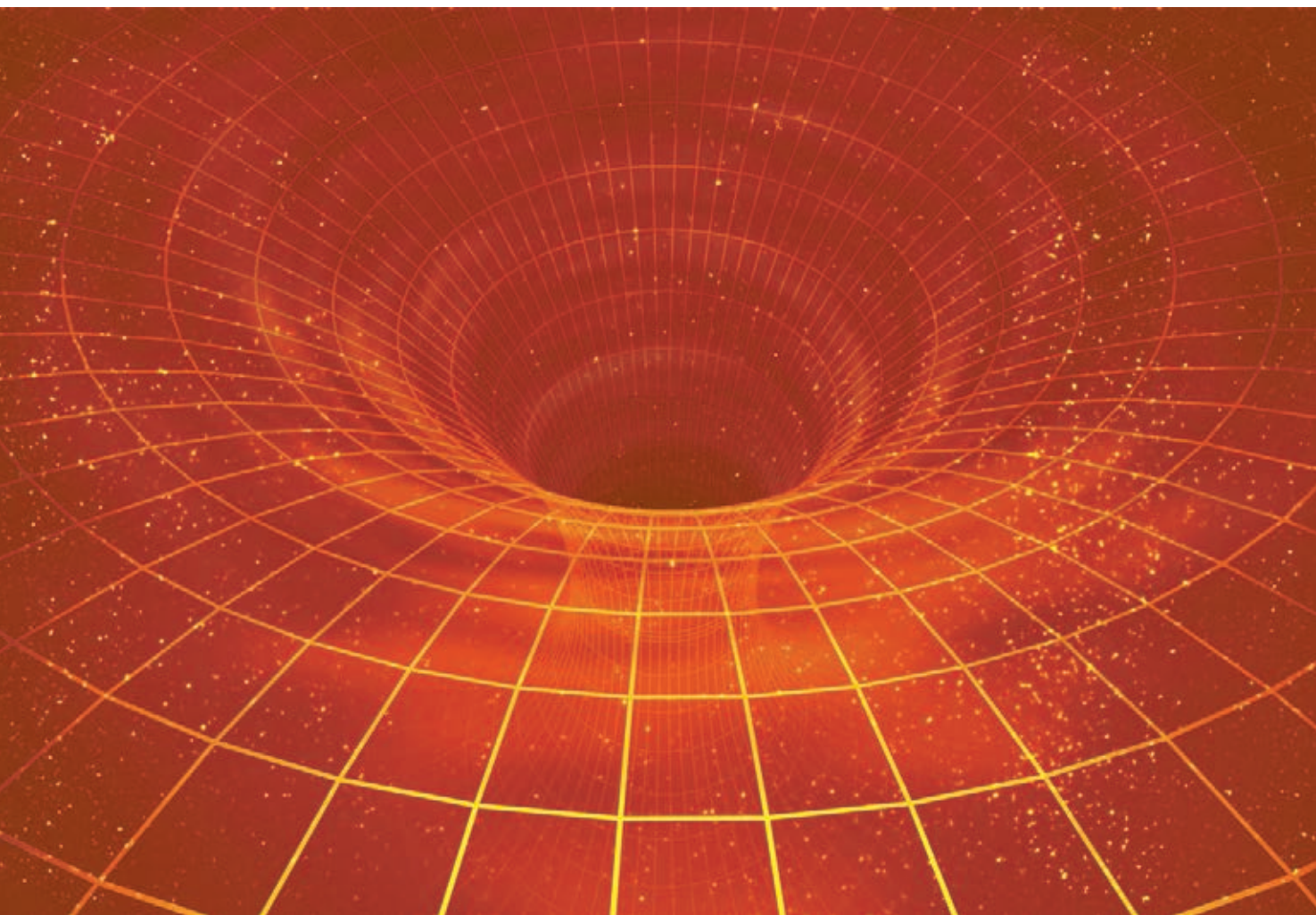


მერაბ ტულუში, თეიმურაზ შენგელია,
თემურ შენგელია, ოთარ ღონღაძე

ფიზიკა

მოსწავლის წიგნი 10



გამომცემლობა „საქართველოს მაცნე“

მერაბ ტულუში, თეიმურაზ შენგელია,
თემურ შენგელია, ოთარ ღონღაძე

ფიზიკა

მოსწავლის წიგნი

10

I სემესტრი

გრიფინიჭებულია საქართველოს განათლებისა და
მეცნიერების სამინისტროს მიერ 2022 წელს



გამომცემლობა „საქართველოს მაცნე“

ფიზიკა 10

მოსწავლის წიგნი

I სემესტრი

ავტორები:

მერაბ ტულუში, შპს „მეექვსე საავტორო სკოლის“ ფიზიკის მასწავლებელი;

თეიმურაზ შენგელია, კერძო სკოლა „მერმისის“ ფიზიკის მასწავლებელი;

თემურ შენგელია, ქართულ-ამერიკული სკოლის ფიზიკის მასწავლებელი;

ოთარ ღონღაძე, ვ. კომაროვის სახელობის თბილისის ფიზიკა-მათემატიკის 199-ე საჯარო სკოლის ფიზიკის მასწავლებელი

რედაქტორი: **ნათელა თუხარელი**

დიზაინერ-დამკაბადონებელი **ლია მოსეშვილი**

გამომცემლობა „საქართველოს მაცნე“

მის: ქ. თბილისი, ე. მაღალაშვილის ქ. №5

tel: 568 10 54 67; 574 40 08 57

el. fosta: info@saqmatsne.ge

www.saqmatsne.ge

© გამომცემლობა „საქართველოს მაცნე“

© მერაბ ტულუში, თეიმურაზ შენგელია, თემურ შენგელია, ოთარ ღონღაძე

I გამოცემა, 2022 წელი

ISBN 978-9941-16-818-5

სარჩევი

შესავალი.....	5
თავი I. ელექტრული მოვლენები	10
§1 სხეულთა დაელექტროება	11
§2 ელექტრული მუხტი. ელექტრული ურთიერთქმედება	14
§3 ელექტრული მუხტები ატომში. ელემენტარული მუხტი	17
§4 გამტარები და იზოლატორები	22
§5 ელექტრული მუხტის შენახვის კანონი. სხეულთა დაელექტროების ხერხები	26
§6 კულონის კანონი	31
თავი II. ელექტრული ველი.....	35
§7 ელექტრული ველი. ელექტრული ველის დაძაბულობა. წერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობა. ელექტრული ველის სუპერპოზიციის პრინციპი	36
§8 ელექტრული ველის დაძაბულობის ნირები.....	42
§9 თანაბრად დამუხტული სფეროსა და სიბრტყის ელექტროსტატიკური ველი	47
§10 გამტარები ელექტროსტატიკურ ველში	52
§11 დიელექტრიკები ელექტრულ ველში. დიელექტრიკული შეღწევადობა.....	55
თავი III. ელექტრული ველის ენერგია	62
§12 ელექტრული ველის მუშაობა მუხტის გადაადგილებისას. მუხტის პოტენციალური ენერგია ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში.....	63
§13 წერტილოვანი მუხტების ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია	68
§14 პოტენციალი. პოტენციალთა სხვაობა. წერტილოვანი მუხტის ველის პოტენციალი.....	72
§15 ეკვიპოტენციალური ზედაპირები. კავშირი ერთგვაროვანი ელექტრული ველის დაძაბულობასა და პოტენციალთა სხვაობას შორის	76
§16 მუხტის განაწილება ზედაპირის სიმრუდის რადიუსის მიხედვით	81
§17 ელექტროტევადობა.....	85
§18 კონდენსატორი. ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობა	89
§19 კონდენსატორების შეერთება	94
§20 დამუხტული კონდენსატორის ენერგია	97
შემაჯამებელი ამოცანები.....	102
საგნობრივი საძიებელი.....	108
პასუხები	109

პირობითი ნიშნები



– ცდა



– ამოხსენით ამოცანები



– გაიხსენეთ



– ერთად ამოვხსნათ ამოცანა



– დაფიქრდით

შესავალი

ფიზიკა (ძვ. ბერძნულიდან $\varphi\acute{\upsilon}\varsigma\iota\varsigma$ – ბუნება) მეცნიერებაა ბუნების შესახებ. თანამედროვე მეცნიერებათა შორის ფიზიკა ერთ-ერთი გამორჩეულად სიღრმისეული და სრულყოფილი მეცნიერებაა, რომელიც ცოდნისა და ყველაზე სანდო შეხედულებების წყაროს წარმოადგენს ჩვენი გარემომცველი სამყაროს შესახებ.

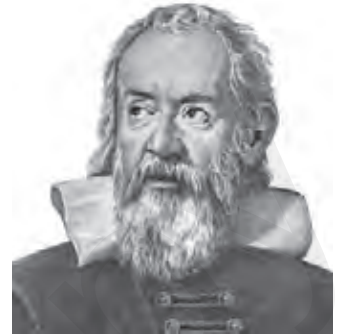
პირველი ფიზიკური სამეცნიერო შეხედულებები, კაცობრიობის ისტორიის ადრეულ ეტაპებზე შეიქმნა და ასახულ იქნა იმ დროის წერილობით წყაროებში. თუმცა მიჩნეულია, რომ ფიზიკა, როგორც მეცნიერება, თავისი თანამედროვე სახით სათავეს იღებს იმ დროიდან, როდესაც გალილეო გალილეიმ ჩამოაყალიბა წრფივი თანაბარი მოძრაობის ფარდობითობის პრინციპი და ჩაატარა ცდები თავისუფალი ვარდნის აჩქარების დასადგენად.

იმ ეპოქიდან მოყოლებული ფიზიკა წარმატებით ვითარდებოდა და XIX საუკუნის მეორე ნახევარში, როდესაც შეიქმნა სინათლის ელექტრომაგნიტური თეორია თითქოს მიაღწია კიდევ თავისი განვითარების უმაღლეს დონეს. კლასიკური ფიზიკის მიმდევრებს ეგონათ, რომ მიღწეული იყო ფიზიკური სამყაროს სურათის სრული გაგება. თუმცა, სულ მალე, XX საუკუნის დასაწყისში ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა და მეცნიერთა ახალმა იდეებმა აჩვენა, რომ კლასიკური ფიზიკის ზოგიერთი კანონი ატომური სამყაროსა და ძალიან დიდი სიჩქარით მოძრავი ობიექტებისათვის მართებული არ იყო. შედეგად, ფიზიკაში მოხდა უზარმაზარი გარდატეხა, რომელმაც ეს მეცნიერება ახალი, თანამედროვე ფიზიკის მიმართულებით განავითარა. ფიზიკის უდიდესი მიღწევების მიუხედავად, მის ყველა მიმართულებაში რჩება მრავალი პრობლემა, რომელთა გადაჭრა კაცობრიობას ცივილიზაციის პრინციპულად ახალ დონეზე აიყვანს.

ფიზიკა შეისწავლის ბუნებრივი მოვლენების უმარტივეს და ამასთან, ზოგად კანონზომიერებებს, მატერიის აგებულებას და თვისებებს, მისი მოძრაობის კანონებს. ჩვენი გარემომცველი სამყარო, ანუ ყველაფერი რაც ჩვენ გარშემოა, მიუხედავად იმისა შევიგრძნობთ თუ არა მას, მატერიას წარმოადგენს. მატერიის განუყოფელი თვისება და მისი არსებობის ფორმა არის **მოძრაობა** – ნებისმიერი ცვლილება, დაწყებული სხეულთა მარტივი გადაადგილებიდან, დამთავრებული აზროვნების ურთულესი პროცესებით.

რთულია ფიზიკის, როგორც საგნის დანიშნულების ცალსახად განსაზღვრა, რადგან ფიზიკასა და მასთან დაკავშირებულ დისციპლინებს შორის საზღვარი პირობითია. მიუხედავად ამისა ის შეიძლება შემდეგნაირად ჩამოვაყალიბოთ: ფიზიკა არის მეცნიერება, რომელიც **სხეულთა მოძრაობისა და ველის ცვლილების** ზოგად კანონებს შეისწავლის. თანამედროვე წარმოდგენებით ყველა ურთიერთქმედება ხორციელდება ველის საშუალებით, რომელიც მატერიის არანივთიერი ფორმაა. ფიზიკური ველების მაგალითებია: გრავიტაციული, ელექტროსტატიკური, მაგნიტური, ელექტრომაგნიტური, ძლიერი ურთიერთქმედების.

შესასწავლ საგანთან ერთად, მეცნიერებისათვის განმსაზღვრელია კვლევის მეთოდები, რომლებსაც ის იყენებს. ფიზიკაში კვლევის ძირითადი მეთოდია **ცდა** – ზუსტად გათვალისწინებულ პირობებში შესასწავლ მოვლენაზე დაკვირვება, ერთნაირ პირობებში მისი მრავალჯერ გამეორება.



გალილეო გალილეი – ცნობილი იტალიელი ფიზიკოსი და ასტრონომი, ექსპერიმენტული ფიზიკის ფუძემდებელი. (1564 – 1642)

მეცნიერებაში ფართოდ გამოიყენება **ინდუქციური** მეთოდი, რაც გულისხმობს **ფაქტების** დაგროვებას და შემდეგ მათ საფუძველზე გარკვეული ვარაუდის – **ჰიპოთეზის** ჩამოყალიბებას. შემეცნების შემდგომ ეტაპზე ამ ვარაუდის შესამოწმებლად ტარდება სპეციალური ექსპერიმენტები და თუ მათი შედეგები ჰიპოთეზას არ უარყოფს, მაშინ ეს უკანასკნელი **თეორიის** სახეს იღებს. მიუხედავად ამისა, შემეცნება მხოლოდ ფაქტების შეგროვებისა და თეორიის გააზრებას არ გულისხმობს, ის შემოქმედებითი პროცესია.

თეორიები, როგორც წესი, არასოდეს იქმნება უშუალოდ დაკვირვებებისგან. პირიქით, თეორიების ჩამოყალიბება ხდება ცდებით მიღებული ფაქტების ასახსნელად, ამ ფაქტების გააზრების შედეგად. მაგალითად, ნივთიერების აგებულების ატომურ თეორიამდე მეცნიერები მივიდნენ არა ატომებზე უშუალო დაკვირვებით (ეს მაშინ შეუძლებელი იყო), არამედ გარკვეული მოვლენების ახსნით, ანუ ნივთიერების ატომური აგებულების შესახებ წარმოდგენა ადამიანის შემოქმედებითი აზროვნების შედეგად შეიქმნა. ანალოგიურად ჩამოყალიბდა ისეთი ფუნდამენტური თეორიები, როგორებიცაა ნიუტონის მსოფლიო მიზიდულობის კანონი, სინათლის ელექტრომაგნიტური თეორია, ფარდობითობის სპეციალური თეორია და ა.შ.



კლაუდიუს პტოლემეოსი
(დაახ. 100 დაახ. 170)

ისტორია მოწმობს, რომ ძველი თეორიები ხშირად ახალი თეორიებით იცვლება. ზოგიერთ შემთხვევაში მეცნიერები ახალ თეორიას იმიტომ ქმნიან, რომ მისი ნაწინასწარმეტყველები შედეგი რაოდენობრივად უკეთესად ეთანადება ექსპერიმენტს. ზოგჯერ კი ისეთ ახალ თეორიას იღებენ, რომელსაც წინა თეორიასთან შედარებით მოვლენათა უფრო ფართო სპექტრის ახსნა შეუძლია. მაგალითად, კოპერნიკის მიერ შექმნილი თეორია, რომლის მიხედვით სამყაროს ცენტრში იყო მზე, უკეთესად არ ხსნიდა ციური სხეულების მოძრაობას, ვიდრე მანამდე არსებული პტოლემეოსის თეორია, რომლის თანახმად დედამიწა სამყაროს ცენტრში მდებარეობდა. მაგრამ კოპერნიკის თეორიით შესაძლებელი გახდა მზის სისტემის პლანეტების განლაგების თანმიმდევრობის დადგენა და დედამიწიდან მათი დაშორების გამოანგარიშება.

ნებისმიერ თეორიაში საკმაოდ მნიშვნელოვანია ის, თუ რამდენად ზუსტი რაოდენობრივი მონაცემების მიღებაა ამ თეორიით შესაძლებელი. მაგალითად, ყოველდღიური ცხოვრების აღწერისას აინშტაინის სპეციალური ფარდობითობის თეორიით მიღებული შედეგები მცირედით განსხვავდება გალილეისა და ნიუტონის თეორიით მიღებული შედეგებისგან. მაგრამ დიდი, სინათლის სიჩქარესთან მიახლოებული სიჩქარეებისათვის ფარდობითობის თეორიით მიიღება ბევრად ზუსტი შედეგები.



ნიკოლას კოპერნიკი
(1473 – 1543)

ზოგიერთი მოვლენის გაგებისა და ახსნისათვის მეცნიერები ხშირად იყენებენ **მოდელს**, რომელშიც იგულისხმება მოვლენის გარკვეული აზრობრივი წარმოსახვა. მოდელი ეყრდნობა უკვე ცნობილ ცნებებს და სასარგებლო ანალოგიის აგების საშუალებას იძლევა. მაგალითისათვის გამოდგება სინათლის ტალღური მოდელი. სინათლის ტალღებს ჩვენ ისე ვერ ვაკვირდებით, როგორც ტალღებს წყალზე, მაგრამ სინათლეზე ჩატარებული მრავალი ცდა ამ ტალღებს შორის დიდ მსგავსებას გვიჩვენებს. ასევე კარგი მაგალითია

ატომის მოდელი, რომელიც ატომის შესახებ წარმოდგენების განვითარებასთან ერთად მრავალჯერ შეიცვალა.

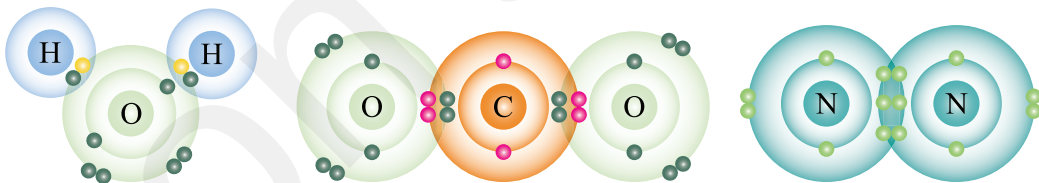
მოდელური წარმოდგენა ყოველთვის ეყრდნობა რომელიმე კანონს. კანონს უწოდებენ მოკლე, მაგრამ საკმაოდ ზოგად დებულებას, რომელიც ეთანადება ბუნებრივ მოვლენას (მაგ., დებულება იმპულსის მუდმივობის შესახებ). ზოგჯერ ეს დებულებები იღებს მოვლენის აღმწერ სიდიდეებს შორის გარკვეული თანაფარდობის ფორმას. იმისათვის, რომ დებულება კანონად ჩამოყალიბდეს, მან ფართო ექსპერიმენტულ შემოწმებას უნდა გაუძლოს.

გარდა ინდუქციური მეთოდისა, მეცნიერები იყენებენ მის საწინააღმდეგო, დედუქციურ მეთოდს, როდესაც ზოგადი კანონზომიერებიდან გამოიყოფა კერძო შემთხვევები. ამის მაგალითია 1848 წელს მსოფლიო მიზიდულობის კანონის საფუძველზე ლავურიეს მიერ პლანეტა ნეპტუნის აღმოჩენა.

