени в държачи. Токът се измерва от амперметъра и се регулира с променливото съпротивление R с помощта на плъзгача, плъзгач се по канталовата жица, опъната върху летвата. В равновесие магнитната сила на привличане между пръстените с успоредни токове F_m се уравновесява с гравитационната сила F_g .

24. Повторете експеримента и измерете критичния ток I за различни стойности на x_m , например 25, 20, 15, 10, 5 mm.

Резултатите за разстоянието x_m и тока I представете таблично в първите две колони на Табл. 4. С помощта на калкулатор пресметнете допълнителни колони за x_m^2 и I^2 . С други думи, представете таблично зависимостта x_m^2 от I^2 .

За малките разстояния ползвайте само един държач с четири батерии.

25. Представете графично зависимостта x_m^2 от I^2 и определете наклона k_m на правата, минаваща най-близо до експерименталните точки.

Това е методика за експериментално определяне на наклона k_m .

26. Измерете дължината на махалото, т.е. разстоянието L_m от летвата до центъра на висящата бобинка.
27. Измерете масата m_m на висящата бобинка.
28. Измерете диаметъра D_m на двете бобинки.
29. Определете магнитната проницаемост на вакуума μ_0 , като използвате приближената формула

$$x_m^2 = k_m I^2, \quad (10)$$

където k_m е линейният коефициент

$$k_m = 2\mu_0 \frac{L_m N^2 D_m}{mg}. \quad (11)$$

Тази формула е приложима, когато $x_m \ll D$ и може да приемем, че проводниците са прави.

Тази формула дава възможност за изразяването на магнитната проницаемост μ_0 на вакуума чрез експериментално определения наклон

$$\mu_0 = \frac{mgk_m}{2L_m N^2 D_m}. \quad (12)$$

30. Силата на привличане между два токови пръстена е известна магнетостатична задача, която има много приложения. Точната формула за определянето на μ_0 чрез нашата постановка се дава с формулата

$$x_m^2 \left[1 + f \left(\frac{x_m}{D_m} \right) \right] = k_m I^2, \quad (13)$$

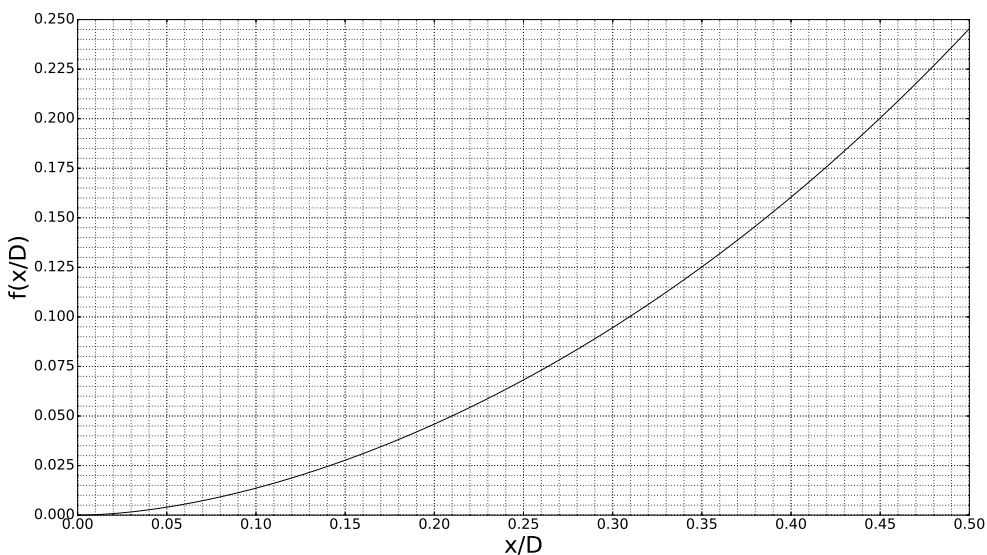
където функцията $f(x_m/D_m)$ е представена таблично по-долу и графично на Фиг. 8.

При точността, с която работим, корекционната поправка може да се пресметне и чрез приближената формула

$$f \left(\frac{x_m}{D_m} \right) \approx \frac{1}{16} \left(-5 + 6 \log \frac{8D_m}{x_m} \right) \frac{x_m^2}{D_m^2}. \quad (14)$$

Пример за подреждането на експерименталните данни и корекционния множител е даден в Табл. 4. Попълнете Вашата таблица.