„მეცნიერებებიდან ფიზიკა ყველაზე ფუნდამენტური და ყოვლისმომცველია. თანამედროვე ფიზიკა ტოლფასია უძველესი ნატურალური ფილოსოფიისა, რომლიდანაც წარმოიქმნა მეცნიერებების უმეტესობა. ტყუილად არ ავალდებულებენ სხვადასხვა სპეციალობის სტუდენტებს ისწავლონ ფიზიკა – უამრავ მოვლენაში ის ძირითად როლს ასრულებს“, – ამბობდა ცნობილი ფიზიკოს-თეორეტიკოსი, ნობელის პრემიის ლაურეატი რიჩარდ ფეინმანი.

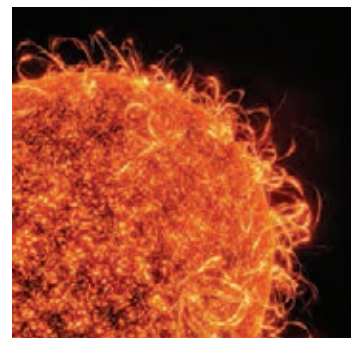
ფიზიკის დარგებია: მექანიკა, თერმოდინამიკა, ელექტრომაგნიტიზმი, ოპტიკა, ატომური და ბირთვული ფიზიკა, ნახევარგამტარების ფიზიკა, ასტროფიზიკა და სხვა. თანამედროვე ფიზიკის დარგებს შეემატა, მაგალითად, ჯანმრთელობის ფიზიკა, კოსმოლოგია, მაღალტემპერატურული ზეგამტარების ფიზიკა.

ქიმია ნივთიერებათა გარდაქმნის შემსწავლელი მეცნიერებაა. ქიმიური პროცესებისას იცვლება ნივთიერებათა შედგენილობა ან აგებულება. არაორგანულ ქიმიასთან ფიზიკის კავშირი ბევრად დიდია, ვიდრე ნებისმიერ სხვა მეცნიერებასთან. ყველა ქიმიური პროცესი წარმოადგენს სავალენტო ელექტრონებით კავშირების შექმნას ან განწყვეტას (სურ.1). ამიტომ ბუნებრივია, რომ შეიქმნა ქიმიური ფიზიკის მიმართულება.



სურ. 1

ასტრონომია ფიზიკაზე ადრე შეიქმნა, მაგრამ როგორც მეცნიერება, ასტრონომია ჩამოყალიბდა მაშინ, როცა ფიზიკოსებმა შეძლეს იმის ახსნა, თუ რატომ მოძრაობენ ვარსკვლავები და პლანეტები ზუსტად ასე და არა სხვანაირად. ასტრონომიაში ყველაზე მნიშვნელოვანი ფიზიკური აღმოჩენა იყო ის, რომ ვარსკვლავები შედგება ისეთივე ატომებისაგან, რომლებიც დედამიწაზე გვხვდება. ამას ვარსკვლავების გამოსხივების სპექტრული ანალიზი ადასტურებს. საიდან იღებენ ვარსკვლავები (სურ. 2) უზარმაზარ ენერგიას? ამ კითხვას ზუსტი პასუხი გაეცა მხოლოდ 1940 წელს, როდესაც ფიზიკოსებმა აღმოაჩინეს დაშლისა



სურ. 2



სურ. 3

და თერმობირთვული სინთეზის რეაქციები. ასტრონომიისა და ფიზიკის ასეთი ურთიერთკავშირის საფუძველზე შეიქმნა მეცნიერების ახალი დარგი – ასტროფიზიკა.

კოსმოსის კვლევაში უდიდესი ნაბიჯი გადაიდგა 2021 წელს, როდესაც გაშვებულ იქნა თანამედროვე კოსმოსური ტელესკოპი „ჯეიმს ვები“. მის შესახებ, ბმულზე:

https://www.facebook.com/watch/live/?ref=watch_permalink&v=447803340156348 გვიყვება ქართველი მეცნიერი, ევროპის კოსმოსური სააგენტოს ინჟინერი, სოფიო პატარაია.

თქვენ იცით, რომ ბიოლოგია მეცნიერებაა ცოცხალ ბუნებაზე, გადაშენებულ და არსებულ ცოცხალ არსებათა მრავალფეროვან სახეობებზე, მათ აგებულებაზე, ფუნქციებზე, წარმოშობაზე, გავრცელებაზე, განვითარებაზე, ერთმანეთთან და არაცოცხალ ბუნებასთან კავშირებზე. ყველა ბიოლოგიური პროცესის მექანიზმი შესაძლებელია გავიგოთ მხოლოდ მოლეკულურ და შიდაუჯრედულ დონეზე. აქ კი ბიოლოგები გვერდს ვერ აუვლიან ფიზიკას და ფიზიკური ხელსაწყოების გამოყენებას. საკმარისია იმ ფაქტის გახსენებაც, რომ დნმ-ის მოლეკულის სტრუქტურა აღმოჩენილ იქნა ელექტრონული მიკროსკოპის გამოყენებით (სურ. 3). რაც შეეხება ნერვული სისტემის აქტივობის ურთულეს პროცესებს, ისინი თავისი არსით ელექტრომაგნიტური ბუნებისაა. სწორედ ცოცხალ ორგანიზმებში მიმდინარე ფიზიკური მოვლენების შესასწავლად შეიქმნა ბიოფიზიკის სპეციალობა.



სურ.4

არსებობს ისეთი პრაქტიკული დარგები, რომლებიც ფიზიკის სხვადასხვა ნაწილის კერძო განშტოებას წარმოადგენს. ასეთია, მაგალითად, ელექტროტექნიკა, რომელიც ერსტედის, ამპერის, ფარადეის, მაქსველის ფიზიკური კვლევებიდან იღებს სათავეს; ელექტრონიკა კი ფიზიკის რამდენიმე ნაწილის – ელექტრომაგნიტიზმის, მყარი სხეულების ფიზიკის, ვაკუუმისა და აირების ფიზიკის და სხვათა გაერთიანებაა; ჰოლოგრაფია ელექტრომაგნიტური ტალღების ინტერფერენციისა და დიფრაქციის ტექნიკური გამოყენებაა. თანამედროვე ადამიანის ყოველდღიური ყოფის განუყოფელი ნაწილია ელექტრონული კომუნიკაცია, რომელიც მთლიანად ფიზიკურ პროცესებზეა დაფუძნებული.

მჭიდროდ უკავშირდება ერთმანეთს ფიზიკა და მედიცინა. წარმოუდგენელია ადამიანის ჩონჩხისა და კუნთების მექანიკის შესწავლა მისი დრეკადობისა და წონასწორობის შესწავლის გარეშე; თვალისა და მხედველობისა – ოპტიკისა და ელექტრობის გარეშე; სმენისა – აკუსტიკისა და ელექტრული იმპულსების გარეშე; გულის და სისხლძარღვებისა – ჰიდროდინამიკის გარეშე; ტვინისა და ნერვული სისტემისა – ელექტრობის გარეშე; სასუნთქი სისტემისა და ნივთიერებათა ცვლისა – დიფუზიის გარეშე და ა. შ. ამ საკითხებს სამედიცინო ფიზიკა შეისწავლის.

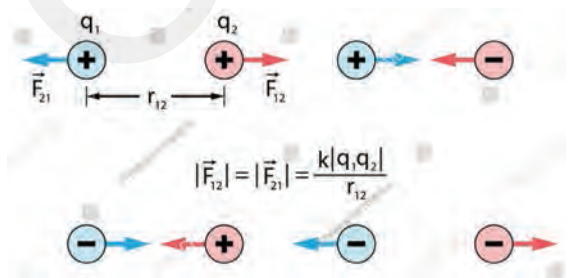
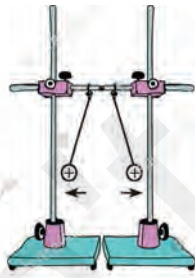
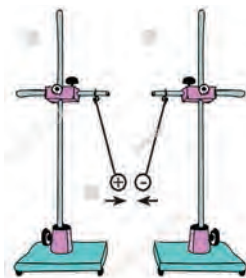
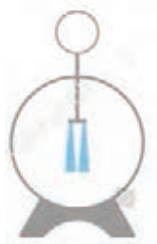
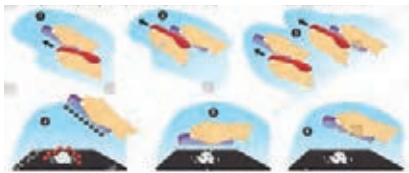
დაავადებათა დიაგნოსტიკისა და მკურნალობისათვის ექიმები იყენებენ ფიზიკის მიღწევებზე დაყრდნობით შექმნილ ხელსაწყოებს: ტონომეტრს, ულტრაბგერით აპარატს, რენტგენის აპარატს, ტომოგრაფს (სურ. 4) და ა.შ. ოფთალმოლოგიაში წარმატებით იყენებენ ლაზერულ თერაპიას, ონკოლოგიური დაავადებების მკურნალობისას კი – რადიაციულ და ანდრონულ თერაპიას.

ასევე დიდია კავშირი გეოლოგიასა და ფიზიკას შორის. ვერცერთ გეოლოგიურ პროცესს ვერ ავხსნით ფიზიკის კანონების გამოუყენებლად. ისეთი გლობალური გეოლოგიური პრობლემები, როგორებიცაა: დედამიწისა და სხვა პლანეტების წარმოშობა; სხვადასხვა გეოსფეროების აგებულება და შედგენილობა; დედამიწის ასაკი და მისი განვითარების ეტაპების დათარიღება; სამთო ქანების დაშლის თეორიის დამუშავება; გეოდინამიკური პროცესების (მიწისძვრა, აირების უცაბედი ამოფრქვევა, სამთო დარტყმები და სხვ.) პროგნოზირება; დედამიწის თერმული ისტორია და სხვა ფიზიკასთან მჭიდრო კავშირშია. ამიტომ შეიქმნა მეცნიერებები: გეოფიზიკა, დედამიწის ქერქის ფიზიკა, ატმოსფეროს ფიზიკა, პეტროფიზიკა, ოკეანეების ფიზიკა და ა.შ.

ფიზიკის მიღწევები შედეგია სხვადასხვა ქვეყნის ფიზიკოს-მეცნიერთა შემოქმედებითი შრომისა. ფიზიკის განვითარებაში უდიდესი წვლილი მიუძღვით ისააკ ნიუტონს, ალბერტ აინშტაინს, მარია სკლოდოვსკა-კიურის (ერთადერთი მეცნიერი, რომელსაც ნობელის პრემია მიენიჭა მეცნიერების ორ სხვადასხვა დარგში), ნილს ბორს, ირენ ჟოლიო-კიურის, ენრიკო ფერმის, ლიზა მაიტნერს, ერნსტ რეზერფორდს და მრავალ სხვას. აღსანიშნავია, რომ ფიზიკისადმი ინტერესი მატულობს ჩვენი ქვეყნის გოგონათა და ვაჟთა შორისაც. ამის დასტურია საერთაშორისო კონფერენციებსა და ოლიმპიადებზე მათი წარმატებები, რომელიც მრავალი მედლითაა აღნიშნული.

თავი I

ელექტრული მოვლენები



ამ თავში თქვენ გაეცნობით:

- ელექტრულ მუხტს;
- სხეულთა დამუხტვის ხერხებს;
- გამტარებსა და იზოლატორებს;
- ელექტრული მუხტის შენახვის კანონს;
- დამუხტული სხეულების ურთიერთქმედებას.

§1 სხეულთა დაელექტროება

ალბათ ყველას შეგიძინებიათ, როგორ „გახტება“ ხოლმე ნაპერწკალი ტანსაცმლის გახდისას. გინახავთ გაელვება, რომელსაც თან ჭექა-ქუხილი ახლავს. ზოგჯერ სხვა საგანთან შეხების დროსაც უსიამოვნო, მტკივნეული შეგრძნება გეუფლებათ. რა მოვლენებია ეს? როგორ შეიძლება მათი ახსნა?

წინა წლებში შესწავლილი ფიზიკური მოვლენების უმრავლესობა განპირობებული იყო სხეულების ან მათი შემადგენელი ნაწილაკების ურთიერთქმედებით.

გავიხსენოთ სხეულთა გრავიტაციული ურთიერთქმედება.

 ნებისმიერი ორი სხეული ურთიერთმიზიდება ძალით, რომელიც პირდაპირპროპორციულია მათი მასების ნამრავლისა და უკუპროპორციულია მათ შორის მანძილის კვადრატისა:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2},$$

რომელშიც $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ ნ} \cdot \text{მ}^2 / \text{კგ}^2$.

გრავიტაციული ურთიერთმიზიდულობის ძალის გავლენით ბრუნავს დედამიწა მზის გარშემო (სურ. 5), ვარდებიან სხეულები დედამიწის ზედაპირზე და სხვა, მაგრამ ეს ძალა საგრძნობია მაშინ, როდესაც ორი სხეულიდან ერთის მასა მაინც საკმაოდ დიდია.

გრავიტაციული ურთიერთმიზიდვა არსებობს ნებისმიერი ნივთიერების მოლეკულებს შორისაც, მაგრამ მათი მასის სიმცირის გამო ურთიერთმიზიდვის ძალა უმნიშვნელოა. მაშ, რა ძალა განაპირობებს ნაწილაკებს შორის მტკიცე კავშირს ნივთიერების თხევად და მყარ აგრეგატულ მდგომარეობებში?

რატომ ჩნდება სხეულის დეფორმაციისას დრეკადობის ძალა? როდესაც სხეული იჭიმება მის ნაწილაკებს შორის მანძილი იზრდება, მაგრამ ამ დროს მოლეკულები ურთიერთმიზიდება. სხეულის შეკუმშვისას მოლეკულებს შორის მანძილი მცირდება, მაგრამ მოლეკულები ურთიერთგანიზიდება. ეს შეუძლებელია აიხსნას მოლეკულებს შორის გრავიტაციული ურთიერთქმედებით. ე.ი. ამ

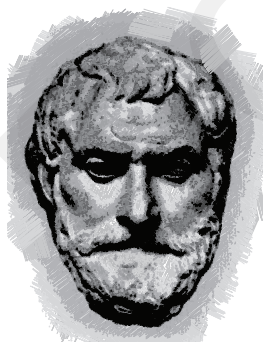
შემთხვევაში საქმე გვაქვს გრავიტაციულისაგან განსხვავებული ტიპის ურთიერთქმედებასთან. რა ურთიერთქმედებაა ეს?

ამ კითხვებს პასუხს შემდეგ პარაგრაფებში გავცემთ.

ჯერ კიდევ ჩვენს წელთაღრიცხვამდე 600 წლით ადრე, ძველი ბერძენი ფილოსოფოსის, თალეს მილითელისთვის ცნობილი იყო, რომ შალის ნაჭერზე გახახუნების შემდეგ ქარვა (სურ. 6) იძენდა მსუბუქი სხეულების მიზიდვის უნარს, მაგრამ ეს მოვლენა ორი ათას წელიწადზე მეტ ხანს იყო აუხსნელი და მას პრაქტიკული გამოყენება არ



სურ. 5



თალეს მილითელი – ძველი ბერძენი ფილოსოფოსი და მათემატიკოსი, სამეცნიერო-ფილოსოფიური სკოლის – მილეტის სკოლის დამაარსებელი



სურ. 6 ქარვა – პალეოგენური პერიოდის წინვოვან მცენარეთა განამარხებული ფისი



უილიამ ჰილბერტი
(1544 – 1603)

მოჰყოლია. ქარვას მხოლოდ სამკაულების დასამზადებლად იყენებდნენ.

1600 წელს ინგლისის სამეფო კარის ექიმმა უილიამ ჰილბერტმა გამოაქვეყნა სამეცნიერო ნაშრომი, რომელშიც დაასაბუთა, რომ ქარვის გარდა, ქსოვილზე გახახუნების შემდეგ, პატარა სხეულების მიზიდვის უნარს იძენს ალმასი, გოგირდი, საფირონი, მინა და სხვა. ჰილბერტმა პირველმა შემოიტანა ტერმინი „ელექტრული“ (ძველ ბერძნულ ენაზე ქარვას „ელექტრონ“ (ηλεκτρον) ჰქვია) და ამ ნივთიერებებს ელექტრული თვისებების მქონენი უწოდა.

დაახლოებით 70 წლის შემდეგ ქალაქ მაგდებურგის (გერმანია) ბურგომისტრმა ოტტო ფონ გერიკემ ჩაატარა ცდები, რომლითაც ელექტრული მიზიდვის გარდა აღმოაჩინა ელექტრული განზიდვა.



ჩავატაროთ რამდენიმე მარტივი ცდა:

ავილოთ ორი ბუშტი, გავბეროთ და გამოვაბათ მათ დაახლოებით 1 მ სიგრძის ძაფი. თუ ერთ-ერთ ბუშტს ძაფით ჩვენი სხეულის სიახლოვეს დავკიდებთ, ბუშტსა და სხეულს შორის მიზიდვას ვერ შევამჩნევთ (სურ. 7 ა). ასევე ვერ შევამჩნევთ მიზიდვას ბუშტებს შორის, როცა მათ ერთმანეთის გვერდით დავკიდებთ (სურ. 7 ბ) – ძაფები ორივე შემთხვევაში შვეულად განლაგდება.

ერთი ბუშტი თქვენ ტანსაცმელზე რამდენჯერმე გაახახუნეთ და სხეულის სიახლოვეს დავკიდეთ. ბუშტი მიიზიდება სხეულისაკენ (სურ. 8 ა). თუ მეორე ბუშტსაც გაახახუნებთ და ბუშტებს ერთმანეთის გვერდზე დავკიდებთ, ისინი ერთმანეთისაგან განიზიდება (სურ. 8 ბ).

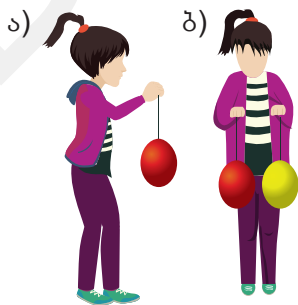
ალბათ, მსგავსი მოვლენა ხშირად შეგინიშნავთ ტანსაცმლის გახდისას. ამ მოვლენას სხეულის დაელექტროება ჰქვია, ხოლო სხეულებს – დაელექტროებული.

გაახახუნეთ ბუშტები ერთმანეთზე და ერთმანეთის სიახლოვეს დავკიდეთ. დაინახავთ, რომ ძაფები შვეულად განლაგდება, ე.ი ბუშტები არ ურთიერთქმედებს. ეს ნიშნავს, რომ ისინი არ დაელექტროებულია.

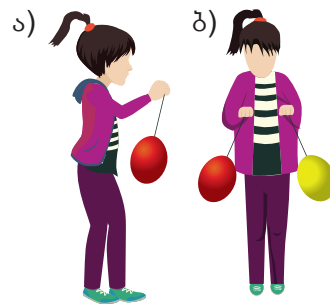
ამრიგად, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ სხეულების დაელექტროება ხდება სხვადასხვა ნივთიერებისაგან შედგენილი სხეულების ერთმანეთზე ხახუნისას. ერთნაირი ნივთიერებისაგან შედგენილი სხეულების ხახუნისას ისინი არ ელექტროვდებიან.