x/D	$f(x/D)$	x/D	$f(x/D)$	x/D	$f(x/D)$	x/D	$f(x/D)$	x/D	$f(x/D)$
0.005	0.0001	0.105	0.0148	0.205	0.0480	0.305	0.0976	0.405	0.1644
0.010	0.0002	0.110	0.0162	0.210	0.0502	0.310	0.1005	0.410	0.1682
0.015	0.0005	0.115	0.0175	0.215	0.0522	0.315	0.1034	0.415	0.1721
0.020	0.0008	0.120	0.0188	0.220	0.0545	0.320	0.1066	0.420	0.1760
0.025	0.0012	0.125	0.0202	0.225	0.0566	0.325	0.1096	0.425	0.1800
0.030	0.0016	0.130	0.0216	0.230	0.0589	0.330	0.1126	0.430	0.1840
0.035	0.0021	0.135	0.0231	0.235	0.0613	0.335	0.1156	0.435	0.1880
0.040	0.0027	0.140	0.0245	0.240	0.0634	0.340	0.1190	0.440	0.1920
0.045	0.0034	0.145	0.0262	0.245	0.0659	0.345	0.1221	0.445	0.1965
0.050	0.0040	0.150	0.0278	0.250	0.0684	0.350	0.1252	0.450	0.2006
0.055	0.0048	0.155	0.0294	0.255	0.0709	0.355	0.1287	0.455	0.2047
0.060	0.0056	0.160	0.0312	0.260	0.0732	0.360	0.1319	0.460	0.2092
0.065	0.0064	0.165	0.0328	0.265	0.0757	0.365	0.1355	0.465	0.2134
0.070	0.0073	0.170	0.0345	0.270	0.0783	0.370	0.1390	0.470	0.2181
0.075	0.0083	0.175	0.0365	0.275	0.0810	0.375	0.1423	0.475	0.2223
0.080	0.0092	0.180	0.0382	0.280	0.0837	0.380	0.1460	0.480	0.2270
0.085	0.0103	0.185	0.0401	0.285	0.0864	0.385	0.1497	0.485	0.2317
0.090	0.0114	0.190	0.0421	0.290	0.0891	0.390	0.1530	0.490	0.2361
0.095	0.0125	0.195	0.0440	0.295	0.0919	0.395	0.1568	0.495	0.2408
0.100	0.0136	0.200	0.0461	0.300	0.0947	0.400	0.1606	0.500	0.2456



Фиг. 8. Корекционната поправка $f(x_m/D_m)$ от уравнение (13) като функция от безразмерното отношение на отместването от равновесното положение x_m и диаметра на навивките D_m .

Табл. 4. Примерна таблица за подреждане на експериментални резултати и корекционната функция за експеримента с токовете пръстени. Между I^2 и $x_m^2(1 + f)$ има линейна зависимост и коефициента на пропорционалност определя μ_0

i	x_m [mm]	I [mA]	x_m^2 [mm ²]	I^2 [mA ²]	x_m/D_m	$1 + f(x_m/D_m)$	$x_m^2(1 + f)$ [mm ²]
1	5						
2	10						
3	15						
4	20						
5	25						

31. Използвайки точната формула (13) и графично представената корекционна функция от Фиг. 8 табулирана отгоре, представете експерименталните данни графично: по ордината $(1 + f)x_m^2$, по абсциса I^2 и от наклона определете магнитната проницаемост μ_0 на вакуума. С колко процента се различават резултатите обработени чрез приближената и точната формула?

Определяне на скоростта на светлината

Използвайте определените в предишните подусловия ε_0 и μ_0 и пресметнете скоростта на светлината

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}. \quad (15)$$

Не се смущавайте, ако резултатът се различава от известната Ви стойност, това е Вашето първо измерване на фундаментална константа.

ТЕОРЕТИЧНИ ЗАДАЧИ

1. Използвайте формулите за силата на привличане между пластините на безкраен плосък кондензатор и изведете формула (7), която използвахте за определянето на ε_0 .
2. Използвайте формулите за силите на привличане между безкрайни успоредни токове и изведете формула (7), която използвахте за приближено определяне на μ_0 .

ЗАДАЧА ЗА ДОМАШНА РАБОТА. Премия на Зомерфелд 137 лева

Потърсете в учебници по електродинамика, енциклопедии или в Интернет формулата за капацитет на кондензатор, при която се отчитат ефектите на края и изведете по-точната формула (9) за определянето на ε_0 с нашата постановка.

Аналогично потърсете в учебници формулите за взаимна индуктивност и сили на взаимодействие между токови пръстени и изведете точната формула (13). Корекционната функция $f(x_m/D_m)$ може да бъде пресметната числено или да се получи само първият член на уравнение (14) на реда по степените на x_m/D_m .

Решението пратете на ero@bgphysics.eu от адреса, на който сте се регистрирали до 07:00 на 24 април 2016 г.

Може да работите в колектив и да се консултирате с професори по теоретична физика, електродинамика или електротехника. Премията се получава лично от участника и само в деня на обявяването на резултатите.

РЕШЕНИЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНАТА ЗАДАЧА

Гравитационна част. Измерване на земното ускорение g

1. Периодът T на люлеене на висящата пластинка е $T = 1.5$ s.
2. Кръговата честота ω на люлеене на висящата пластинка е $\omega = 4.2$ rad/s.
3. Разстоянието L_m от точката на окачване до центъра на висящата пластинка е $L_m = 55.1$ cm.
4. Земното ускорение е $g = 9.7$ m/s².
5. Отклонението от известната стойност $g = 9.81$ m/s² е 1.1%.

Измерване на електродвижещите напрежения $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ и \mathcal{E}_4 на източниците за електричния експеримент с помощта само на амперметър и волтметър

6. Измерване на електродвижещите напрежения $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ и \mathcal{E}_4 на източника на напрежение.
Резултатите от измерването са дадени в Табл. 5.
7. Вътрешните съпротивления на различните дялове на източника на напрежение са изчислени в Табл. 5.
8. Вътрешните съпротивления на волтметъра е изчислено за различните измервания и е нанесено в Табл. 5.

Табл. 5. Таблица с експериментални резултати за токовете и напрежението измерени по схемите от Фиг. 4 за различните дялове на източника на напрежение

i	$I_A [\mu A]$	$I_V [\mu A]$	$U [V]$	$\mathcal{E} [V]$	$r [\Omega]$	$R_V [M\Omega]$
1	208	66.8	67.0	98.7	474	0.99
2	209	67.1	66.9	98.5	471	1.00
3	208	66.7	67.0	98.6	474	0.99
4	208	66.9	66.8	98.5	473	1.00

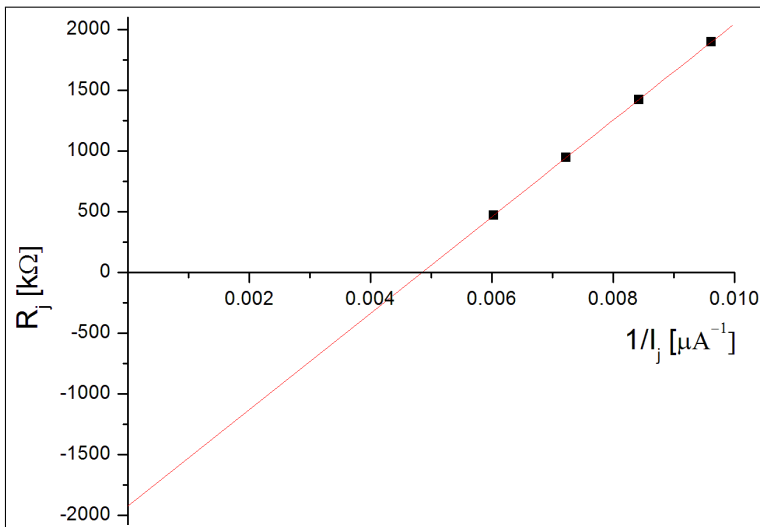
9. Чрез заместване се проверява, че формулите (2), (3) и (4) удовлетворяват уравненията за съответните електрични вериги от Фиг. 4

$$\mathcal{E} = rI_A = (r + R_V)I_V \quad (16)$$

Измерване на електродвижещите напрежения $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ и \mathcal{E}_4 на източниците за електричния експеримент с помощта на амперметър и резистори

10. Вж. Табл. 6
11. Вж. Табл. 7
12. без решение (вж. Фиг. 9)
13. без решение (вж. Фиг. 9)
14. без решение (вж. Фиг. 9)

Резултатите от измерването са представени графично на Фиг. 9.



Фиг. 9. Графично представяне на резултатите за измерването на електродвижещото напрежение \mathcal{E}_{tot} на батерията.

Табл. 6. Таблица за експериментални резултати за съпротивленията R_j^*

j	R_j^* [kΩ]
1	465
2	467
3	465
4	465

Табл. 7. Таблица за експериментални резултати за токовете и напрежението, измерени по схемите от Фиг. 5 за различните дялове на източниците на напрежение

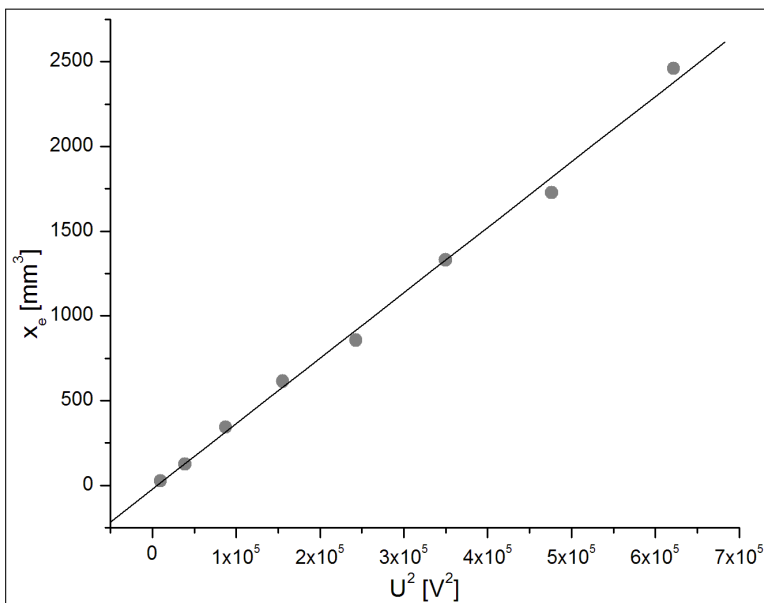
j	R_j [kΩ]	I_j [μA]	$1/I_j$ [μA ⁻¹]
1	465	167.5	0.00597
2	932	139.6	0.00716
3	1397	119.7	0.00835
4	1862	104.8	0.00954