ოტტო ფონ გერიკე
(1602 – 1686)



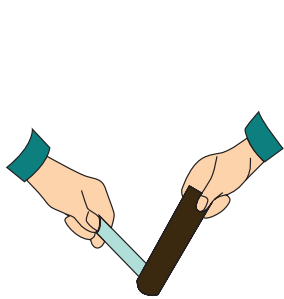
სურ. 7



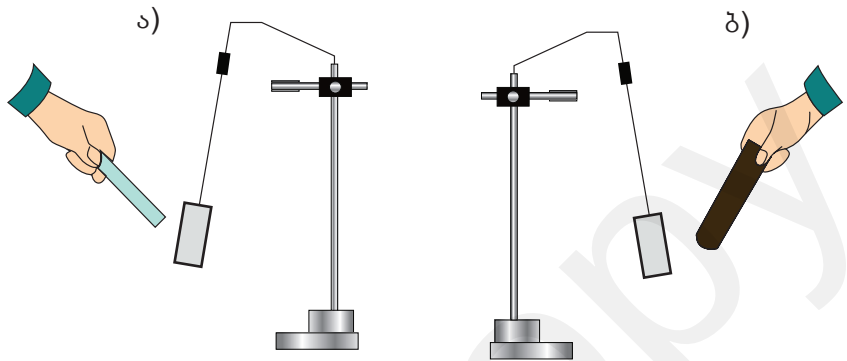
სურ. 8

აღსანიშნავია, რომ სხეულებს შორის ხახუნი მნიშვნელოვანია იმდენად, რამდენადაც ის ზრდის მათი ურთიერთშეხების ზედაპირის ფართობს.

ორი სხეულის ერთმანეთზე ხახუნის შედეგად, თუ ერთი დაელექტროვდა, აუცილებლად დაელექტროვდება მეორეც. დავასაბუთოთ ეს შემდეგი ცდით: გავახახუნოთ ერთმანეთზე მშრალი მინის ღერო და რეზინის მილის ნაჭერი (სურ. 9). ღეროც და მილიც შტატივზე ჩამოკიდებულ მსუბუქ მასრას მიიზიდავს (სურ. 10 ა) და ბ)).

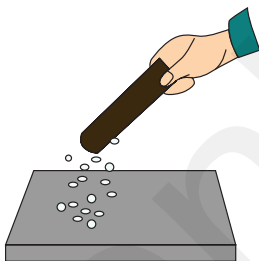


სურ. 9



სურ.10

ხახუნით სხეულთა დაელექტროების სხვა მაგალითებია: მშრალ ქაღალდზე ხახუნის შედეგად პლასტმასის სხეული იკრავს ქაღალდის პატარა ნაკუნებს (სურ. 11), დაელექტროებული ებონიტის ჯოხი გადახრის წყლის ნაკადს (სურ. 12) და სხვა.



სურ. 11



სურ. 12

დაკვნები:

- სხეულების დაელექტროება ხდება სხვადასხვა ნივთიერებისაგან შედგენილი სხეულების ერთმანეთზე ხახუნისას;
- ერთნაირი ნივთიერებისაგან შედგენილი სხეულების ხახუნისას ისინი არ ელექტროვდება;
- დაელექტროებული სხეულების ურთიერთქმედება განსხვავდება გრავიტაციული ურთიერთქმედებისაგან.

საკითხის უკეთ გასააზრებლად შეგიძლიათ იხილოთ ბმული <https://is.gd/jXHSzD>

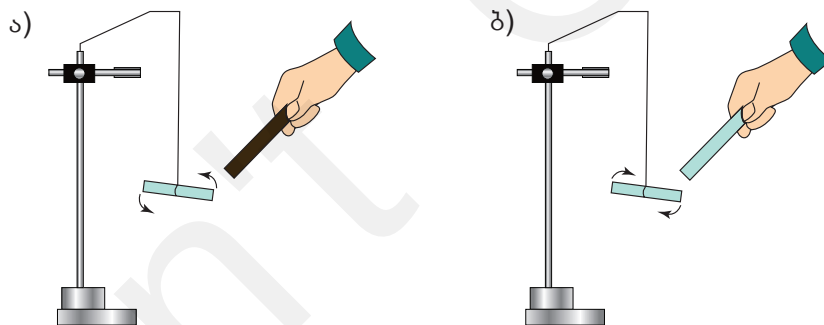
§2 ელექტრული მუხტი. ელექტრული ურთიერთქმედება



შარლ ფრანსუა დიუფე
1698-1739



მსგავსი ცდა ჩვენც შეგვიძლია ჩავატაროთ. აბრეშუმის ძაფით შტატივზე ჩამოვკდოთ დაელექტროებული მინის ღერო. მივუახლოოთ მას დაელექტროებული რეზინის მილი. ისინი ერთმანეთს მიიზიდავს (სურ. 13 ა)). მაგრამ თუ მინის ღეროს მივუახლოებთ რეზინის მილზე გახახუნებულ მეორე მინის ღეროს, ისინი ერთმანეთს განიზიდავს (სურ. 13 ბ)). ე.ი. ნივთიერებათა სხვადასხვა ჯგუფში (დიუფეს კლასიფიკაციით) შემავალი სხეულები ერთმანეთს იზიდავს, ერთ ჯგუფში შემავალი სხეულები კი – განიზიდავს.



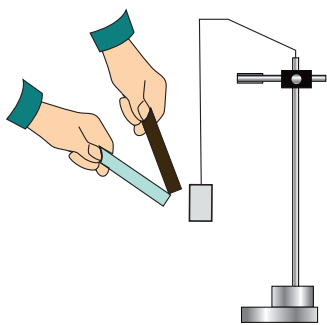
სურ. 13

როგორც უკვე იცით, სხეულთა გრავიტაციული ურთიერთქმედების სიძლიერეს მათი მასა განსაზღვრავს – რაც უფრო დიდია სხეულთა მასა, მით უფრო ძლიერია მათ შორის მიზიდვის ძალა. რა ფიზიკური სიდიდით შეიძლება განვსაზღვროთ ელექტრული ურთიერთქმედების სიძლიერე?

ყველა დაელექტროებულ სხეულს გააჩნია გარკვეული მუხტი, რომლის მნიშვნელობა შეიძლება განსხვავდებოდეს – რაც უფრო დიდია სხეულთა მუხტი, მით უფრო მეტია მათ შორის ურთიერთქმედების ძალა. ამ ურთიერთქმედების რაოდენობრივი შეფასებისთვის შემოტანილ იქნა სკალარული ფიზიკური სიდიდე, რომელსაც ელექტრული მუხტი ეწოდება. ელექტრულ მუხტს q ასოთი აღნიშნავენ.

SI-ში ელექტრული მუხტის ერთეულად მიღებულია 1 კულონი (1 კ), ფრანგი ფიზიკოსის – შარლ კულონის (1736 – 1806) პატივსაცემად, რომელმაც დამუხტული სხეულების ურთიერთქმედების კანონი აღმოაჩინა. 1 კულონი მუხტის ფიზიკურ აზრს მოგვიანებით, ელექტრული დენის შესწავლისას განვმარტავთ.

სხეული (ნაწილაკი) შეიძლება არსებობდეს მუხტის გარეშე, მაგრამ ელექტრული მუხტი არ არსებობს სხეულის (ნაწილაკის) გარეშე. ნებისმიერ სხეულთა (ნაწილაკთა) სისტემის მუხტი მასში შემავალ სხეულთა (ნაწილაკთა) მუხტების ჯამის ტოლია.



სურ. 14

დიუფეს მიხედვით არსებობს ორი სახის ელექტრული მუხტი. ამასთან, ერთსახელიანი მუხტები ერთმანეთს განიზიდვს, სხვადასხვასახელიანი კი – მიიზიდვს.

რას ნიშნავს ერთსახელიანი და სხვადასხვასახელიანი მუხტები?

გავაგრძელოთ პირველ პარაგრაფში დაწყებული ცდა. ერთმანეთზე გახახუნებული მინის ღერო და რეზინის მილიერთმანეთს მივადოთ და მივიტანოთ შტატივზე დაკიდებულ მსუბუქ მასრასთან (სურ. 14). ქმედება არ შეიმჩნევა. შეხებამდე მუხტი ჰქონდა ორივე სხეულს, თუმცა შეხებისას მათ ერთმანეთი გაანეიტრალეს. სწორედ ამიტომ გა-

მოჩენილმა ამერიკელმა საზოგადო მოღვაწემ და მეცნიერმა ბენჯამენ ფრანკლინმა შემოიტანა დადებითი „+“ და უარყოფითი „-“ მუხტების ცნება. მუხტს, რომელსაც შეიძენს მინა აბრეშუმზე ხახუნისას, პირობითად მიანიჭეს დადებითი ნიშანი, ხოლო მუხტს, რომელსაც შეიძენს ქარვა შალზე ხახუნისას – უარყოფითი ნიშანი. ფრანკლინი ამტკიცებდა: „როდესაც რაიმე პროცესის შედეგად ერთ სხეულზე ჩნდება გარკვე-



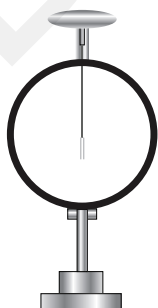
ბენჯამენ ფრანკლინი
(1706 – 1790)

ული მუხტი, იმავდროულად მეორე სხეულზეც ჩნდება იმავე სიდიდის საწინააღმდეგო ნიშნის მუხტი“. მინის ღეროსა და რეზინის მილის ერთმანეთზე ხახუნისას მათ შეიძინეს მოდულით ტოლი და ნიშნით საპირისპირო მუხტი. შეხების შემდეგ კი მუხტებმა ერთმანეთი გაანეიტრალა.

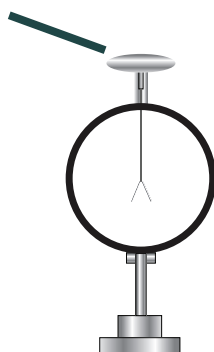
ამრიგად, აღწერილი ელექტრული ურთიერთქმედება არის ერთნაირნიშნის დამუხტული სხეულების განზიდვა და სხვადასხვანიშნის დამუხტული სხეულების მიზიდვა.

ერთნაირი ნიშნით დამუხტული სხეულების განზიდვა საფუძვლად უდევს ხელსაწყოს – ელექტროსკოპის მუშაობას. ის შედგება ლითონის ღეროსაგან, რომელიც ჩამაგრებულია ელექტროსკოპის კორპუსში და იზოლირებულია მისგან რეზინით ან პლასტმასით. ღეროს ბოლოზე ერთმა-

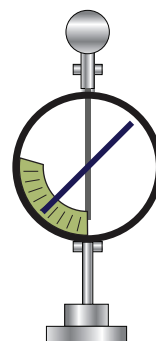
ნეთთან ახლოს ლითონის ორი ზოლოვანი ფურცელია დაკიდებული. ღეროს გარეთა ბოლოზე კი მიმაგრებულია ლითონის დისკო ან ბურთულა. როცა ელექტროსკოპის ღერო დაუმუხტავია, ფურცლები ვერტიკალურადაა ჩამოშვებული (სურ. 15 ა). დისკოსთან დამუხტული სხეულის მიახლოებისას ან მასზე მიდებისას ფურცლები ერთი ნიშნის მუხტს მიიღებს, ამიტომ ერთმანეთისაგან განიზიდება და გაიშლება (სურ. 15 ბ). რაც უფრო დიდი იქნება სხეულის მუხტი, მით მეტი კუთხით გაიშლება ფურცლები.



სურ. 15 ა



სურ. 15 ბ



სურ. 16

უფრო სრულყოფილი ხელსაწყოა ელექტრომეტრი. მასში ერთმანეთს განიზიდავს ლითონის ღერო და ისარი, რომელსაც ღეროს მიმართ შეუძლია შემობრუნება (სურ. 16). ისრის ბოლო მოძრაობს სკალის გასწვრივ და იძლევა მუხტის გაზომვის საშუალებას.

ელექტროსკოპისა და ელექტრომეტრის შესახებ მომდევნო პარაგრაფებში ვისაუბრებთ.

დაკვნები:

- ელექტრული მუხტი არის სკალარული ფიზიკური სიდიდე, რომელიც განსაზღვრავს დამუხტული სხეულების ურთიერთქმედების სიძლიერეს;
- SI-ში ელექტრული მუხტის ერთეულია 1 კულონი;
- არსებობს ორი ნიშნის ელექტრული მუხტი: დადებითი და უარყოფითი;
- მუხტი, რომელსაც იძენს მინა აბრეშუმზე ხახუნისას, პირობითად დადებითადაა მიჩნეული;
- მუხტი, რომელსაც იძენს ქარვა შალზე ხახუნისას, პირობითად უარყოფითადაა მიჩნეული;
- როდესაც ხახუნის შედეგად ერთ სხეულზე ჩნდება გარკვეული მუხტი, იმავედროულად მეორე სხეულზეც ჩნდება იმავე სიდიდის საწინააღმდეგო ნიშნის მუხტი;
- სხეულებს შორის ელექტრული ურთიერთქმედება არის ერთნაირნიშნისა და მუხტის სხეულების განზიდვა და სხვადასხვანიშნისა დამუხტული სხეულების მიზიდვა.

საკონტროლო კითხვები:

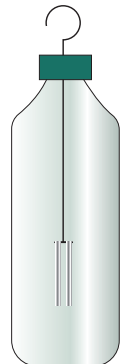
1. რის მიხედვით დაყო დიუფემ ნივთიერებები ორ ჯგუფად?
2. დიუფეს ერთი ჯგუფის ნივთიერებების ერთმანეთთან ხახუნით შესაძლებელია თუ არა მათი დამუხტვა?
3. არსებობს თუ არა ელექტრული მუხტი სხეულის გარეშე? სხეული მუხტის გარეშე?
4. როგორ შეძლებთ დაასაბუთოთ, რომ ელექტრულ მუხტს ორი ნიშანი აქვს?
5. რა ფაქტი უდევს საფუძვლად ელექტროსკოპის მუშაობის პრინციპს?

დავალეზა: დავამზადოთ ელექტროსკოპი.

დავალეზის შესასრულებლად საჭიროა: პლასტმასის ცარიელი ბოთლი (სურ. 17), 20-25 სმ სიგრძისა და დაახლოებით 3-4 მმ სისქის ლითონის მავთული, ალუმინის ფოლგა, ნებოვანა.

დავალეზის შესრულება: გახვრიტეთ პლასტმასის ბოთლის თავსახური და გაატარეთ მასში მავთული. მავთულის გარეთა ბოლოზე გააკეთეთ მცირე ზომის კაუჭი. მავთულის მეორე ბოლო გადალუნეთ 90 გრადუსიანი კუთხით. ფოლგისგან გამოჭერით 2-3 მმ სიგანისა და 5 სმ სიგრძის ორი ზოლი და ნებოვანას საშუალებით მავთულის ბოლოზე მიამაგრეთ. მავთული, მასზე დამაგრებული ფურცლებით, ჩაუშვით ბოთლში და თავსახური მოუჭირეთ.

დამუხტეთ პლასტმასის ჯოხი ქაღალდზე რამდენჯერმე გასმით და შეახეთ მავთულის გარე ბოლოს. დააკვირდით ფოლგის ფურცლებს და შემჩნეული მოვლენა ჩაინიშნეთ რვეულში.



სურ. 17

§ 3 ელექტრული მუხტები ატომში. ელემენტარული მუხტი

გემახსოვრებათ, რომ სითბური მოვლენის შესწავლას თქვენ იწყებდით მასზე დაკვირვებით, მიღებულ შედეგს კი ხსნიდით ნივთიერების აგებულების შესახებ ცოდნის გამოყენებით. ანალოგიურად შეიძლება მოვიქცეთ ელექტრული მოვლენების შესწავლისას, მაგრამ ამ მოვლენათა ასახსნელად მხოლოდ იმის ცოდნა, რომ ნივთიერება შედგება ატომებისა და მოლეკულებისგან, საკმარისი არ არის. საჭიროა უფრო მეტი ვიცოდეთ ატომების შესახებ.

როგორ და რატომ იმუხტება სხეული? როგორ გადაეცემა ელექტრული მუხტი ერთი სხეულიდან მეორეს? ამ კითხვებზე სრულყოფილი პასუხის გაცემა მხოლოდ წინა საუკუნეში მოხერხდა, როდესაც ნათელი გახდა, რომ ელექტრული მუხტის არსებობის საიდუმლო თვით ატომშია დამალული. ამის გააზრებას წინ მეცნიერთა ხანგრძლივი და რთული კვლევები უძღოდა. ჩვენ კი მოკლედ გავეცნოთ იმ აღმოჩენებს, რომლებმაც საფუძველი ჩაუყარა ატომის აგებულების შესახებ თანამედროვე წარმოდგენას.

 დაახლოებით 2500 წლის წინ ძველმა ბერძენმა ფილოსოფოსმა დემოკრიტემ (460-370 წწ. ძვ. წ.) პირველმა გამოთქვა აზრი იმის შესახებ, რომ მატერია, რომელიც მთლიანი და უწყვეტი გვეჩვენება, სინამდვილეში დიდი რაოდენობის უმცირესი, თვალისთვის უხილავი ნაწილაკებისგან შედგება. ამ ნაწილაკებს ატომები უწოდეს. სიტყვა **ატომი** (ძვ. ბერძ. *ἄτομος*) განუყოფელს ნიშნავს.



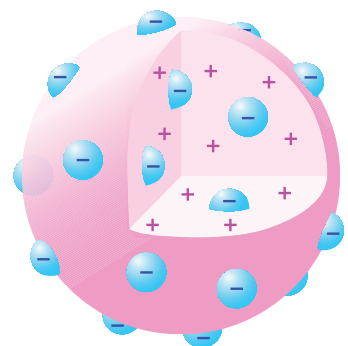
ჯოზეფ ჯონ ტომსონი
(1856 – 1940)

ატომი განუყოფლად ძალიან დიდხანს მიაჩნდათ, ვიდრე 1897 წელს ინგლისელმა ფიზიკოსმა ჯოზეფ ჯონ **ტომსონმა** საწინააღმდეგო არ დაამტკიცა. ტომსონი, გარკვეულ პირობებში, ლითონებიდან მიღებულ გამოსხივებას ატარებდა საპირისპირო ნიშნით დამუხტულ ორ პარალელურ ფირფიტას შორის. მან შეამჩნია, რომ გამოსხივება გადაიხრებოდა დადებითად დამუხტული ფირფიტისაკენ. აქედან ტომსონმა დაასკვნა, რომ სხივები უნდა წარმოადგენდეს უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკების ნაკადს. ტომსონმა დაადგინა, რომ ნაკადის თითოეული ნაწილაკი წყალბადის ატომზე 2000-ჯერ მსუბუქია და მას ყველა ნივთიერების ატომი შეიცავს. ამ ნაწილაკს **ელექტრონი** უწოდეს. ელექტრონის აღმოაჩენამ დაამტკიცა, რომ ატომი

განუყოფელი არ არის. ამ ნაშრომისთვის 1906 წელს ტომსონს ნობელის პრემია მიენიჭა.