Електростатично определяне на ϵ_0

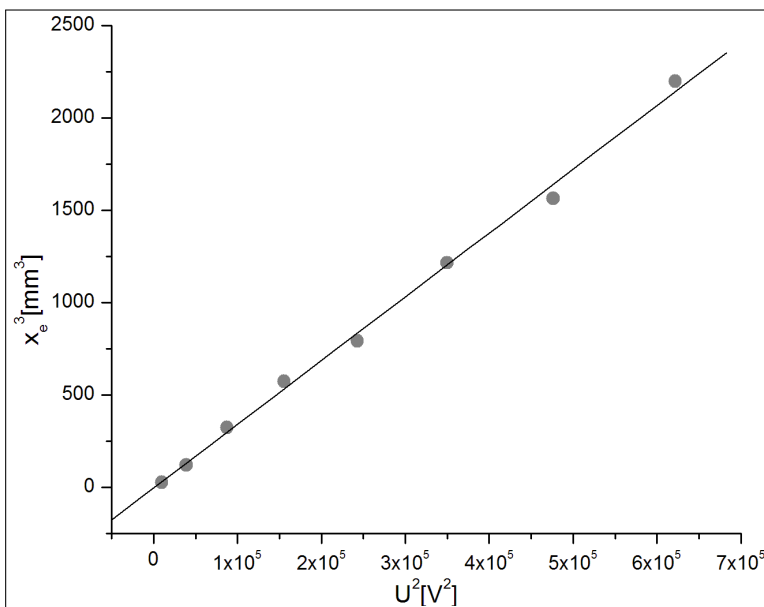
15. Качествен експеримент
16. Измерванията на критичното разстояние x_e при различни напрежения U между пластините са дадени в Табл. 8.
Таблично зависимостта на x_e^3 от U^2 е изчислена и дадена в Табл. 8
17. Зависимостта на x_e^3 от U^2 е представена графично на Фиг. 10. Наклонът k_e на правата, която минава най-близо до експерименталните точки е $k_e = 0.00386 \text{ mm}^3/\text{V}^2$.
18. Масата на висящата пластини е $m_e = 1.14 \text{ g}$.
19. Диаметърът на двете пластини е $D_e = 5.4 \text{ cm}$.
20. Дължината на махалото е $L_e = 57.4 \text{ cm}$.
21. Диелектричната проницаемост на вакуума е $\epsilon_0 = 9.83 \times 10^{-12} \text{ F/m}$.
22. Зависимостта на $x_e^3 \left(1 - \frac{4}{3\pi} \frac{x_e}{D_e}\right)$ от U^2 е представена таблично в Табл. 8 и графично на Фиг. 11. Наклонът k_e на правата, която минава най-близо до експерименталните точки е $k_e = 0.00345 \text{ mm}^3/\text{V}^2$.

Табл. 8. Таблица с експериментални резултати от електричния експеримент

i	U_e [V]	x_e [mm]	U_e^2 [V ²]	x_e^3 [mm ³]	$x_e^3 \left(1 - \frac{4}{3\pi} \frac{x_e}{D_e}\right)$ [mm ³]
1	98.7	3.0	9.74×10^3	27.0	26.4
2	197.2	5.0	38.9×10^3	120	120
3	295.9	7.0	87.5×10^3	260	261
4	394.3	8.5	155.5×10^3	573	573
5	493.0	9.5	243.1×10^3	857	793
6	591.6	11.0	349.9×10^3	1331	1216
7	690.2	12.0	476.3×10^3	1728	1565
8	788.7	13.5	621.9×10^3	2460	2200



Фиг. 10. Графично представяне на резултатите от електричния експеримент.



Фиг. 11. Графично представяне на резултатите от електричния експеримент, отчитайки краевите ефекти.

Диелектричната проникваемост на вакуума $\epsilon_0 = 8.82 \times 10^{-12}$ F/m. Разликата от двата метода е 11% и благодарение на отчитането на поправката получаваме 0.3% отклонение от истинската стойност на ϵ_0 , която е 8.85×10^{-12} F/m.

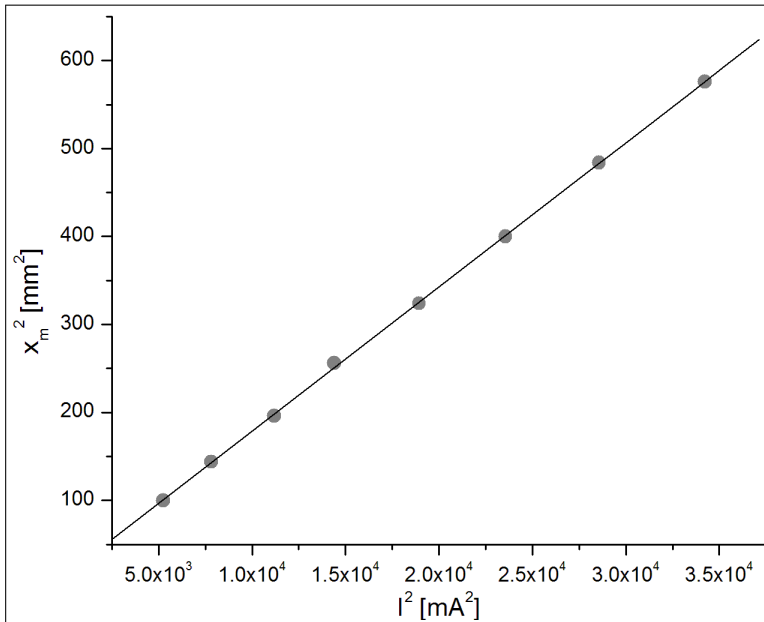
Магнитно определяне на μ_0

23. Качествен експеримент
24. Критичното разстояние x_m при различни токове I през двете бобинки са дадени в Табл. 9.

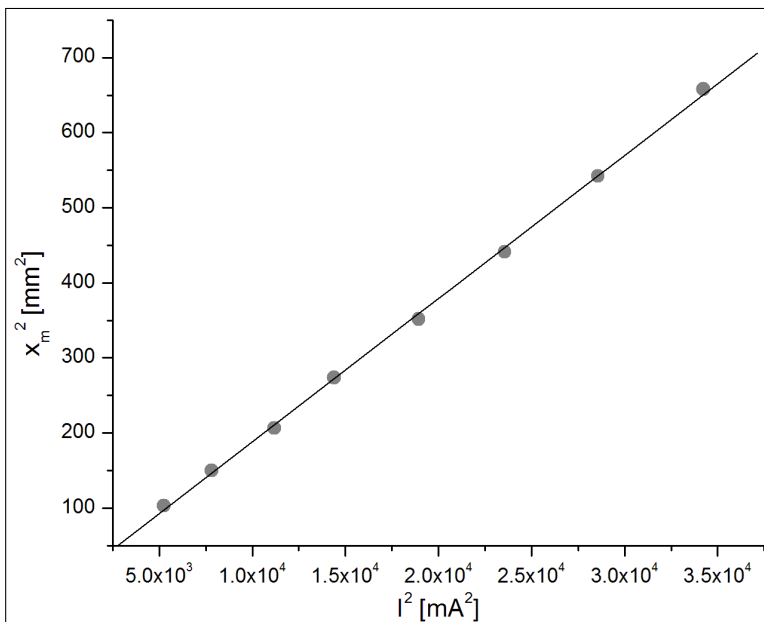
Табл. 9. Експериментални резултати и корекционната функция за експеримента с токовете пръстени

i	x_m [mm]	I [mA]	x_m^2	I^2 [mA ²]	x_m/D_m	$1 + f(x_m/D_m)$	$x_m^2(1 + f)$ [mm ²]
1	10	72.4	100	5241.76	0.156 25	1.0296	102.96
2	12	88.4	144	7814.56	0.1875	1.0405	19.832
3	14	105.8	196	11 193.64	0.218 75	1.053	206.388
4	16	120	256	14 400	0.25	1.0684	273.5104
5	18	137.6	324	18 933.76	0.281 25	1.085	351.54
6	20	153.5	400	23 562.25	0.3125	1.103	441.2
7	22	169	484	28 561	0.343 75	1.120	542.08
8	24	185	576	34 225	0.375	1.1423	657.9648

25. Зависимостта на x_m^2 от I^2 е дадена на Фиг. 12. Наклонът на правата минаваща най-близо до експерименталните точки е $k_m = 0.0164$ A²/m².
26. Разстоянието от точката на окачване до центъра на висящата бобинка е $L_m = 55.8$ cm.
27. Масата на висящата бобинка е $m_m = 1.18$ g.
28. Диаметърът на двете бобинки е $D = 65$ mm.
29. Магнитната проникваемост във вакуум е $\mu_0 = 10.5 \times 10^{-7}$ H/m.
30. Корекционният множител е определен от Фиг. 8 и са попълнени корекционните множители в съответните колони на Табл. 9.
31. Наклонът на правата с корекционната поправка е $k_m = 0.0191$ A²/m² и зависимостта е дадена на Фиг. 13. Магнитната проникваемост във вакуум е $\mu_0 = 12.2 \times 10^{-7}$ H/m. Разликата от двата метода е 14% и благодарение на корекцията постигаме точност 4% до истинската стойност на μ_0 , която е 1.26×10^{-6} H/m.



Фиг. 12. Графично представяне на резултатите от магнитния експеримент.



Фиг. 13. Графично представяне на резултатите от магнитния експеримент с корекционна поправка.

Определяне на скоростта на светлината

С получените стойности в предните две секции за ε_0 и μ_0 пресмятаме скоростта на светлината по формула (15) $c = 3.048 \times 10^8$ m/s. Отклонението от точната стойност за скоростта на светлината $c = 2.998 \times 10^8$ m/s е 2%.

РЕШЕНИЕ НА ТЕОРЕТИЧНИТЕ ЗАДАЧИ

Извод на зависимостта на критичното разстояние x_m , при което пластините се залепват под действието на електричните сили, от напрежението U върху пластините

Силата, която действа на висящата пластина, е равна на разликата от електричната сила F_e на привличане на двете пластини и хоризонталната проекция на силата на тежестта F_g

$$F = F_e - F_g. \quad (17)$$

Потенциалната енергия на хоризонталната проекция на силата на тежестта е

$$W_g = mg \frac{y^2}{2L} = mg \frac{(x-z)^2}{2L}, \quad (18)$$

а големината на силата е

$$F_g = -W'(z) = -\frac{dW_g}{dz} = mg \frac{x-z}{L}. \quad (19)$$

Тук използваме че разстоянието z между двете пластини е равно на разликата от разстоянието x на неподвижната пластинка спрямо равновесното положение на висящата пластинка, когато не е приложено напрежение върху тях, и отклонението y на висящата пластинка от равновесното ѝ положение.

Потенциалната енергия на висящата пластинка, намираща се в електричното поле на неподвижната пластинка, е

$$W_e = -\frac{CU^2}{2}, \quad (20)$$

където C е капацитетът на кондензатора, образуван от двете кръгли пластини с радиус R

$$C = \varepsilon_0 \frac{\pi R^2}{z}, \quad (21)$$

следователно

$$W_e = -\varepsilon_0 \frac{\pi R^2 U^2}{2z}. \quad (22)$$

Електричната сила, която действа на всяка от пластините, е

$$F_e = -W'(z) = -\frac{dW_e}{dz} = -\frac{d}{dz} \left(-\varepsilon_0 \frac{\pi R^2 U^2}{2z} \right) = -\varepsilon_0 \frac{\pi R^2 U^2}{2z^2} \quad (23)$$