1904 წელს, თავისივე აღმოჩენაზე დაყრდნობით, ტომსონმა შექმნა ატომის მოდელი, რომელსაც „ატომის პუდინგის მოდელი“ დაარქვეს. ეს მოდელი ატომს წარმოგვიდგენდა სფეროდ, რომელშიც დადებითი მუხტი განაწილებული იყო თანაბრად, ხოლო ელექტრონები მასში იყვნენ მიმოფანტულნი (როგორც პუდინგში მიმოფანტული ქიშმიში) (სურ. 18). ატომის დადებითი და უარყოფითი მუხტი მოდულით ერთმანეთის ტოლია, ამიტომ მთლიანობაში ატომი ელექტრულად ნეიტრალურია.

ტომსონის ატომის მოდელი საკმაოდ მოკლე დროში უარყო მისმა მოსწავლემ – ინგლისელმა ფიზიკოსმა ერნესტ **რეზერფორდმა**. მანჩესტერის უნივერსიტეტში მუშაობისას ის ატარებდა ცდებს რადიოაქტიური გამოსხივების შესასწავლად (ამ გამოსხივებას თქვენ შემდგომ გავცნობით). ცდების შედეგებზე დაყრდნობით რეზერფორდმა 1911 წელს წარმოადგინა **ატომის პლანეტარული მო-**



სურ. 18



ერნესტ რეზერფორდი
(1871 – 1937)

დელი. ამ მოდელის მიხედვით ატომის ცენტრში იმყოფება დადებითად დამუხტული ბირთვი, რომელშიც კონცენტრირებულია ატომის თითქმის მთელი მასა, ხოლო მისგან საკმაოდ დიდ მანძილზე (ატომბირთვის ზომებთან შედარებით) ბრუნავს ელექტრონები. ატომის დანარჩენი ნაწილი კი „ნივთიერ სიცარიელეს“ წარმოადგენს (სურ. 19). უფრო მოგვიანებით, 1919 წელს, რეზერფორდის მიერ ექსპერიმენტულად აღმოჩენილ იქნა ატომბირთვის დადებითი მუხტის მატარებელი ნაწილაკი – პროტონი (ბერძ. $\pi\rho\omicron\tau\omicron\varsigma$ – პირველი, ძირითადი). პროტონის მუხტი მოდულით ელექტრონის მუხტის ტოლია, ხოლო მასა 1836-ჯერ აღემატება ელექტრონის მასას. ატომში

ელექტრონებისა და პროტონების რაოდენობა ერთნაირია, ამიტომ ის ელექტრულად ნეიტრალურია. რეზერფორდის უმნიშვნელოვანესი კვლევები ნობელის პრემიით იქნა აღნიშნული.

1932 წელს რეზერფორდის მოსწავლემ ჯეიმს ჩედვიკმა აღმოაჩინა ატომბირთვში შემავალი კიდევ ერთი ნაწილაკი – ნეიტრონი (ლათ. *Neuter* – არც ერთი და არც მეორე). ნეიტრონს არ გააჩნია ელექტრული მუხტი, ხოლო მისი მასა უმნიშვნელოდ აღემატება პროტონის მასას.

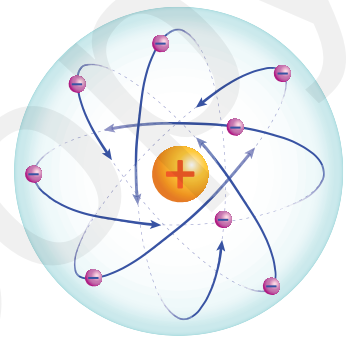
ატომბირთვში შემავალი ნაწილაკები – პროტონები და ნეიტრონები ერთმანეთთან დაკავშირებულნი არიან ბირთვული ძალებით (ძლიერი ურთიერთქმედება, რომელსაც შემდგომ ისწავლით). ეს ძალები ბირთვის ზომის რიგის მანძილებზე ბევრად აღემატება ელექტრულ ძალებს და ბირთვის მდგრადობას განაპირობებს. ელექტრონების ატომბირთვთან მიზიდვა გაცილებით სუსტია, ვიდრე პროტონებისა და ნეიტრონების ურთიერთმიზიდვა. ამიტომ ელექტრონს (პროტონებისა და ნეიტრონებისაგან განსხვავებით) შეუძლია დატოვოს ატომი და გადავიდეს სხვა ატომში ან გახდეს თავისუფალი.

თუ ელექტრულად ნეიტრალური ატომი დაკარგავს ერთ ან რამდენიმე ელექტრონს, ის გადაიქცევა დადებით იონად – მასში პროტონების რაოდენობა მეტია ელექტრონების რაოდენობაზე, ხოლო თუ ატომი მიიერთებს ერთ ან რამდენიმე ელექტრონს – უარყოფით იონად – მასში პროტონების რაოდენობა ნაკლებია ელექტრონების რაოდენობაზე (სურ. 20).

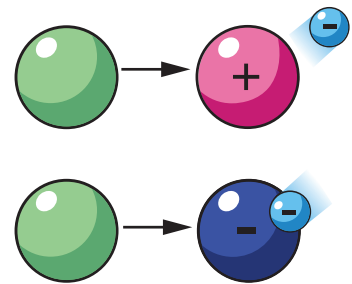
ელექტრონები, პროტონები და ნეიტრონები ელემენტარული ნაწილაკებია – მათი დაყოფა უფრო მცირე ნაწილაკებად შეუძლებელია. ამასთან, მნიშვნელოვანია კარგად გვესმოდეს, რომ ელექტრონისა და პროტონის მუხტი არ არის მათ მიერ შეძენილი, ელექტრული მუხტი და სხვა დამუხტულ ნაწილაკებთან ურთიერთქმედება მათი განუყოფელი თვისებაა. სწორედ ამიტომ შეუძლებელია ელექტრონისა და პროტონის მუხტი ან მისი ნაწილი წავართვათ. ამრიგად, ელექტრონისა და პროტონის მუხტიც ელემენტარულია.

ელექტრონისა და პროტონის აღმოჩენამ, ასევე ატომის აღნაგობის დადგენამ შესაძლებელი გახადა მარტივად ახსნილოყო სხეულთა და ელექტროების პროცესი.

არადაელექტროებულ (ელექტრულად ნეიტრალურ) სხეულში ყველა ელექტრონის ჯამური უარყოფითი მუხტი მოდულით ყველა პროტონის ჯამური დადებითი მუხტის ტოლია. თუ სხეულში ელექტრონების რაოდენობა მეტია პროტონების რაოდენობა-



სურ. 19



სურ. 20

ზე, სხეული უარყოფითადაა დამუხტული, ელექტრონების რაოდენობის ნაკლებობის შემთხვევაში კი – დადებითად. აქედან გამომდინარეობს, რომ სხეულის მუხტი ყოველთვის ელექტრონის მუხტის მოდულის ჯერადია, ანუ ნებისმიერი სხეულის მუხტი დისკრეტულია (წყვეტილია). თუ ელექტრონის მუხტს e -თი აღვნიშნავთ, მაშინ:

$$q = N|e|,$$

რომელშიც N მთელი რიცხვია.

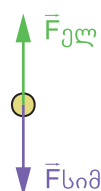


რობერტ მილიკენი
(1868 – 1953)

პირველი მეცნიერი, ვინც საკმაოდ სიზუსტით შეძლო ელექტრონის მუხტის გაზომვა, ამერიკელი ფიზიკოსი რობერტ ენდრიუს მილიკენი იყო. მილიკენის ცდის სქემა მოცემულია სურ. 21-ზე. დამუხტულ ფირფიტების შორის სივრცეში შეიფრქვეოდა ზეთი. შეფრქვევის შემდეგ წარმოიქმნებოდა ძალიან პატარა ზეთის წვეთები, რომლებიც უარყოფითად იმუხტებოდა რადიოაქტიური გამოსხივების შედეგად. ექსპერიმენტში შესაძლებელი იყო ფირფიტების მუხტის მდორედ შეცვლა. ყოველი ცდის დროს მილიკენი აკვირდებოდა ცალკეულ წვეთს და ფირფიტებზე მუხტის ცვლილებით აღწევდა წვეთის წონასწორობას. ცხადია, რომ ამ შემთხვევაში წვეთზე მოქმედ ძალთა ჯამი ნულის ტოლია (სურ. 22).



სურ. 21



სურ. 22

წონასწორობის პირობიდან შესაძლებელი იყო წვეთის მუხტის გამოთვლა. მრავალი ცდის შედეგად მილიკენმა დაადგინა, რომ ყოველ ჯერზე წვეთის q მუხტი გარკვეული მუხტის ($1,6 \cdot 10^{-19}$ კ) ჯერადი იყო, ანუ $q = N \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ კ. ამ ფაქტზე დაყრდნობით მილიკენმა დაასკვნა, რომ უმცირესი მუხტის მოდული ელექტრონის მუხტის მოდულის ტოლია და მას ელემენტარული მუხტი ეწოდა. ამრიგად, ელექტრონის მუხტი

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ კ.}$$

ამ ცხრილში მოყვანილია ატომის შემადგენელი ნაწილაკების მასა და მუხტი:

	მასა, კგ	მუხტი, კ.
ელექტრონი (e)	$9,109 \cdot 10^{-31}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$
პროტონი (p)	$1,673 \cdot 10^{-27}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$
ნეიტრონი (n)	$1,675 \cdot 10^{-27}$	0

ელექტრულად ნეიტრალური სხეულების ერთმანეთზე ხახუნისას ერთი სხეულიდან მეორეზე სწორედ ელექტრონები გადადის: სხეულიდან, რომელშიც ისინი ნაკლები ძალით მიიზიდება ატომბირთვების მიერ, გადადის სხეულში, რომელშიც ეს ძალა უფრო მეტია. ამიტომ, თუ მოხახუნე სხეულების ნივთიერება ერთნაირია, ელექტრონები ერთი სხეულიდან მეორეზე არ გადავა და ისინი არ დაიმუხტება.

დაკვნები:

- ნივთიერების შემადგენელი ატომები შედგება ელემენტარული ნაწილაკებისაგან – ელექტრონების, პროტონებისა და ნეიტრონებისაგან;
- ელექტრონი უარყოფითად დამუხტული ელემენტარული ნაწილაკია, პროტონი – დადებითად დამუხტული, ნეიტრონი კი უმუხტო ნაწილაკია;
- ატომი შედგება დადებითად დამუხტული ბირთვისაგან, რომელშიც პროტონები და ნეიტრონებია მოთავსებული, ბირთვის გარშემო კი ბრუნავს ერთი ან რამდენიმე ელექტრონი;
- ელექტრონისა და პროტონის მუხტი მოდულით ტოლია და ნიშნით საპირისპირო: ელექტრონის მუხტი $q_{ელ} = -1,6 \cdot 10^{-19}$ კ, პროტონის მუხტი $q_{პრ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ კ;
- შეუძლებელია ელექტრონს ან პროტონს მოვაცილოთ მუხტი ან მისი ნაწილი, ამიტომ $1,6 \cdot 10^{-19}$ კ უმცირესი (ელემენტარული) მუხტის მნიშვნელობაა;
- ელექტრულად ნეიტრალურ ატომში პროტონებისა და ელექტრონების რაოდენობა ტოლია;
- ატომმა შესაძლებელია დაკარგოს ან მიიერთოს ერთი ან რამდენიმე ელექტრონი, შესაბამისად, ის გარდაიქმნება დადებით ან უარყოფით იონად;
- უარყოფითად დამუხტულ სხეულში ელექტრონების რაოდენობა პროტონების რაოდენობას სჭარბობს, დადებითად დამუხტულ სხეულში კი პროტონების რაოდენობა – ელექტრონების რაოდენობას;
- ნებისმიერი მუხტი ელემენტარული მუხტის ჯერადია, რაც ნიშნავს, რომ მუხტი დისკრეტულია (წყვეტილია);
- სხეულის მუხტი $q = N \cdot |e|$, რომელშიც N მთელი რიცხვია. თუ მუხტი დადებითია, N დადებითია; როდესაც მუხტი უარყოფითია, N უარყოფითია.

საკონტროლო კითხვები:

1. რატომ უწოდებენ ელექტრონებს, პროტონებსა და ნეიტრონებს ელემენტარულ ნაწილაკებს?
2. რა განსხვავება და მსგავსებაა ატომის აგებულების ტომსონისა და რეზერფორდის მოდელებს შორის?

3. ორი სხეულის ერთმანეთზე ხახუნისას რომელ სხეულს ტოვებს ელექტრონები? რომელ სხეულზე გადადის ელექტრონები?
4. ელექტრულად ნეიტრალური სხეულების ერთმანეთზე ხახუნისას პირველიდან მეორეზე ელექტრონების გარკვეული რაოდენობა გადავიდა. რა ნიშნის მუხტი შეიძინა პირველმა სხეულმა? მეორემ?
5. რას ნიშნავს ელექტრული მუხტის დისკრეტულობა?
6. რატომაა ნებისმიერი სხეულის მუხტი $1,6 \cdot 10^{-19}$ კ-ის ჯერადი?
7. სხეული ელექტრულად ნეიტრალურია. ნიშნავს თუ არა ეს, რომ მასში არ არის დამუხტული ნაწილაკები? რატომ?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

რამდენი ჭარბი ელექტრონია ბურთულაზე, თუ მისი მუხტი $q = -8$ ნკ-ია?

მოცემულია: $q = -8$ ნკ. $N = ?$

ამოხსნა: როგორც ვიცით, ნებისმიერი მუხტი ელემენტარული მუხტის ჯერადია. ელექტრონის მუხტი უარყოფითი ელემენტარული მუხტია: $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ კ. ვინაიდან სხეულის მუხტი უარყოფითია, შეგვიძლია დავწეროთ: $q = Ne$, რომელშიც N სხეულზე ჭარბი ელექტრონების რაოდენობაა. საიდანაც $N = \frac{q}{e} = \frac{-8 \cdot 10^{-9} \text{ კ}}{-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ კ}} = 5 \cdot 10^{10}$.

პასუხი: ბურთულაზე $5 \cdot 10^{10}$ ჭარბი ელექტრონია.



ამოხსენით ამოცანები:

1. სკალარული თუ ვექტორული სიდიდეა ელექტრული მუხტი?
2. რისი ტოლია ატომის ჯამური მუხტი?
3. რამდენ პროტონს შეიცავს ატომის ბირთვი, რომლის გარშემოც ოთხი ელექტრონი ბრუნავს?
4. რისი ტოლია იმ ატომის ბირთვის მუხტი, რომლის გარშემო ექვსი ელექტრონი ბრუნავს?
5. შესაძლებელია თუ არა ნაწილაკს ჰქონდეს $-3,2 \cdot 10^{-20}$ კ მუხტი? პასუხი დაასაბუთეთ.
6. შესაძლებელია თუ არა სხეულის ჯამური მუხტი $5 \cdot 10^{-27}$ კ-ის ტოლი იყოს? პასუხი დაასაბუთეთ.
7. ატომმა სამი ელექტრონი მიიერთა. რისი ტოლია მისი მუხტი?
8. α ნაწილაკი ორი პროტონისა და ორი ნეიტრონისაგან შედგება. განსაზღვრეთ მისი მასა და მუხტი (სურ. 23).
9. დაუმუხტავი მინის ღეროსა და აბრეშუმის ქსოვილის გახახუნების შედეგად მინის ღეროზე 10^8 -ით მეტი პროტონი აღმოჩნდა, ვიდრე ელექტრონი. რა მუხტი შეიძინა მინის ღერომ? აბრეშუმის ქსოვილმა? შეიცვალა თუ არა ჯამური მუხტი გახახუნების შედეგად?
10. აზოტის ატომის ბირთვი 7-7 პროტონსა და ნეიტრონს შეიცავს. რამდენჯერ მეტია ამ ბირთვის მასა მის გარშემო მბრუნავი ელექტრონების მასათა ჯამზე?



α ნაწილაკი
სურ. 23

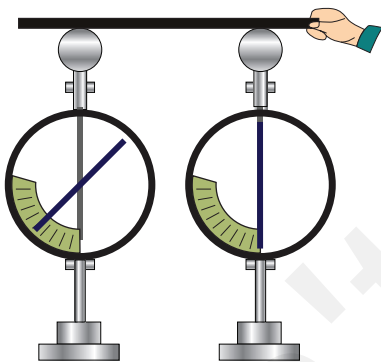
§4 გამტარები და იზოლატორები

რატომ ამზადებენ ელექტროსადენს ლითონისაგან? რატომაა ის რეზინით ან პლასტმასით დაფარული? რატომაა საშიში ჩართულ ყავადანში ლითონის კოვზის ჩადება? რატომ აქვს ბენზინში ავტომობილს ჩამოკიდებულკი ლითონის ჯაჭვი, რომელიც მიწას ეხება?

შესაძლებელია თუ არა ელექტრული მუხტი დამუხტული სხეულიდან დაუმუხტავზე გადავიდეს?



ჩავატაროთ ცდა. ავიღოთ დამუხტული და დაუმუხტავი ელექტრომეტრი (ელექტროსკოპი) და მათი ბურთულები შევაერთოთ სხვადასხვა ნივთიერებისაგან დამზადებული ღეროებით. თუ ავირჩევთ რეზინის, მინის, ებონიტის ან პლასტმასის ღეროს, ელექტრული მუხტი დამუხტული ელექტრომეტრიდან დაუმუხტავზე არ გადავა – ღეროები მუხტს არ გაატარებს (სურ. 24). ნივთიერებებს, რომლებიც ელექტრულ მუხტს არ ატარებს არაგამტარებს ანუ იზოლატორებს (დიელექტრიკებს) უწოდებენ. სწორედ ასეთი ნივთიერებებისაგან არის დამზადებული, მაგალითად, ჩამრთველები, შტეფსელები (როზეტები), სახრახნისის, ბრტყელტუჩას და მკვნეტარას ტარები, საიზოლაციო ლენტი (სურ. 25) და ა.შ. კარგი იზოლატორია ქიმიურად სუფთა წყალი.



სურ. 24



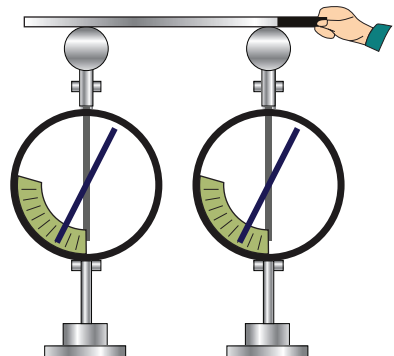
სურ. 25

თუ იმავე ცდას გავიმეორებთ, ოღონდ ელექტრომეტრებს რომელიმე ლითონის ღეროთი შევაერთებთ (ღეროს უნდა ჰქონდეს იზოლატორის სახელური), დავინახავთ, რომ დაუმუხტავი ელექტრომეტრის ისარი ნულოვანი ჩვენებიდან გადაიხრება, დამუხტული ელექტრომეტრის ჩვენება კი დაიკლებს (სურ. 26). ე.ი ლითონის ღერომ მუხტი გაატარა – მისი მეშვეობით ელექტრული მუხტის ნაწილი დამუხტული ელექტრომეტრიდან დაუმუხტავზე გადავიდა.