Ако означим с W потенциалната енергия на висящата пластина, то от (22) и (18) получаваме

$$W = W_e + W_g = -\varepsilon_0 \frac{\pi R^2 U^2}{2z} + mg \frac{(x-z)^2}{2L}. \quad (24)$$

Резултантната сила, действаща на висящата пластина, се получава като заместим (23) и (19) в (17)

$$F = -W'(z) = -\frac{dW}{dz} = -\varepsilon_0 \frac{\pi R^2 U^2}{2z^2} + mg \frac{x-z}{L}. \quad (25)$$

Когато бавно приближаваме пластинката, поставена на статив към висящата пластинка, при едно критично разстояние x_e и z_e висящата пластинка изведнъж се залепва за статичната пластинка. Това разстояние може да определим от нулирането на първата и втората производна на потенциалната енергия, т.е. от условието максимумът и минимумът на потенциалната енергия да съвпадат.

От нулирането на първата производна на потенциалната енергия

$$W'(z) = \frac{dW}{dz} = 0 \quad (26)$$

получаваме

$$\varepsilon_0 \frac{\pi R^2 U^2}{2z_e^2} - mg \frac{x_e - z_e}{L} = 0, \quad (27)$$

което още може да запишем по следния начин

$$z_e^3 \left(\frac{x_e}{z_e} - 1 \right) = \varepsilon_0 \frac{L \pi R^2 U^2}{2mg}. \quad (28)$$

От нулирането на втората производна на потенциалната енергия

$$W''(z) = \frac{d^2W}{dz^2} = 0 \quad (29)$$

получаваме

$$2\varepsilon_0 \frac{\pi R^2 U^2}{2z_e^3} - \frac{mg}{L} = 0, \quad (30)$$

откъдето намираме критичното разстояние между двете пластини

$$z_e^3 = \varepsilon_0 \frac{L \pi R^2 U^2}{mg}. \quad (31)$$

Ако заместим израза (31) за z_e в (28)

$$\varepsilon_0 \frac{L\pi R^2 U^2}{mg} \left(\frac{x_e}{z_e} - 1 \right) = \varepsilon_0 \frac{L\pi R^2 U^2}{2mg} \quad (32)$$

и съкратим еднаквите членове

$$\frac{x_e}{z_e} - 1 = \frac{1}{2}, \quad (33)$$

получаваме една проста връзка между двете критични разстояния

$$x_e = \frac{3}{2} z_e. \quad (34)$$

Като заместим равенство (34) в (31), получаваме търсеното съотношение между x_e и U

$$x_e^3 = \frac{27}{8} \varepsilon_0 \frac{L\pi R^2 U^2}{mg}. \quad (35)$$

Извод на зависимостта на критичното разстояние x_m , при което бобините се залепват под действието на магнитните сили, създадени от тока I

Силата, която действа на висящата бобинка, е равна на разликата от магнитната сила F_m на привличане на двете бобинки и хоризонталната проекция на силата на тежестта F_g

$$F = F_m - F_g. \quad (36)$$

Потенциалната енергия на хоризонталната проекция на силата на тежестта е

$$W_g = mg \frac{y^2}{2L} = mg \frac{(x - z)^2}{2L}, \quad (37)$$

а големината на силата е

$$F_g = -mg \frac{x - z}{L}, \quad (38)$$

Потенциалната енергия на висящата бобинка, намираща се в магнитното поле на неподвижната бобинка, е

$$W_m = -\mu_0 I^2 N^2 R \ln z, \quad (39)$$

където I е токът през двете бобинки, N е броят на навивки на всяка от бобинките, R е радиусът на бобинките, а z е разстоянието между тях.

Магнитната сила, която действа на всяка от бобинките, е

$$F_m = -W'(z) = -\frac{dW_m}{dz} = -\frac{d}{dz}(-\mu_0 I^2 N^2 R \ln z) = \mu_0 \frac{I^2 N^2 R}{z}. \quad (40)$$

Ако означим с W потенциалната енергия на висящата бобинка, то от (39) и (37) получаваме

$$W = W_m + W_g = -\mu_0 I^2 N^2 R \ln z + mg \frac{(x-z)^2}{2L}. \quad (41)$$

Резултанта сила, действаща на висящата бобинка, се получава, като заместим (40) и (38) в (36)

$$F = -W'(z) = -\frac{dW}{dz} = \mu_0 \frac{I^2 N^2 R}{z} - mg \frac{x-z}{L}. \quad (42)$$

Когато бавно приближаваме бобинката, поставена на статив към висящата бобинка, при едно критично разстояние x_m и z_m висящата бобинка изведнъж се залепва за статичната бобинка. Това разстояние може да определим от нулирането на първата и втората производна на потенциалната енергия, т.е. от условието максимумът и минимумът на потенциалната енергия да съвпадат.