ნივთიერებებს, რომლებისგანაც დამზადებულ სხეულებს შეუძლიათ მუხტის გატარება, გამტარები ეწოდება.

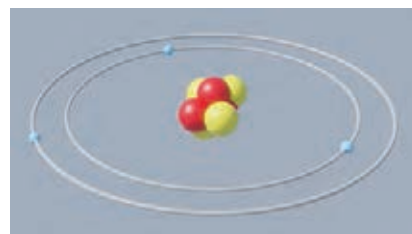
ყველა ლითონი (ნებისმიერ აგრეგატულ მდგომარეობაში) გამტარია. სითხეების უმეტესობაც, მაგალითად, სასმელი წყალი, მარილების, ტუტეებისა და მჟავების ხსნარები გამტარებია. ასევე გამტარია ადამიანის სხეულიც, რომლის ორ მესამედზე მეტი სითხეა.

ატომის აგებულების ცოდნა საშუალებას გვაძლევს ავხსნათ დიელექტრიკებისა და გამტარების არსებობა. ატომებში ელექტრონები ბირთვიდან სხვადასხვა



სურ. 26

მანძილითაა დაშორებული (სურ. 27). რაც უფრო დაშორებულია ელექტრონი ბირთვიდან, მით ნაკლები ძალით მიიზიდება ბირთვის მიერ. განსაკუთრებით სუსტია ყველაზე მეტად დაშორებული ელექტრონების მიზიდვა ლითონებში. ამიტომ მის ყველა ატომს სცილდება ერთი ან რამდენიმე ელექტრონი, რომლებიც იწყებს თავისუფალ სიბრტყურ მოძრაობას ლითონის შიგნით.



სურ. 27

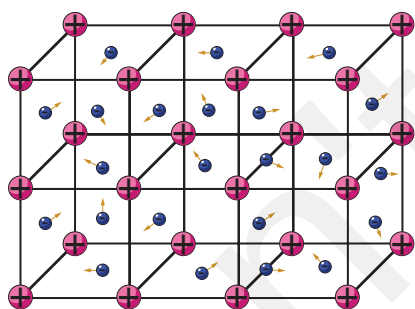
თავისუფალი ელექტრონების ერთობლიობას

„ელექტრონულ აირს“ უწოდებენ. ამრიგად, ლითონის კრისტალურ მესერს ქმნის დადებითი იონები, ხოლო მათ შორის სივრცე შევსებულია „ელექტრონული აირით“ (სურ. 28).

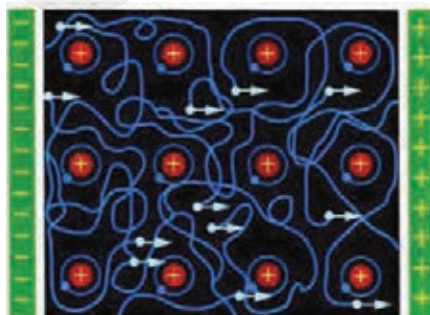
თხევად და აირად მდგომარეობაში მყოფ ლითონებში დადებითი იონები კრისტალურ მესერს არ ქმნის, მაგრამ მათში „ელექტრონული აირი“ მაინც არსებობს.

თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკები იონების სახით არსებობს ზოგიერთ ხსნარშიც. მაგალითად, სუფრის მარილის (NaCl) წყალხსნარში, წყლის მოლეკულების ზეგავლენით NaCl-ის ნეიტრალური მოლეკულა იშლება ნატრიუმის დადებით და ქლორის უარყოფით იონებად: $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$. ამ მოვლენას მოგვიანებით შეისწავლით.

სწორედ თავისუფალ დამუხტულ ნაწილაკებს გადააქვთ ელექტრული მუხტი. ლითონებში მუხტი გადააქვს თავისუფალ ელექტრონებს, რომლებიც იწყებენ მიმართულ მოძრაობას უარყოფითად დამუხტული სხეულიდან დადებითად დამუხტული სხეულისაკენ (სურ. 29). ხსნარებში კი ელექტრული მუხტის გადამტანები იონებია.



სურ. 28



სურ. 29

გამტარებისგან განსხვავებით, დიელექტრიკებში ელექტრონებსა და ატომბირთვს შორის მიზიდულობა ძლიერია, ამიტომ მათში თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკების რაოდენობა იმდენად მცირეა, რომ მუხტის გადასატანად საკმარისი არ არის.

მნიშვნელოვანია გვესმოდეს, რომ იდეალური დიელექტრიკი არ არსებობს: ნებისმიერ დიელექტრიკში არის თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკების თუნდაც ძალიან



სურ. 30

მცირე რაოდენობა, ამიტომ მას მცირე მუხტის გატარება მაინც შეუძლია. მშრალი ჰაერი კარგი დიელექტრიკია, მაგრამ მასში მოთავსებული დამუხტული ელექტრომეტრის ჩვენება რამდენიმე საათში თავისთავად შემცირდება, რაც ჰაერში თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკების არსებობაზე მეტყველებს.

ალბათ, ყველას გინახავთ ელვა (სურ. 30). მისი არსებობა იმაზე მიაწინებს, რომ გარკვეულ პირო-

ბებში ჰაერი შეიძლება კარგ გამტარად იქცეს. ასევე შეიძლება გამტარად გადაიქცეს ისეთი კარგი დიელექტრიკები, როგორებიცაა მინა, ფაიფური და სხვა.

ბუნებაში არსებობს ნივთიერებები, რომლებსაც შუალედური ადგილი უკავია გამტარებსა და დიელექტრიკებს შორის. ასეთ ნივთიერებებს **ნახევარგამტარები ეწოდება**. ნახევარგამტარები ბუნებაში ფართოდაა გავრცელებული. ესენია: ლითონების ოქსიდები და სულფიდები, ზოგიერთი ორგანული ნაერთი და სხვა. თანამედროვე ელექტრონიკაში ფართოდ გამოიყენება გერმანიუმი და სილიციუმი.

დაბალ ტემპერატურაზე ნახევარგამტარები მუხტს არ ატარებს. ტემპერატურის ზრდისას ნახევარგამტარებში მკვეთრად იზრდება თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკების რაოდენობა და ის გამტარად იქცევა. ნახევარგამტარებში მუხტის გადატანის პროცესს მოგვიანებით შეისწავლით.

ცხრილში მოცემულია თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკების კონცენტრაცია გამტარებში, ნახევარგამტარებსა და იზოლატორებში ოთახის ტემპერატურაზე:

სახელწოდება	გამტარები	ნახევარგამტარები	იზოლატორები (დიელექტრიკები)
თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკების კონცენტრაცია, მ ⁻³	$10^{28} - 10^{29}$	$10^{21} - 10^{22}$	$10^{14} - 10^{15}$

დაკვნები:

- ნივთიერებებს, რომლებიც ელექტრულ მუხტს არ ატარებს, არაგამტარები ანუ იზოლატორები (დიელექტრიკები) ეწოდება;
- ნივთიერებებს, რომლებიც ელექტრულ მუხტს ატარებს, გამტარები ეწოდება;
- ლითონები კარგი გამტარებია;
- თავისუფალი ელექტრონების ერთობლიობას „ელექტრონულ აირს“ უწოდებენ;
- ლითონის კრისტალურ მესერს ქმნის დადებითი იონები, ხოლო მათ შორის სივრცე შევსებულია „ელექტრონული აირით“.

საკონტროლო კითხვები:

1. რატომ უნდა გვეჭიროს ელექტრომეტრების შემაერთებელი ლითონის ღერო იზოლატორით?
2. რომელ ელექტრონს ვუწოდებთ თავისუფალს?
3. რატომაა თავისუფალი ელექტრონების კონცენტრაცია ლითონებში უფრო მეტი, ვიდრე იზოლატორებში?
4. რომელ ნაწილაკებს გადააქვს ელექტრული მუხტი გამტარ ხსნარებში?
5. როგორ იზოლატორს უწოდებდით იდეალურს?
6. თქვენი აზრით, თუ ნახევარგამტარს ძლიერ გავაცივებთ, რად გადაიქცევა ის?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

ელექტრომეტრის, შალის ნაჭრისა და ებონიტის ჯოხის დახმარებით როგორ განვსაზღვროთ გამტარია თუ არა უცნობი ნივთიერებისგან დამზადებული საქსოვი ჩხირი?

ამოხსნა. შალის ნაჭერზე გახახუნებით დავმუხტოთ ებონიტის ჯოხი და შემდეგ ნეიტრალური ელექტრომეტრის ღეროს შევახოთ. ელექტრომეტრი დაიმუხტება – მისი ისარი გადაიხრება. შემდეგ ელექტრომეტრის ღეროს შევახოთ საქსოვი ჩხირი. თუ ელექტრომეტრი განიმუხტა, ჩხირი გამტარი ნივთიერებისგანაა დამზადებული – მისი დახმარებით მუხტი გადმოვიდა ჩვენზე. წინააღმდეგ შემთხვევაში ჩხირი იზოლატორისგანაა დამზადებული.



ამოხსენით ამოცანები:

1. როგორ შეიცვლება დადებითად დამუხტული ელექტრომეტრის ჩვენება, თუ მას პლასტმასის დაუმუხტავი ჯოხით შევეხებით? პასუხი დაასაბუთეთ.
2. უარყოფითად დამუხტულ ლითონის სხეულს მოსწავლემ მინის სახაზავი შეახო. შეიცვლება თუ არა სხეულის მუხტი?
3. როგორ შეიცვლება დადებითად დამუხტული ალუმინის ბურთულის მასა, თუ მას შიშველი ხელით შევეხებით?
4. შესაძლებელად მივაჩნიათ თუ არა ებონიტის ღეროს ბოლოებზე ერთდროულად დაგროვდეს სხვადასხვანიშნიანი მუხტი (სურ. 31)?
5. შეიძლება თუ არა არაგამტარი ნივთიერება გამტარი გახდეს?
6. დამუხტული ელექტროსკოპის ფურცლებს შორის კუთხე დროთა განმავლობაში თავისთავად მაინც მცირდება. ახსენით ეს მოვლენა.
7. თმის დავარცხნა პლასტმასის სავარცხლით უფრო მოსახერხებელია თუ ისეთივე ალუმინის სავარცხლით? პასუხი დაასაბუთეთ.
8. ფეთქებადსაშიში ნივთიერებების გადასაზიდ ავტომობილებზე ამაგრებენ ლითონის ჯაჭვს, რომელიც მიწას ეხება. რატომ?
9. რატომ არ შეიძლება ცეცხლმოკიდებული ელექტროსადენების ჩაქრობა წყლის ჭავლით?
10. ელექტროსკოპის დამზადებისას ლითონის ღერო მინის ღეროთი ჩაანაცვლეს. იმუშავებს თუ არა ასეთი ელექტროსკოპი?



სურ. 31

§5 ელექტრული მუხტის შენახვის კანონი. სხეულთა დაელექტროების ხერხები

რა კანონზომიერებას ემორჩილება სხეულთა შორის მუხტის განაწილება?

როგორც წინა პარაგრაფებში ვნახეთ, ელექტრულად ნეიტრალური ორი სხეულის ერთმანეთზე ხახუნისას ელექტრონები ტოვებს ერთ სხეულს და გადადის მეორეზე, ანუ პირველ სხეულზე იქმნება ელექტრონების ნაკლებობა, ხოლო მეორეზე – მისი სიჭარბე იმ რაოდენობასთან შედარებით, რომელიც მათ დაუმუხტავ მდგომარეობაში ჰქონდათ. ამ პროცესში ელექტრონები არც წარმოიქმნება და არც ქრება, ისინი მხოლოდ სხეულებს შორის საერთო რაოდენობის შეუცვლელად გადანაწილდება. შესაბამისად, თუ თავიდან სხეულთა საერთო მუხტი ნულის ტოლი იყო, დაელექტროების შემდეგაც ნულის ტოლი დარჩება. ეს მაგალითი და სხვა მრავალი ექსპერიმენტი ადასტურებს, რომ სხეულეთა დაელექტროება ემორჩილება **ელექტრული მუხტის შენახვის კანონს**:

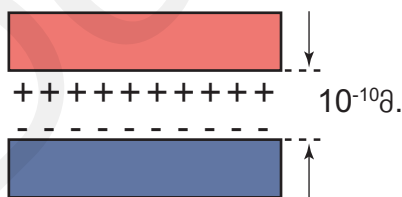
ელექტრულად ჩაკეტილ სისტემაში ყველა სხეულის ელექტრული მუხტების ალგებრული ჯამი ნებისმიერი ურთიერთქმედების დროს მუდმივია. ანუ,

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const.}$$

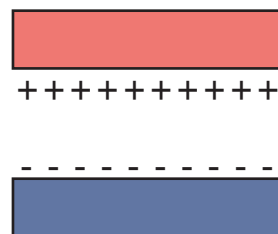
ელექტრულად ჩაკეტილი სისტემა ეწოდება სხეულთა (ნაწილაკთა) ისეთ ჯგუფს, რომელშიც გარედან არ შედის და მისგან არც გარეთ გადის დამუხტული ნაწილაკები.

როგორ გადადის ხახუნისას ელექტრონები ერთი სხეულიდან მეორეზე? ასეთი გადასვლისათვის აუცილებელია, რომ სხეულთა ზედაპირებს შორის მანძილი ატომებსა და მოლეკულებს შორის მანძილის შესადარი იყოს. მაგრამ სხეულთა ზედაპირები იდეალურად სწორი არ არის, რის გამოც მათი კონტაქტისას ერთმანეთს მჭიდროდ ზედაპირების მხოლოდ მცირე ნაწილი ეხება.

სხეულების ერთმანეთზე ხახუნისას მჭიდროდ მიდებულ უბნების რაოდენობა იზრდება. შესაბამისად, უფრო მეტი ელექტრონი ახერხებს ერთი სხეულიდან მეორეზე გადასვლას. შედეგად, ერთი სხეულის ზედაპირზე ჩნდება დადებითი მუხტი, ხოლო მეორეზე – უარყოფითი (სურ. 32 ა). ორი სხეულის საზღვარზე წარმოიქმნება ორმაგი ელექტრული შრე, რომლის არსებობა კონტაქტიდან მოშორებით არ ვლინდება, მაგრამ საკმარისია სხეულები ერთმანეთს დავაშოროთ, რომ მათზე საპირისპირო ნიშნის მუხტები აღმოჩნდება (სურ. 32 ბ).



სურ. 32 ა

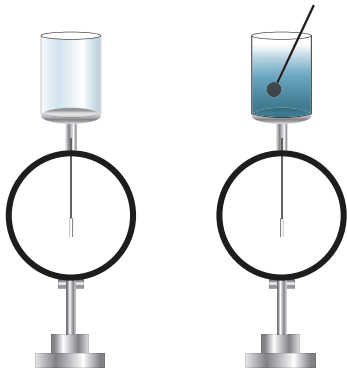


სურ. 32 ბ

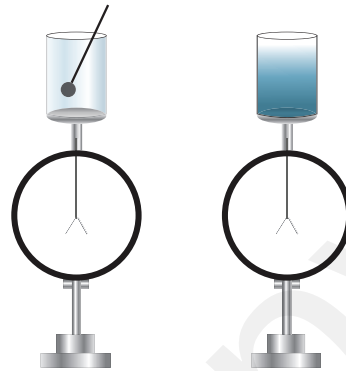


ჩავატაროთ ცდა. ავიღოთ ორი ელექტროსკოპი და მის ღეროებზე დავამაგროთ ლითონის ჭიქები. ერთ ჭიქაში ჩავასხათ გამოხდილი (ქიმიურად სუფთა) წყალი და მასში დიელექტრიკისაგან დამზადებულ ღეროზე დამაგრებული სანთლის ბურთულა ჩავუშვათ (სურ. 33ა). ბურთულის ამოღების შემდეგ დავინახავთ, რომ ელექტროსკოპის ფურცლები გაიშლება. იგივე მოხდება ბურთულის მეორე ელექტროსკოპის ცარიელ

ჭიქაში მოთავსებისას (სურ. 33 ბ). ეს ნიშნავს, რომ მუხტები ბურთულის და წყლის ურთიერთშეხებისას ყოველგვარი ხახუნის გარეშეც განცალკევდა. თუ ელექტროსკოპებს გამტარით შევაერთებთ, მათი ფურცლები ჩამოეშვება. ე.ი. წყლისა და ბურთულის შეძენილი მუხტები მოდულით ტოლი და ნიშნით საპირისპიროა.



სურ. 33 ა



სურ. 33 ბ

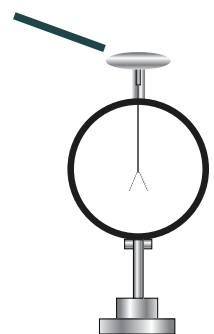
როგორც ვიცით, მუხტების განცალკევება ხდება სხვადასხვა ნივთიერებისგან დამზადებული სხეულების ერთმანეთზე ხახუნისას. ბუნებრივად იზადება კითხვა: ცდების ჩატარებისას, რატომ ვიყენებდით დიელექტრიკისგან და არა ლითონისგან დამზადებულ სხეულებს? ამის მიზეზი ლითონებში დიდი რაოდენობით თავისუფალი ელექტრონის არსებობაა: გახახუნებით დამუხტვის შემდეგ ლითონების დაშორებისას, ბოლო მომენტში, მათი ზედაპირების სულ მცირე ნაწილი მაინც შეხებაში რჩება, რომლის გავლითაც თავისუფალი ელექტრონები ერთი ლითონიდან მეორეზე გადასვლას ასწრებს. შესაბამისად, სხეულებზე მუხტი არ დარჩება. დიელექტრიკების შემთხვევაში კი მუხტი უბრალო შეხებით არ გადადის სხვა შემხებ სხეულზე და ამიტომ მასზე რჩება. სხეულებზე მუხტის შენარჩუნება შეიძლება იმ შემთხვევაშიც, თუ ერთი სხეული იქნება დიელექტრიკი, ხოლო მეორე – ლითონი, რომელსაც ექნება იზოლატორის სახელური.

ხახუნით დამუხტვა სხეულთა დაელექტროების ერთადერთი ხერხი არ არის.

ვიცით, რომ დამუხტული სხეული სანინააღმდეგო ნიშნით დამუხტულს იზიდავს. მაგრამ რატომ იზიდავს დამუხტული სხეული დაუმუხტავ სხეულს (ქაღალდის ნაკუნებს, ჩამოკიდებულ მასრას, წყლის ჭავლს და სხვა)?