От нулирането на първата производна на потенциалната енергия

$$W'(z) = \frac{dW}{dz} = 0 \quad (43)$$

получаваме

$$\mu_0 \frac{I^2 N^2 R}{z_m} - mg \frac{x_m - z_m}{L} = 0. \quad (44)$$

което още може да запишем по следния начин

$$z_m^2 \left(\frac{x_m}{z_m} - 1 \right) = \mu_0 \frac{LI^2 N^2 R}{mg}. \quad (45)$$

От нулирането на втората производна на потенциалната енергия

$$W''(z) = \frac{d^2W}{dz^2} = 0 \quad (46)$$

получаваме

$$-\mu_0 \frac{I^2 N^2 R}{z_m^2} + \frac{mg}{L} = 0, \quad (47)$$

откъдето намираме критичното разстояние между двете бобинки

$$z_m^2 = \mu_0 \frac{LI^2 N^2 R}{mg}. \quad (48)$$

Ако заместим израза (48) за z_m в (45)

$$\mu_0 \frac{LI^2 N^2 R}{mg} \left(\frac{x_m}{z_m} - 1 \right) = \mu_0 \frac{LI^2 N^2 R}{mg} \quad (49)$$

и съкратим еднаквите членове, получаваме една проста връзка между двете критични разстояния

$$x_m = 2z_m. \quad (50)$$

Като заместим равенство (50) в (31), получаваме търсеното съотношение между x_m и I

$$x_m^2 = 4\mu_0 \frac{LN^2 R}{mg} I^2. \quad (51)$$

НЕЩО КАТО ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Докато 1-вата и 3-тата Олимпиади по експериментална физика (ОЕФ) бяха посветени на анализа на работата на патентовани съвременни устройства, 2-рата бе посветена на измерване на фундаменталната константа на Планк. В настоящата 4-та олимпиада отново се измерва фундаментална константа – скоростта на светлината. Абсолютният шампион Деян Максимовски достигна точност 1 процент, което е и границата на възможностите на постановката, но повече от 12 ученика измериха скоростта на светлината с точност няколко процентна.

Някои ученици извършиха превъзходни измервания, но сбъркаха в обработката на данните, като не отчетоха, че единицата за маса не е грам а килограм. Това е техническа грешка, но въпреки това участието в олимпиадата стимулира тяхната работа и амбиции да продължат своето образование в области, където физиката намира приложение. Текстът на задачата е адресиран за ученици, решението е за учители и инженери, даващи консултация, а пълното математично описание на постановката, адресирано главно за съставители на нови постановки, е дадено на студентско ниво в сървър на Корнелския университет [11].

Като цяло, постановките от ОЕФ дават идея, какви разработки на световно ниво могат да бъдат направени от учителите за кабинетите по физика без значителни средства. Олимпиадата постигна и друг успех – бе създадена атмосферна на приятелство и учениците работиха с вдъхновение. *Physics is fun (Sic.) R.P. Feynman.*

ОТЗИВИ ЗА ПРОВЕДЕНАТА ОЛИМПИАДА ПО ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ФИЗИКА ЕРО-4 (ДЕН НА СВЕТЛИНАТА)

На Четвъртата Олимпиада по Експериментална физика, проведена на 23 Април 2016 г. участваха 123 ученика от 7 до 12 клас, 34 придружаващи учители от 19 града от България, Република Македония, Босна и Херцеговина, Русия.

Отзиви от олимпиадата дадоха 25 участника, 6 придружаващи учители, 2 квестори. По-долу са представени в табличен вид техните отговори на пет въпроса:

Въпрос 1: *Вашата оценка за трудността на задачата*

Отговор	Брой
Много трудна	3
Трудна	14
Нормална	15
Лесна	3
Много лесна	1

Въпрос 2: *Ще участвате ли в олимпиадата през следващата година?*

Отговор	Брой
Ще участвам	26
Не мога да потвърдя в момента	5
Няма да участвам	0
Да, ако се проведе в България	0
Да, ако се проведе в Македония	0
Да, ако се проведе в Сърбия	0
Само ако е международна	4

Въпрос 3: *Намирате ли задачата за интересна?*

Отговор	Брой
Завладяваща	24
Интересна	11
Рутинна	1
Не е интересна	1
Досадна	0

Въпрос 4: *Дайте оценка за нивото на организацията на Олимпиадата*

Отговор	Брой
Организирана по-добре от другите олимпиади	6
Свършено организирана	6
Много добре организирана	14
Добре организирана	6
Нормално организирана	2
Лошо организирана	3

Въпрос 5: *От коя държава сте?*

Отговор	Брой
България	27
Република Македония	7
Босна и Херцеговина	2
Русия	1

Допълнителни препоръки и коментари за Олимпиадата, получени от формата за обратна връзка:

- Поголем прстор (поголема површина) за изведувaне на експериментот и решавање на задачите. Задачи да бидат прилагодени за сите ученици од сите учевни материјали. И да биде одвоени сечии задачи според нивоата(S,M,L и XL). Преводот да биде подобар!
- Специални благодарности за радостта, която доставихте на учениците от МГ-Варна!
- Страхотна олимпиада и като цяло много полезна, даваща много знания и практически умения. Като идея бих искал да предложиа вместо жица да се ползва потенциометър и към него да се прикрепи дълъг лост за по-фино регулиране. Самия потенциометър да е закрепен неподвижно за дъска. Поздравления на екипа, който се грижи за организацията. Наистина е на професионално ниво и доста по-добре организирана от други.
- Желая Ви УСПЕХ в начинанието!
- Благодаря за незабравимите забавление и интерес, породени от опитите на олимпиадата!
- Много ми харесва. Задачите са измислени много добре и интересно. Всеки желяещ може да постигне някакъв резултат, да получи мотивация за ученето си. Подобен вид Олимпиада е състезанието, в което е важно участието, а не победата. На учениците ми е било много интересно, въпреки, че не са заели призовите места. Поздравявам Ви с тази инициатива. Пожелавам Ви Олимпиадата да се развива все повече и повече и да се появяват участници и от много други страни.