ჩავატაროთ ცდა: დაელექტროებული ღერო დაუმუხტავი ელექტროსკოპის (ელექტრომეტრის) დისკოს მივუახლოოთ. ელექტროსკოპის ფურცლები გაიშლება (სურ. 34). თუ ღეროს მოვაშორებთ, ელექტროსკოპის ფურცლები დაეშვება. ეს ნიშნავს, რომ მუხტი ღეროდან ელექტროსკოპის ფურცლებზე კი არ გადავიდა, არამედ ღეროს მუხტის გავლენით გაჩნდა. როგორ აიხსნება ეს? განცალკევებულ დაუმუხტავ სხეულში საპირისპირო ნიშნის მუხტები მის მთელ მოცულობაში თანაბრადაა განაწილებული. ეს განაწილება მასთან სხვა დამუხტული სხეულის მიახლოებისას ირღვევა – ელექტროსკოპის დისკოსთან მიახლოებული ღეროს მუხტი მიიზიდავს ელექტროსკოპის ღეროსა და ფურცლებიდან საპირისპირო ნიშნის მუხტს და განიზიდავს ერთსახელა მუხტს, რომელიც ფურცლებზე დაგროვდება. ეს რომ ნამდვილად ასეა, შეიძლება დავასაბუთოთ ცდით.



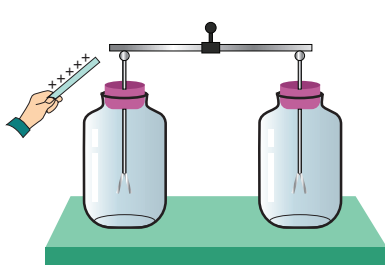
სურ. 34



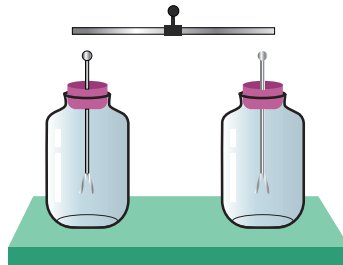
მივიტანოთ დამუხტული ღერო გამტარით შეერთებული ორი დაუმუხტავი ელექტროსკოპიდან ერთ-ერთის ბურთულასთან (სურ. 35 ა). ორივე ელექტროსკოპის

ფურცლები გაიშლება. ე.ი მათზე მუხტი გაჩნდა. მოვაშორეთ ელექტროსკოპებს შემავრთველი გამტარი და მხოლოდ ამის მერე მოვაცილოთ დამუხტული ღერო. ელექტროსკოპებზე დარჩება მოდულით ტოლი და ურთიერთსაწინააღმდეგო ნიშნის მუხტები (სურ. 35 ბ). მართლაც, თუ ელექტროსკოპებს კვლავ გამტარით შევაერთებთ მათი მუხტები ერთმანეთს გაანეიტრალდება (სურ. 35 გ).

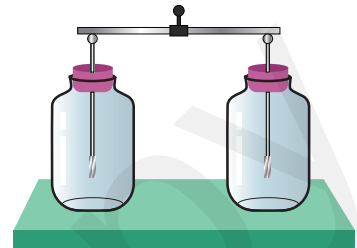
სხვა დამუხტული სხეულის მოქმედებით სხეულში მუხტების გადანაწილებას გავლენით დაელექტროება ეწოდება.



სურ. 35 ა



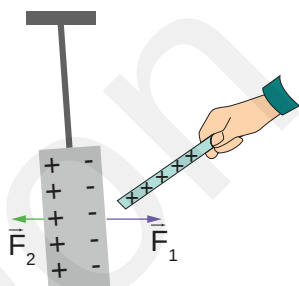
სურ. 35 ბ



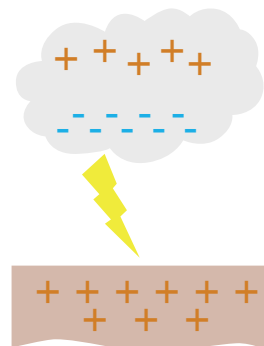
სურ. 35 გ

სწორედ გავლენით დაელექტროებით აიხსნება დამუხტული სხეულის მიერ დაუმუხტავი სხეულის მიზიდვა. ელექტრულად ნეიტრალურ მასრასთან დამუხტული ღეროს მიახლოებისას მასში მუხტები გავლენით გადანაწილდება: მასრის ურთიერთსაწინააღმდეგო კიდეებზე სხვადასხვანაირი მუხტები გაჩნდება (სურ. 36), ღეროსა და მასრას შორის მიზიდვის $\vec{F}_1$ და განზიდვის $\vec{F}_2$ ძალა აღიძვრება. რადგან ღეროს საწინააღმდეგო ნიშნის მუხტი მასთან უფრო ახლოსაა, მიზიდვის ძალა განზიდვის ძალაზე მეტი იქნება, ამიტომ მასრა ღეროსკენ მიიზიდება.

უზარმაზარი მასშტაბის გავლენით დაელექტროებას ვხვდებით ბუნებაში (სურ. 37).



სურ. 36



სურ. 37



სურათის მიხედვით აღწერეთ მოვლენა.



ლითონის დამუხტული და დაუმუხტავი სხეულების შეხებისას ელექტრული მუხტის ნაწილი დაუმუხტავზე გადადის. დამუხტვის ამ ხერხს **ელექტროგამტარობით დამუხტვას** უწოდებენ. აღწერეთ დამუხტვის მექანიზმი.



ლითონის სხეულის დამუხტვა შესაძლებელია, თუ მას დავამინებთ (მავთულით მიწასთან შევაერთებთ) და მივუახლოებთ სხვა დამუხტულ სხეულს. აღწერეთ დამუხტვის მექანიზმი. რა შემთხვევაში შეინარჩუნებს სხეული მიღებულ მუხტს?

სხეულთა დამუხტვა აგრეთვე შეიძლება მისი სინათლით დასხივებით, რადიოაქტიური გამოსხივებით და სხვა ხერხებით.

დაკვნები:

- სხეულთა დამუხტვის პროცესში ელექტრონები არც წარმოიქმნება და არც ქრება, ისინი მხოლოდ სხეულებს შორის საერთო რაოდენობის შეუცვლელად გადანაწილდება;
- ელექტრულად ჩაკეტილ სისტემაში ყველა სხეულის ელექტრული მუხტების ალგებრული ჯამი ნებისმიერი ურთიერთქმედების დროს მუდმივია:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const};$$

- სხვა დამუხტული სხეულის მოქმედებით სხეულში მუხტების გადანაწილებას გავლენით დაელექტროება ეწოდება;
- სხეულთა დაელექტროება შეიძლება ხახუნით, გავლენით, შეხებით, დასხივებით და სხვა;
- დამუხტული და დაუმუხტავი სხეულების შეხებისას ელექტრული მუხტის ნაწილის დაუმუხტავზე გადასვლას ელექტროგამტარობით დამუხტვას უწოდებენ.

საკონტროლო კითხვები:

1. რას ნიშნავს სხეულთა სისტემის ელექტრულად ჩაკეტვა?
2. რა როლს ასრულებს ხახუნი სხეულთა დაელექტროების პროცესში?
3. რატომ ელექტროვდება ერთმანეთზე ხახუნით დიელექტრიკები და არ ელექტროვდება ლითონები?
4. რატომ მიიზიდება დამუხტული სხეულის მიერ დაუმუხტავი ქაღალდის ნაკუწები?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

ერთმანეთისგან მოშორებით მყოფი სამი ერთნაირი გამტარი ბურთულიდან ორის მუხტი 8 ნკ-ია. მესამე ნეიტრალური ბურთულა ჯერ ერთ დამუხტულ ბურთულას შეახეს და შემდეგ კი – მეორეს. განსაზღვრეთ მესამე ბურთულის მუხტი ორივე ბურთულასთან შეხების შემდეგ.

მოცემულია. $q_1 = q_2 = 8 \text{ ნკ}$. $q_3 = 0$. $q'_3 = ?$

ამოხსნა. როგორც ცნობილია, ორი ერთნაირი გამტარი ბურთულის შეხებისას მათი ჯამური მუხტი ორივეზე თანაბრად ნაწილდება. პირველ ბურთულასთან შეხების შემდეგ მესამე ბურთულაზე 4 ნკ მუხტი გადავა. მეორე ბურთულასთან შეხებისას ჯამური 12 ნკ მუხტი ორ ტოლ ნაწილად გაიყოფა და მესამე ბურთულაზე, ისევე როგორც მეორეზე, 6 ნკ მუხტი აღმოჩნდება.

პასუხი: მესამე ბურთულას ორივე ბურთულასთან შეხების შემდეგ 6 ნკ მუხტი ექნება.



ამოხსენით ამოცანები:

1. ორი გამტარი სხეულის მუხტი მათ შეხებამდე 2 ნკ და 4 ნკ-ია. რისი ტოლი იქნება სხეულების ჯამური მუხტი მათი შეხების შემდეგ?
2. ელექტრულად ნეიტრალური ორი არაგამტარი სხეულის ხახუნის შედეგად პირველმა სხეულმა +q მუხტი შეიძინა. რა მუხტი შეიძინა მეორე სხეულმა?
3. ელექტრულად ნეიტრალური სამი არაგამტარი სხეულის ერთმანეთთან ხახუნის შედეგად ორმა მათგანმა -9 ნკ და +4 ნკ მუხტი შეიძინა. რისი ტოლი მუხტი შეიძინა მესამე სხეულმა?
4. რატომაა, რომ დამუხტული ბუშტი დაუმუხტავ ბუშტს იზიდავს, ხოლო დამუხტული ნაწილაკი დაუმუხტავ ნაწილაკთან არ ურთიერთქმედებს?
5. თუ ძაფზე დაკიდებულ ლითონის მასრას უარყოფითად დამუხტულ ებონიტის ჯოხს მივუახლოვებთ მასრა ჯოხისკენ მიიზიდება. ნიშნავს თუ არა ეს, რომ მასრა აუცილებლად დადებითადაა დამუხტული? რატომ?
6. როგორ დამუხტავთ დადებითად დამუხტული მინის ღეროს დახმარებით იზოლირებულ სადგამზე დამაგრებულ ლითონის ნეიტრალურ ბურთულას დადებითად მათი შეხების გარეშე?
7. როგორ დამუხტავთ იზოლირებულ სადგამზე დამაგრებულ ლითონის ნეიტრალურ ბურთულას დადებითად უარყოფითად დამუხტული ებონიტის ჯოხის გამოყენებით?
8. რა ნიშნის მუხტი აქვს ელექტროსკოპს, თუ მის ბურთულასთან დადებითად დამუხტული სხეულის მიახლოების შემდეგ ფურცლების გაშლის კუთხე შემცირდა?
9. რა ნიშნის მუხტი აქვს ელექტროსკოპს, თუ მის ბურთულასთან დადებითად დამუხტული სხეულის მიახლოების შემდეგ ფურცლების გაშლის კუთხე გაიზარდა?
10. გვაქვს ორი დაუმუხტავი ელექტრომეტრი, სპილენძის წვრილი სადენი, შალის ნაჭერი და გაბერილი რეზინის ბუშტი. როგორ დავმუხტოთ ელექტრომეტრები მოდულით ტოლი და ნიშნით საპირისპირო მუხტით?

§6 კულონის კანონი

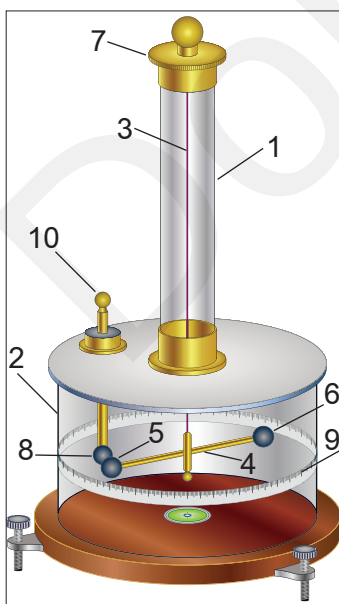
ელექტრულად დამუხტული სხეულები (ნაწილაკები) ერთმანეთთან ურთიერთქმედებენ. როგორ განვსაზღვროთ ძალა, რომლითაც ერთი დამუხტული სხეული მიიზიდავს ან განიზიდავს მეორე დამუხტულ სხეულს?

დამუხტულ სხეულთა ურთიერთქმედება მარტივად აღინერება, როდესაც მათი ზომები საკმაოდ მცირეა სხეულებს შორის მანძილთან შედარებით. ასეთ დამუხტულ სხეულებს **წერტილოვან მუხტებს** უწოდებენ. წერტილოვანი მუხტი ფიზიკური მოდელია, ისეთივე, როგორიც მექანიკაში – ნივთიერი წერტილი, რომლის შემოღებამ საკმაოდ გაამარტივა სხეულთა მოძრაობისა და ურთიერთქმედების აღწერა. ცდების დროს წერტილოვან მუხტებად შეიძლება მივიჩნიოთ მცირე ზომის დამუხტული სხეულები, მაგალითად, პატარა დამუხტული ბურთულები.



შარლ ოგუსტენ კულონი
(1736 – 1806)

ორ უძრავ წერტილოვან მუხტს შორის ურთიერთქმედების კანონი 1785 წელს, ცდების საფუძველზე, ფრანგმა ფიზიკოსმა შარლ ოგუსტენ კულონმა დაადგინა. კულონი სპეციალური ხელსაწყო – გრეხითი სასწორის გამოყენებით ზომავდა ორ დამუხტულ ბურთულას შორის ურთიერთქმედების ძალას. ხელსაწყო შედგება მინის ორი (1) და (2) ცილინდრისაგან (სურ. 38), რომელთა შიგნით თხელ ვერცხლის ძაფზე (3) დაკიდებულია გაუმტარი ღერო (4). მის ერთ ბოლოზე დამაგრებულია გამტარი ბურთულა (5), მეორეზე კი – მისი საპირწონე (6). ძაფის ზევითა ბოლო დამაგრებულია მბრუნავ თავაკზე, რომლის შემობრუნების კუთხე მავთულის დაგრეხვისას იზომება ზედა სკალით (7). სასწორის შიგნით მოთავსებულია უძრავი იზოლირებული ისეთივე ბურთულა (8). ბურთულებს შორის მანძილის გასაზომად იყენებენ დიდი ცილინდრის ზედაპირზე არსებულ სკალას (9). აღსანიშნავია, რომ წინასწარი ცდებით ზუსტად განისაზღვრება მამბრუნებელი მომენტი, რომელიც საჭიროა ძაფის გარკვეული კუთხით დაგრეხისათვის. ღეროს სიგრძის ცოდნით შეიძლება გამოვთვალოთ ბურთულაზე მოდებული ძალა, რომელიც ისეთივე მომენტს იძლევა.



სურ. 38

კულონი მუხტავდა იზოლატორიან სახელურზე დამაგრებულ ბურთულას (სურ. 39), შემდეგ კი მას ადებდა (10) კონტაქტს, რომლის საშუალებით მუხტი ერთმანეთს მიღებულ (5) და (8) ბურთულებზე გადადიოდა. კონტაქტიდან ბურთულის მოშორების შემდეგ (5) და (8) ბურთულებს ერთნაირნიშნის მუხტი რჩებოდათ, ისინი განიზიდავდა ერთმანეთს და გარკვეულ მანძილზე შორდებოდა. ბურთულების დასაახლოებლად თავაკის საშუალებით ძაფი იგრიხებოდა და სკალაზე მოინიშნებოდა მანძილი, რომელზეც მიუახლოვდებოდა ბურთულები ერთმანეთს ძაფის დაგრეხისას. კულონი სწავლობდა, თუ როგორ იყო დამოკიდებული მგრეხავი ძალის მნიშვნელობა ბურთულებს შორის მანძილზე. მიღებული შედეგების ანალიზის საფუძველზე მან დაასკვნა, რომ დამუხტულ ბურთულებს შორის განზიდვის ძალის მოდული უკუპროპორციულია მათ ცენტრებს შორის მანძილის კვადრატისა:



სურ. 39

$$F \sim \frac{1}{r^2}.$$

იგივე შედეგი მიიღებოდა სხვადასხვა ნიშნის მუხტების ურთიერთქმედების დროსაც.

მუხტებს შორის ურთიერთქმედების ძალის მუხტების სიდიდეზე დამოკიდებულების დასადგენად საჭირო იყო მუხტების სხვადასხვა მნიშვნელობის შესაბამისი ძალის გაზომვა. კულონის დროს მუხტის გაზომვა არ იცოდნენ, მაგრამ კულონმა მუხტის ცვლილების საინტერესო ხერხი მოიფიქრა: სიმეტრიის პრინციპიდან გამომდინარე, კულონი მივიდა დასკვნამდე, რომ თუ q მუხტის მქონე ლითონის ბურთულას ზუსტად ისეთივე დაუმუხტავ ბურთულას შევასებთ, მუხტი ორ ტოლ ნაწილად გაიყოფა და თითოეულზე $q/2$ მუხტი აღმოჩნდება. ამ გზით მან საცდელი მუხტის 2-ჯერ, 4-ჯერ და ა. შ. შემცირება შეძლო. მუხტის ყოველი ცვლილებისას ის ძალის შესაბამის მნიშვნელობას ზომავდა. მიღებული შედეგების ანალიზით კულონმა დაადგინა, რომ დამუხტულ ბურთულებს შორის ურთიერთქმედების ძალის მოდული პირდაპირპროპორციულია თითოეული მუხტის მოდულის, ე.ი ელექტრული მუხტების მოდულების ნამრავლისა:

$$F \sim |q_1| \cdot |q_2|.$$

მიღებული შედეგების გაერთიანებით კულონმა ჩამოაყალიბა კანონი –

ორი უძრავი წერტილოვანი მუხტი ვაკუუმში ურთიერთქმედებს ძალებით, რომელთა მოდული პირდაპირპროპორციულია მუხტების მოდულების ნამრავლისა და უკუპროპორციულია მათ შორის მანძილის კვადრატისა:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

რომელშიც k პროპორციულობის კოეფიციენტია.

ეს დებულება **კულონის კანონის** სახელს ატარებს, ხოლო ძალას **კულონურ ძალას** უწოდებენ.

უნდა აღვნიშნოთ, რომ კულონური ძალა დამოკიდებულია იმ გარემოს ელექტრულ თვისებებზეც, რომელშიც მუხტები ურთიერთქმედებს. ამ საკითხს შემდგომში გაეცნობით.

კულონის კანონში მუხტების მოდულები იმიტომაა აღებული, რომ ძალის მოდული არაუარყოფითია, მუხტი კი შეიძლება უარყოფითიც იყოს. ფორმულიდან ჩანს, რომ პროპორციულობის k კოეფიციენტი იზომება $\frac{6 \cdot \text{მ}^2}{\text{კ}^2}$ -ში. SI-ში ექსპერიმენტულად დადგინდა მისი რიცხვითი მნიშვნელობა:

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{6 \cdot \text{მ}^2}{\text{კ}^2}.$$

კულონის კანონიდან მივიღებთ, რომ ერთი მეტრით დაშორებული თითო კულონი მუხტის მქონე სხეულები ურთიერთქმედებს $9 \cdot 10^9$ ნ ძალით. ამიტომ 1 კ ძალიან დიდი მუხტია და მისი მინიჭება პატარა ზომის სხეულებისათვის შეუძლებელია.

ხშირად ელექტრობის განტოლებათა მარტივი სახით ჩასაწერად k კოეფიციენტს გამოსახავენ შემდეგნაირად:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}.$$

ϵ_0 -ს ელექტრულ მუდმივას უწოდებენ. $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ კ}^2/\text{ნ} \cdot \text{მ}^2$.

კულონური ძალა მიმართულია ნერტილოვანი მუხტების შემაერთებელი წრფის გასწვრივ (სურ. 40). როგორც იცით, ასეთ ძალებს ცენტრული ძალები ეწოდება. ე.ი კულონური ძალა ცენტრულია. ნიუტონის მესამე კანონის თანახმად, $\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$.

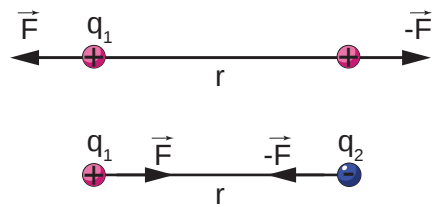
ბურთულების ურთიერთქმედების შემთხვევაში ვიგულისხმებთ, რომ ნერტილოვანი მუხტები ბურთულების ცენტრშია მოთავსებული.

კულონის კანონი ძალიან ჰგავს მსოფლიო მიზიდულობის კანონს – ორი სხეული ურთიერთმიზიდება ძალით, რომელიც პროპორციულია მათი მასების ნამრავლისა და უკუპროპორციულია მათ შორის მანძილის კვადრატისა. ორივე ძალა – გრავიტაციული და კულონური – ცენტრულია და ნერტილოვანი სხეულებისათვის ორივე კანონი სრულდება.

თუ ერთდროულად ურთიერთქმედებს სამი ან მეტი მუხტი, რომელიმე მუხტზე მოქმედი ტოლქმედი ძალის საპოვნელად ჯერ პოულობენ მასზე სხვა მუხტების მხრიდან მოქმედ ძალებს, შემდეგ კი – ამ ძალთა ტოლქმედს:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_{n-1},$$

რომელშიც n ურთიერთქმედი მუხტების რაოდენობაა.



სურ. 40

დაკვნები:

- დამუხტულ სხეულებს, რომელთა შორის მანძილი ბევრად აღემატება მათ ზომებს, ნერტილოვან მუხტებს უწოდებენ;
- ორი უძრავი ნერტილოვანი მუხტი ვაკუუმში ურთიერთქმედებს ძალებით, რომელთა მოდული პირდაპირპროპორციულია მუხტების მოდულების ნამრავლისა და უკუპროპორციულია მათ შორის მანძილის კვადრატისა: $F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$;
- SI-ში პროპორციულობის k კოეფიციენტი ტოლია: $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{ნ} \cdot \text{მ}^2}{\text{კ}^2}$;
- $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, ϵ_0 -ს ელექტრულ მუდმივას უწოდებენ. $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ კ}^2/\text{ნ} \cdot \text{მ}^2$;
- კულონური ძალა ცენტრულია.

საკონტროლო კითხვები:

1. რაში მდგომარეობს გრეხითი სასწორის მოქმედების პრინციპი?
2. როგორ არის დამოკიდებული მუხტებს შორის ურთიერთქმედების ძალა მათ შორის მანძილზე? თითოეული მუხტის მოდულზე?
3. რა ხერხი მოიფიქრა კულონმა ბურთულის მუხტის 2-ჯერ, 4-ჯერ და ა.შ შესამცირებლად?
4. საიდან ჩანს, რომ 1 კულონი ძალიან დიდი მუხტია?
5. რა მსგავსებებია კულონის კანონსა და მსოფლიო მიზიდულობის კანონს შორის?
6. როგორ განვსაზღვროთ რომელიმე მუხტზე მოქმედი კულონური ძალა სამი ან მეტი მუხტის ერთმანეთთან ურთიერთქმედებისას?

საკითხის უკეთ გასააზრებლად შეგიძლიათ იხილოთ ბმულები: <https://is.gd/z01K4g>
<https://phet.colorado.edu/en/simulations/coulombs-law>



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

განსაზღვრეთ წყალბადის ატომში ელექტრონის ბრუნვის წირითი სიჩქარე, თუ მისი მასა $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ კგ-ს, ხოლო ელექტრონის ორბიტის რადიუსია $R = 1,2 \cdot 10^{-10}$ მ (სურ. 41). გრავიტაციულ ურთიერთქმედებას სიმცირის გამო ნუ გაითვალისწინებთ.

მოცემულია: $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ კგ; $R = 1,2 \cdot 10^{-10}$ მ; $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ კ. $v = ?$

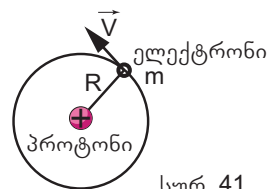
ამოხსნა. როგორც ცნობილია, წყალბადის ატომის ბირთვში

ერთი პროტონია. პროტონისა და ელექტრონის მუხტები მოდულებით ტოლია და ნიშნით განსხვავდება ერთმანეთისგან. პროტონის მხრიდან ელექტრონზე მოქმედი კულონური მიზიდვის ძალა ელექტრონს ცენტრისკენულ აჩქარებას ანიჭებს. ნიუტონის

მეორე კანონის თანახმად $\vec{F}_j = m \cdot \vec{a}_j$. ვინაიდან $F_j = k \cdot \frac{e^2}{R^2}$ და $a_j = \frac{v^2}{R}$, მივიღებთ:

$$k \cdot \frac{e^2}{R^2} = m \cdot \frac{v^2}{R}. \text{ საიდანაც } v = \sqrt{k \frac{e^2}{mR}} = |e| \sqrt{\frac{k}{mR}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \sqrt{\frac{9 \cdot 10^9}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,2 \cdot 10^{-10}}} \approx 1,45 \cdot 10^6 \text{ მ/წმ.}$$

პასუხი: ელექტრონის ბრუნვის წირითი სიჩქარე წყალბადის ატომში $1,45 \cdot 10^6$ მ/წმ-ია.



სურ. 41



ამოხსენით ამოცანები

1. რა ძალით განიზიდავს ერთმანეთს ორი დამუხტული ნაწილაკი ვაკუუმში*, თუ თითოეულის მუხტი -2 ნკ-ის ტოლია, ხოლო მანძილი მათ შორის 1 მ-ია?

2. რამდენჯერ შეიცვლება დამუხტულ ნაწილაკებს შორის კულონური ძალა, თუ თითოეულის მუხტს და მათ შორის მანძილს 5 -ჯერ გავზრდით?

3. რამდენჯერ შეიცვლება დამუხტულ ნაწილაკებს შორის კულონური ძალა, თუ თითოეულის მუხტს 3 -ჯერ, ხოლო მათ შორის მანძილს 9 -ჯერ გავზრდით?

4. რამდენი ჭარბი ელექტრონია მცირე ზომის უარყოფითად დამუხტულ ბურთულაზე, თუ მას 2 მ-ით დაშორებული 4 ნკ მუხტის მქონე მეორე მცირე ზომის ბურთულა $144 \cdot 10^{-9}$ ნ ძალით იზიდავს?

5. როგორ შეიცვლება $+5q$ და $-3q$ მუხტის მქონე ორ ერთნაირ ლითონის ბურთულას შორის ურთიერთქმედების კულონური ძალა, თუ მათ ერთმანეთს შევახებთ და იმავე მანძილით დავაშორებთ? დამუხტული ბურთულები წერტილოვნად მიიჩნეთ.

6. რა ძალა იმოქმედებს 3 ნკ მუხტის მქონე ნაწილაკზე, რომელიც მოთავსებულია 40 სმ-ით დაშორებული წერტილოვანი 8 ნკ და -4 ნკ მუხტების შემაერთებელი მონაკვეთის შუა წერტილში?

7. დაფზე ჩამოკიდებულ 100 გ მასისა და 2 მკკ მუხტის მქონე მცირე ზომის ბურთულას ქვევიდან 1 მ მანძილზე მიუახლოეს 5 მკკ მუხტის მქონე ნაწილაკი. განსაზღვრეთ დაფის დაჭიმულობის ძალა.

8. 3 ნკ და 27 ნკ წერტილოვან მუხტებს შორის მანძილი 8 მ-ია. მუხტებზე გავლებული წრფის რომელ წერტილში უნდა მოვათავსოთ მესამე 1 ნკ მუხტის ნაწილაკი, რომ ის განონასწორებული იყოს?

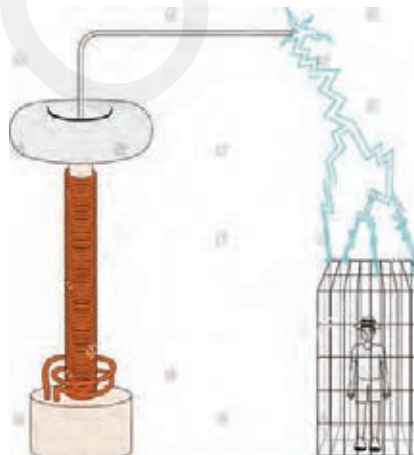
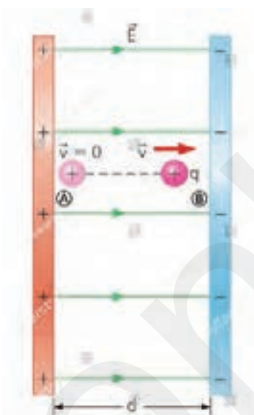
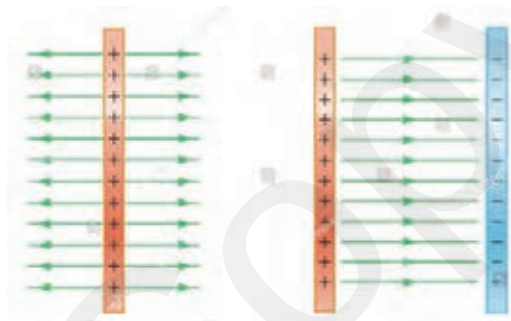
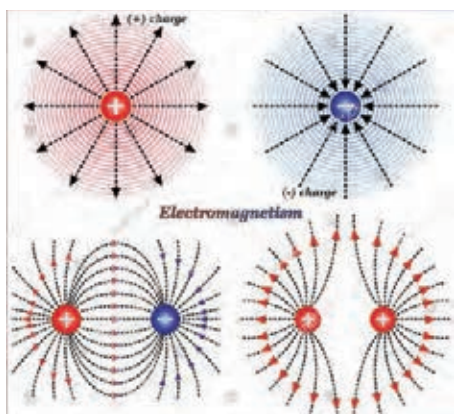
9. -4 ნკ და 16 ნკ წერტილოვან მუხტებს შორის მანძილი 4 მ-ია. მათზე გამავალი წრფის რომელ წერტილში უნდა მოვათავსოთ 1 ნკ მუხტის მქონე ნაწილაკი, რომ ის განონასწორებული იყოს?

10. ტოლფერდა მართკუთხა სამკუთხედის სამივე წვეროში მოთავსებულია 1 მკკ წერტილოვანი მუხტები. განსაზღვრეთ მართი კუთხის წვეროში მოთავსებულ მუხტზე მოქმედი ძალა, თუ სამკუთხედის ფერდის სიგრძე 50 სმ-ია.

*ყველა ამოცანაში მიიჩნეთ, რომ მუხტები ვაკუუმშია მოთავსებული. ამასთან, მათ შორის გრავიტაციული მიზიდულობის ძალა უგულებელყავით.

თავი II

ელექტრული ველი



ამ თავში თქვენ გაეცნობით:

- ელექტრულ ველს;
- ელექტრული ველის გამოსახვის ხერხს;
- ელექტრული ველის სუპერპოზიციის პრინციპს;
- ელექტრული ველს სხვადასხვა გარემოში;
- ელექტროსტატიკურ დაცვას.

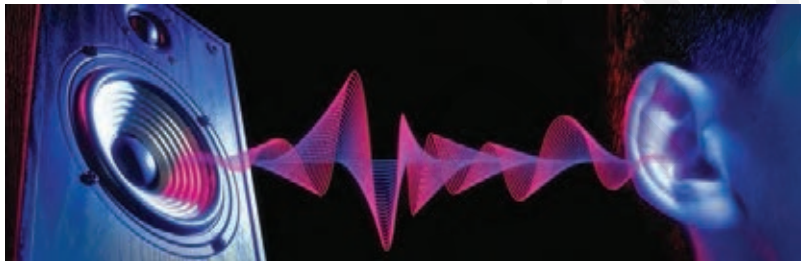
§ 7 ელექტრული ველი. ელექტრული ველის დაძაბულობა. ნერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობა. ელექტრული ველის სუპერპოზიციის პრინციპი

როგორ ხორციელდება ორ დამუხტულ სხეულს შორის ურთიერთქმედება მაშინაც კი, როდესაც მათ შორის ნივთიერი გარემო არ არის? ხომ არ არის მსგავსება ელექტრულ და გრავიტაციულ ურთიერთქმედებებს შორის?

როდესაც გარკვეული მანძილით დაშორებული ორი სხეულის ურთიერთქმედებას ვაკვირდებით, როგორც წესი, ვეძებთ იმ სხეულს (ნივთიერებას), რომლის მეშვეობითაც ეს ურთიერთქმედება ხორციელდება. ის შეიძლება იყოს თოკი, ღვედი, გვარლი, ჰაერი, წყალი და ა.შ. მაგალითად, ბავშვის ქმედება სათამაშო ავტომობილს თოკის მეშვეობით გადაეცემა (სურ 42), ბგერა ჩვენ ყურამდე ჰაერში გავრცელებული ტალღის საშუალებით აღწევს (სურ 43) და სხვა.



სურ. 42



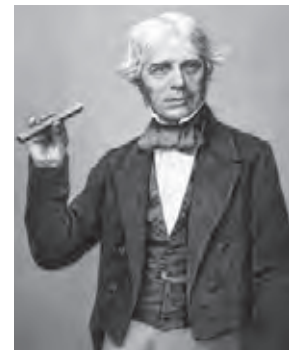
სურ. 43

ასეთი კავშირების არსებობისას ჩვენ მარტივად ვხსნით ერთი სხეულიდან მეორეზე ქმედების გადაცემას შუალედური რგოლების მეშვეობით. ამასთან, ერთი სხეულიდან მეორეზე ქმედების გადასაცემად დროის გარკვეული შუალედი საჭირო.

ვარაუდი იმის შესახებ, რომ ერთმანეთს დაშორებული ორი სხეულის ურთიერთქმედება ყოველთვის ხორციელდება შუალედური რგოლების მეშვეობით წარმოადგენს **ახლოქმედების თეორიის** არსს.

გრავიტაციული, ელექტრული და მაგნიტური ძალების წარმოქმნის ასახსნელად ბევრმა მეცნიერმა შემოიტანა უხილავი გარემო, რითაც გარშემორტყმულნი იყვნენ პლანეტები, დამუხტული სხეულები, მაგნიტები და ა. შ. ზოგჯერ ეს მოსაზრებები საკმაოდ საინტერესო და გონებამახვილური იყო, მაგრამ ამ იდეებმა შემდგომი განვითარება ვერ პოვა. ასე გაგრძელდა მსოფლიო მიზიდულობის კანონის აღმოჩენამდე. ამ კანონით საკმაოდ კარგად აღინერებოდა ციური სხეულების მოძრაობა და ამიტომ მიიჩნიეს, რომ შუალედური რგოლის ძებნა მიზანშეწონილი არ იყო. ამ დროიდან ჩამოყალიბება დაიწყო **მანძილზე ქმედების** თეორიამ, რომლის მიხედვით ნებისმიერ დიდ მანძილზე ქმედება მყისიერად გადაეცემა და სხეულები ერთმანეთს „გრძნობენ“ ყოველგვარი შუალედური რგოლების გარეშე. ამ თეორიის მომხრე იყო თვით კულონიც.

მკვეთრი გარდატეხა ქმედების გადაცემის ხედვაში დიდმა ინგლისელმა ფიზიკოსმა მაიკლ ფარადეიმ შეიტანა, ხოლო საბოლოო თეორიის სახე შოტლანდიელმა ფიზიკოსმა ჯეიმზ კლარკ მაქსველმა მისცა.

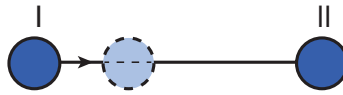


მაიკლ ფარადეი
(1791– 1867)



ჯეიმზ კლარკ მაქსველი
(1831– 1879)

მანძილზე ქმედების თეორიით, ერთ-ერთი დამუხტული სხეულის (მაგალითად, I სხეულის) გადაადგილებისას (სურ. 44) II დამუხტულ სხეულზე მოქმედი ძალა მყისიერად იცვლის მნიშვნელობას და მისი გარემომცველი სივრცე არ იცვლება.



სურ. 44

ფარადეის მოსაზრებით კი დამუხტული სხეულები ერთმანეთზე უშუალოდ არ მოქმედებს. თითოეული მათგანი თავის გარშემო ქმნის **მატერიის განსაკუთრებულ ფორმას**, რომელსაც მან **ელექტრული ველი** უწოდა. პირველი დამუხტული სხეულის შექმნილი ელექტრული ველი მოქმედებს მეორე დამუხტულ სხეულზე და პირიქით – მეორე დამუხტული სხეულის შექმნილი ელექტრული ველი – პირველზე. ფარადეის მოსაზრებებზე დაყრდნობით, მაქსველმა თეორიულად დაასაბუთა, რომ ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება სივრცეში სასრული სიჩქარით ვრცელდება. ეს ნიშნავს, რომ I სხეულის გადაადგილებისას II სხეულზე მოქმედი ძალა მყისიერად კი არა, გარკვეული დროის შემდეგ შეიცვლება. თუ სხეულებს შორის მანძილი l -ით აღვნიშნავთ, მაშინ ეს დრო ტოლი იქნება:

$$t = \frac{l}{c},$$

რომელშიც c ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების გავრცელების სიჩქარეა. მაქსველმა დაამტკიცა, რომ ის ვაკუუმში სინათლის გავრცელების სიჩქარის ტოლია: $c \approx 300000$ კმ/წმ.

ელექტრული ველის ძირითადი თვისება დამუხტულ სხეულებზე გარკვეული ძალით მოქმედებაა. სწორედ ამ მოქმედებით ადგენენ ველის არსებობას, მის განაწილებას სივრცეში, შეისწავლიან მის მახასიათებლებს.

უძრავი მუხტის შექმნილ ველს **ელექტროსტატიკურს** უწოდებენ. ასეთი ველი დროის განმავლობაში უცვლელია, ანუ ელექტროსტატიკური ველის მოცემულ წერტილში შეტანილ სასინჯ მუხტზე მოქმედი ძალაც არ იცვლება.

რა ფიზიკური სიდიდით შეიძლება დავახასიათოთ ელექტრული ველი? ცხადია, ელექტრული ველის მახასიათებლად უნდა შევარჩიოთ ისეთი ფიზიკური სიდიდე, რომელიც სასინჯი მუხტის რიცხვით მნიშვნელობაზე დამოკიდებული არ იქნება. ამასთან, მან საშუალება უნდა მოგვცეს განვსაზღვროთ ელექტრული ველის ნებისმიერ წერტილში მოთავსებულ მუხტზე მოქმედი ძალა, ანუ დასადგენია ელექტრული ველის ძალური მახასიათებელი.