Литература

- [1] V.G. Yordanov, V.N. Gourev, S.G. Manolev, A.M. Varonov, T.M. Mishonov, Measuring the speed of light with electric and magnetic pendulum, arXiv:1605.00493 [physics.ed-ph]
- [2] *Second Experimental Physics Olympiad: The Day of the Photon in the International Year of Light, Sofia, 25 April (2015)*
<http://www.light2015.org/Home/Event-Programme/2015/Competition/Bulgaria-Second-Experimental-Physics-Olympiad--25-April-2015-in-Sofia.-The-Day-of-the-Photon-in-the-International-Year-of-the-Light.html>
- [3] V.G. Yordanov, P.V. Peshev, S.G. Manolev, and T.M. Mishonov, *Charging of capacitors with double switch. The principle of operation of auto-zero and chopper-stabilized DC amplifiers*, arXiv:1511.04328 [physics.ed-ph],
<http://arxiv.org/abs/1511.04328>, (2015).
- [4] V.N. Gourev, S.G. Manolev, V.G. Yordanov, and T.M. Mishonov, *Measuring Plank constant with colour LEDs and compact disk*, arXiv:1602.06114 [physics.ed-ph],
<http://arxiv.org/abs/1602.06114>, (2015).
- [5] S.G. Manolev, V.G. Yordanov, N.N. Tomchev, and T.M. Mishonov, *Volt-Ampere characteristic of "black box" with a negative resistance*, arXiv:1602.08090 [physics.ed-ph], <http://arxiv.org/abs/1602.08090>, (2015).
- [6] J.C. Maxwell, *On a Method of Making a Direct Comparison of Electrostatic with Electromagnetic Force; with a Note on the Electromagnetic Theory of Light*, Phil. Trans. **CLVIII**, June 18 (1868).
- [7] E.M. Purcell, *Electricity and Magnetism*, Berkeley Physics Course **Vol. 2** (McGraw-Hill, New York, 1963), problem 7.25, Fig. 7.42.
- [8] MIT OCW, *Course 8.02T*, <http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-02t-electricity-and-magnetism-spring-2005/labs/>, Experiments 2 and 8, (2005).
- [9] V.N. Gourev, V.G. Yordanov and T.M. Mishonov, *Measurement of the speed of light with an analytic scale* (in Bulgarian), In Proceedings of the 2nd Bulgarian National Congress on Physical Sciences, Sofia, Bulgaria, Sept. 19-25, 2014; Mishonov T.M. (Ed.), [DVD] Heron Press: Sofia (ISBN: 978-954-580-333-8)
http://optics.phys.uni-sofia.bg/disk_CONGRESS/html/pdf/S1012.pdf.
- [10] Gimnazia Brezice, *Determination of ϵ_0 as a maturity exam for gymnasium (high school) in Brezice Slovenia* (in Slovenian), http://www2.arnes.si/~bivsic/fizika/vaje/laboratorijske_vaje_matura.pdf, Laboratorijske vaje za maturo, gimnazija.brezice@guest.arnes.si, (2014).
- [11] T. M. Mishonov, A. M. Varonov, D. D. Maskimovski, S. G. Manolev, V. N. Gourev, V. G. Yordanov, *An undergraduate laboratory experiment on measuring the velocity of light with a catastrophic machine*, arXiv:1605.05218 [physics.ed-ph]; submitted to Eur. J. Phys. <http://arxiv.org/abs/1605.05218>

ДОПЪЛНИТЕЛНА БЕЛЕЖКА

Докато подготвяхме работата за печат в сп. *Физика: Методология на обучението*, излезе университетската версия на тази задача, адресирана към колеги, които ще съставят задачи за следващите олимпиади, на английски език:

T.M. Mishonov, A.M. Varonov, D.D. Maksimovski, S.G. Manolev, V.N. Gourev and V.G. Yordanov :

An undergraduate laboratory experiment for measuring ε_0 , μ_0 and speed of light c with do-it-yourself catastrophe machines: electrostatic and magnetostatic pendula.

Eur. J. Phys. **38** (2017) 025203 (18pp)

doi:10.1088/1361-6404/38/2/025203.

Тя може също така да бъде намерена и на сайта на Софийски клон на Съюза на физиците в България <http://bgphysics.eu/> в бутон ЕРО, име на файла: EJP_38_025203_2017.pdf

Measuring the Speed of Light with Electric and Magnetic Pendulum

**Vasil G. Yordanov¹, Vassil N. Gourev¹, Stojan G. Manolev²,
Albert M. Varonov³, Todor M. Mishonov³**

¹Department of Atomic Physics, St. Kliment Ohridski University of Sofia,
5 James Bourchier Blvd., 1164 Sofia

²Middle School "Goce Delchev", Purvomaiska str. 3, MKD-2460 Valandovo

³Department of Theoretical Physics, St. Kliment Ohridski University of Sofia,
5 James Bourchier Blvd., 1164 Sofia

Abstract: This problem was given at the Fourth Experimental Physics Olympiad 'The Day of Light' on 23 April 2016 in Sofia organized by the Sofia Branch of the Union of Physicists in Bulgaria and the Society of Physicists of the Republic of Macedonia, Strumica. The task regards a method for measurement of the speed of light c , one of the fundamental physical constants. Two different experimental set-ups allowing determination of ε_0 and μ_0 were given to the students. The experiment was inspired by the mathematical theory of catastrophe.