გავიხსენოთ, რომ დედამიწის გრავიტაციული ველის ასეთი მახასიათებელი თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაა, რომელიც არ არის დამოკიდებული სხეულის მასაზე და მისი ცოდნით შეგვიძლია განვსაზღვროთ დედამიწის ზედაპირის მახლობლად მოთავსებულ ნებისმიერ m მასის სხეულზე მოქმედი სიმძიმის ძალა: $\vec{F}_{სიმ} = m\vec{g}$ ($m \ll M$, M – დედამიწის მასაა). ანალოგიურად მოვიქცეთ ელექტრული ველისთვისაც.

ვთქვათ, ვაკუუმში ელექტრული ველი შექმნილია წერტილოვანი q მუხტის მიერ. თუ ამ მუხტიდან r მანძილზე სასინჯ q_0 მუხტს მოვათავსებთ, მასზე იმოქმედებს კულონური ძალა, რომლის მოდული ტოლია:

$$F = k \frac{|q| \cdot |q_0|}{r^2} \quad (1)$$

$\vec{F}$ ძალა არ გამოდგება q მუხტის მიერ შექმნილი ელექტრული ველის მახასიათებლად, რადგან მისი მოდული სასინჯი q_0 მუხტის მოდულის პროპორციულია. მაგრამ ამ ძალის მოდულის ფარდობა $|q_0|$ -თან სასინჯ მუხტზე დამოკიდებული აღარ იქნება:

$$\frac{F}{|q_0|} = k \frac{|q|}{r^2} \quad (2)$$

ამიტომ ის შეიძლება გამოვიყენოთ ელექტრული ველის მახასიათებლად. ამ შეფარდებას ელექტრული ველის დაძაბულობა ეწოდება. ელექტრული ველის დაძაბულობა ვექტორული სიდიდეა, მის მიმართულებად მიჩნეულია ველში შეტანილ დადებით სასინჯ მუხტზე მოქმედი ძალის მიმართულება. ელექტრული ველის დაძაბულობას $\vec{E}$ -თი აღნიშნავენ.

ელექტრული ველის დაძაბულობა მოცემულ წერტილში ტოლია ამ წერტილში მოთავსებულ სასინჯ მუხტზე მოქმედი ძალის შეფარდებისა ამ მუხტთან:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (3)$$

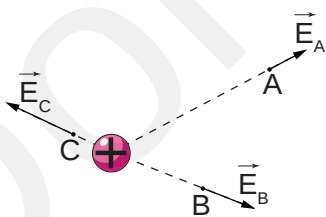
SI-ში ელექტრული ველის დაძაბულობა იზომება ნ/კ-ში.

თუ ვიცით ელექტრული ველის დაძაბულობა მოცემულ წერტილში, მაშინ ვიპოვიოთ ამ წერტილში მოთავსებულ მუხტზე მოქმედ ძალას: $\vec{F} = q_0 \cdot \vec{E}$. სწორედ ამიტომ ელექტრული ველის დაძაბულობას ველის ძალურ მახასიათებელს წარმოადგენს.

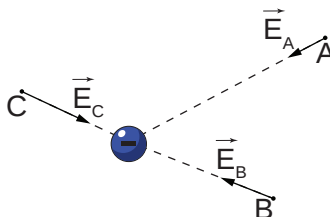
(1) და (3) ფორმულებიდან გამომდინარეობს, რომ **წერტილოვანი q მუხტის მიერ შექმნილი ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული მუხტიდან r მანძილზე ტოლია:**

$$E = k \frac{|q|}{r^2} \quad (4)$$

თუ წერტილოვანი q მუხტი დადებითია, მაშინ ელექტრული ველის დაძაბულობა მის ნებისმიერ წერტილში მიმართულია მუხტისა და ამ წერტილის შემაერთებელი წრფის გასწვრივ მუხტიდან (სურ. 45 ა), ხოლო, თუ q მუხტი უარყოფითია – მუხტისკენ (სურ. 45 ბ).



სურ. 45 ა



სურ. 45 ბ

უძრავი წერტილოვანი მუხტის ელექტრული ველი ელექტროსტატიკურია, ანუ მოცემულ წერტილში $\vec{E}$ არ იცვლება.

დავუშვათ, მოცემულ წერტილში სხვადასხვა დამუხტული ნაწილაკები ქმნის ელექტროსტატიკურ ველებს, რომელთა დაძაბულობებია: $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots, \vec{E}_n$. ამ წერტილში მოთავსებულ სასინჯ q_0 მუხტზე მოქმედი ჯამური ძალა ტოლი იქნება ცალკეული ველის მხრიდან მოქმედი ძალების ჯამისა:

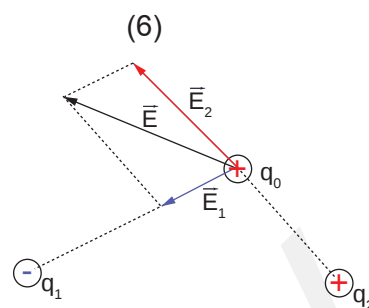
$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n, \quad (5)$$

მაგრამ $\vec{F}_1 = q_0 \cdot \vec{E}_1$, $\vec{F}_2 = q_0 \cdot \vec{E}_2$, $\vec{F}_3 = q_0 \cdot \vec{E}_3$, ... $\vec{F}_n = q_0 \cdot \vec{E}_n$. ასევე $\vec{F} = q_0 \cdot \vec{E}$, რომელშიც $\vec{E}$ ელექტრული ველის ჯამური დაძაბულობაა. ამ ფორმულების (5)-ში შეტანით და q_0 -ზე გაყოფით მივიღებთ:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n.$$

ეს ტოლობა გამოსახავს ელექტრული ველების სუპერპოზიციის პრინციპს: ელექტროსტატიკური ველის მოცემულ წერტილში ჯამური დაძაბულობა ცალკეული მუხტის მიერ შექმნილი ველის დაძაბულობათა ჯამის ტოლია.

სურ. 46-ზე ნაჩვენებია სუპერპოზიციის პრინციპის გამოყენება იმ შემთხვევისათვის, როდესაც ელექტრულ ველს ორი წერტილოვანი მუხტი ქმნის.



სურ. 46

დაკვნები:

- დამუხტული სხეული გარემომცველ სივრცეში ქმნის ელექტრულ ველს;
- ელექტრული ველი მატერიის განსაკუთრებული ფორმაა;
- უძრავი მუხტის მიერ შექმნილ ელექტრულ ველს ელექტროსტატიკური ველი ეწოდება;
- ელექტრული ველის ძალური მახასიათებელი სიდიდეა ელექტრული ველის დაძაბულობა;
- ელექტრული ველის დაძაბულობა მოცემულ წერტილში ტოლია ამ წერტილში მოთავსებულ სასინჯ მუხტზე მოქმედი ძალის შეფარდებისა ამ მუხტთან: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$;
- SI-ში ელექტრული ველის დაძაბულობა იზომება ნ/კ-ში;
- წერტილოვანი q მუხტის მიერ შექმნილი ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული მუხტიდან r მანძილზე ტოლია: $E = k \frac{|q|}{r^2}$;
- წერტილოვანი დადებითი q მუხტის მიერ შექმნილი ელექტრული ველის დაძაბულობა მის ნებისმიერ წერტილში მიმართულია მუხტისა და ამ წერტილის შემაერთებელი წრფის გასწვრივ მუხტიდან, უარყოფითი მუხტისა კი – მუხტისკენ;
- ელექტროსტატიკური ველის მოცემულ წერტილში ჯამური დაძაბულობა ცალკეული მუხტის მიერ შექმნილი ველის დაძაბულობათა ჯამის ტოლია: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა არის ელექტრული ველის ძირითადი თვისება?
2. რატომ უწოდებენ ველს მატერიის განსაკუთრებულ ფორმას?
3. რატომ არის ელექტრული ველის დაძაბულობა მისი ძალური მახასიათებელი?
4. საით არის მიმართული ელექტრულ ველში შეტანილ დადებით მუხტზე მოქმედი ძალა? უარყოფით მუხტზე მოქმედი ძალა?

საკითხის უკეთ გასააზრებლად შეგიძლიათ იხილოთ ბმულები: <https://is.gd/mKjLG4>
<https://phet.colorado.edu/en/simulations/charges-and-fields>



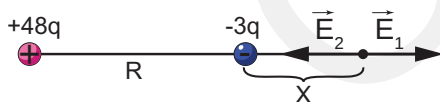
ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

48q და -3q წერტილოვან მუხტებს შორის მანძილი $R = 90$ სმ-ია. პირველი მუხტიდან რა მანძილზე იქნება წერტილი, რომელშიც ელექტრული ველის დაძაბულობა ნულის ტოლია?

მოცემულია $q_1 = 48q$; $q_2 = -3q$; $R = 90$ სმ. $x = ?$

ამოხსნა. სუპერპოზიციის პრინციპის თანახმად, ელექტრული ველის ჯამური დაძაბულობა ორივე მუხტის შექმნილი დაძაბულობათა ვექტორული ჯამის ტოლია. საძიებელ წერტილში ეს ჯამი ნულის ტოლი უნდა იყოს. მათემატიკის კურსიდან იცით, რომ ორი ვექტორის ჯამი მხოლოდ იმ შემთხვევაშია ნულის ტოლი, თუ ეს ვექტორები მოპირდაპირეა, ანუ მოდულით ტოლი და მიმართულებით ურთიერთსაპირისპიროა. აქედან გამომდინარე, საძიებო წერტილი აუცილებლად მუხტების შემაერთებელ წრფეზე იქნება მოთავსებული.

ახლა გავარკვიოთ ეს წერტილი მუხტებს შორის იქნება თუ მათ გარეთ. როგორც იცით, წერტილოვანი დადებითი მუხტის მიერ შექმნილი ელექტრული ველის დაძაბულობა მიმართულია მუხტიდან, უარყოფითისა კი – მუხტისკენ. მუხტებს შორის ნებისმიერ წერტილში დაძაბულობის ორივე ვექტორს ერთი და იგივე მიმართულება ექნება, მათი ჯამი კი შეუძლებელია ნულის ტოლი იყოს. მაშასადამე, წერტილი, რომელშიც ველის ჯამური დაძაბულობა ნულის ტოლია, მოთავსებულია მუხტებს გარეთ, მოდულით პატარა მუხტთან უფრო ახლოს (სურ. 47).



სურ. 47

ვინაიდან $E_1 = E_2$, გვექნება: $k \frac{|48q|}{(R+x)^2} = k \frac{|-3q|}{x^2}$, აქედან მარტივი გარდაქმნებით მივიღებთ: $\frac{4}{R+x} = \frac{1}{x}$, საიდანაც $x = 30$ სმ. ანუ, პირველი მუხტიდან 120 სმ-ზე.

პასუხი: წერტილი, რომელშიც ველის დაძაბულობა ნულის ტოლია, მოთავსებულია მუხტებზე გამავალ წრფეზე, პირველი მუხტიდან 120 სმ-ზე მცირე მუხტის მხარეს.



ამოხსენით ამოცანები

1. რისი ტოლია ელექტრული ველის დაძაბულობა იმ წერტილში, რომელშიც მოთავსებულ 10 მკკ მუხტზე მოქმედი ძალის მოდული $25 \cdot 10^{-4}$ ნ-ია?
2. რა ძალა მოქმედებს $12 \cdot 10^{-10}$ კ მუხტის ნაწილაკზე 350 ნ/კ დაძაბულობის ელექტრულ ველში?
3. განსაზღვრეთ ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული და მიმართულება წერტილში, რომელშიც მოთავსებული 50 მგ მასისა და 10 ნკ მუხტის მქონე ნაწილაკი განონასწორებულია. ნაწილაკზე მოქმედ ამომგდებ ძალას ნუ გაითვალისწინებთ. $g=10$ მ/წმ².
4. რამდენი ზედმეტი ელექტრონია 120 მგ მასის წვეთზე, თუ ის განონასწორებულია ვერტიკალის გასწვრივ მიმართულ 3000 ნ/კ დაძაბულობის ელექტრულ ველში?
5. რისი ტოლია -16 ნკ უძრავი წერტილოვანი მუხტის მიერ ვაკუუმში შექმნილი ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული მუხტიდან $0,3$ მ მანძილზე?

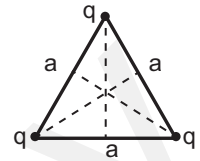
6. წერტილოვანი მუხტების შემაერთებელი მონაკვეთის წერტილებში დაძაბულობის მოდული რა შემთხვევაში იქნება მეტი, როცა ეს მუხტები ერთნაირნიშნაანია, თუ სხვადასხვანიშნაანია?

7. 8 მკკ და -2 მკკ წერტილოვან მუხტებს შორის მანძილი 3 მ-ია . განსაზღვრეთ ელექტრული ველის დაძაბულობა მათი შემაერთებელი მონაკვეთის შუა წერტილში.

8. $+18q$ და $-2q$ წერტილოვან მუხტებს შორის მანძილი 2 მ-ია . მუხტებზე გავლებული წრფის რომელ წერტილში იქნება მათ მიერ შექმნილი ელექტრული ველის ჯამური დაძაბულობა ნულის ტოლი?

9. a გვერდის მქონე ტოლგვერდა სამკუთხედის წვეროებში მოთავსებულია ერთნაირი q მუხტი. განსაზღვრეთ ელექტრული ველის ჯამური დაძაბულობის მოდული ერთ-ერთი გვერდის შუა წერტილში.

10. a გვერდის მქონე ტოლგვერდა სამკუთხედის წვეროებში მოთავსებულია ერთნაირი q მუხტი (სურ. 48). განსაზღვრეთ ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული მისი მედიანების გადაკვეთის წერტილში.



სურ. 48

§ 8 ელექტრული ველის დაძაბულობის წირები

როგორც წინა პარაგრაფში აღვნიშნეთ, ელექტრული ველი მატერიის განსაკუთრებული ფორმაა. მატერიის ნივთიერი ფორმისაგან განსხვავებით, ელექტრულ ველს ვერ შევიგრძნობთ, მაგრამ ის რეალურად არსებობს.

შეიძლება თუ არა ელექტრული ველი „ხილული“ გავხადოთ?

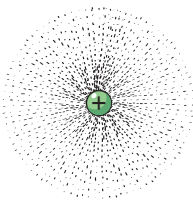
ელექტროსტატიკური ველის აღწერისათვის უნდა ვიცოდეთ დაძაბულობის მოდული და მიმართულება მის ყოველ წერტილში. ამიტომ საჭიროა ველის გარკვეული ფორმით თვალსაჩინოდ წარმოდგენა. თავის დროზე ამის გაკეთება არც ისე იოლი იყო, მაგრამ 1845 წელს ფარადეიმ წამოაყენა იდეა, გამოესახათ ელექტრული ველი წარმოსახვითი წირებით. მათ ელექტრული ველის **დაძაბულობის წირები** ან **ძალწირები** დაარქვეს. რა წირებია ეს?

როგორც ვიცით, სუფთა მშრალი თმა ან ბენვი ადვილად ელექტროვდება.

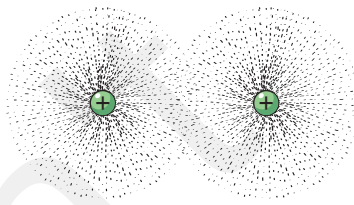


ჩავატაროთ ცდა. წვრილად დაჭრილი თმა ან ბენვი თანაბრად გადავანაწილოთ მინის ნაჭერზე და შემდეგ დამუხტული ბურთულის თავზე მოვათავსოთ. თმა გადანაწილდება და განლაგდება ისე, როგორც სურ. 49-ზეა გამოსახული.

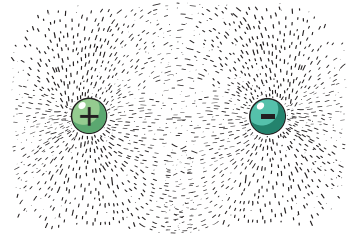
თუ ცდას გავიმეორებთ და მინას ერთნაირი ნიშნით დამუხტული ბურთულების თავზე მოვათავსებთ, თმის ნაჭრები გადანაწილდება ისე, როგორც სურ. 50 ა-ზეა ნაჩვენები, სხვადასხვა ნიშნის ბურთულების შემთხვევაში კი – ისე, როგორც სურ. 50 ბ-ზე.



სურ. 49



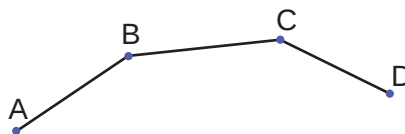
სურ. 50 ა



სურ. 50 ბ

სამივე შემთხვევაში თმის (ბენვის) ნაწილები გარკვეული წირების გასწვრივ განლაგდება. რა წირებზე განლაგდა ისინი?

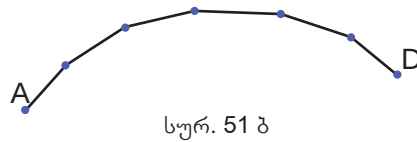
ვთქვათ, **A** ელექტრული ველის რაიმე წერტილია (სურ. 51 ა). გავალოთ ამ წერტილიდან მოკლე **AB** მონაკვეთი ისე, რომ ელექტრული ველის დაძაბულობის ვექტორი **A** წერტილში მიმართული იყოს მის გასწვრივ. შემდეგ, იმავე წესით, **B** წერტილიდან გავალოთ **BC** მონაკვეთი და ა.შ. მივიღებთ ტეხილს, რომელიც მიუთითებს ელექტრული ველის დაძაბულობის მიმართულებებს **A, B, C, ...** წერტილებში.



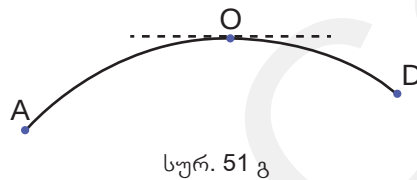
სურ. 51 ა

ამგვარად აგებული ტეხილი ზუსტად არ განსაზღვრავს ველის მიმართულებას ყველა წერტილში. მართლაც, **AB** მონაკვეთი ველის მიმართულებას მხოლოდ **A** წერტილში

განსაზღვრავს, მაგრამ ამ მონაკვეთის რაიმე სხვა წერტილში ველს შეიძლება განსხვავებული მიმართულება ჰქონდეს. ასეთი აგება უფრო ზუსტი იქნება, თუ არჩეულ წერტილებს დავახლოებთ და გავზრდით მონაკვეთების რაოდენობას (სურ. 51 ბ).

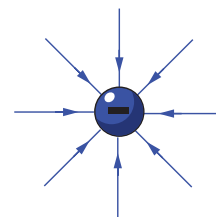
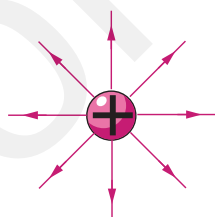


ველის მიმართულება კიდევ უფრო მეტად დაზუსტდება, თუ ტეხილის წვეროების დაახლოებას უსასრულოდ გავაგრძელებთ. ამ დროს ტეხილი გადავა რაღაც AD მრუდში, რომლის ნებისმიერ წერტილში ელექტრული ველის დაძაბულობის ვექტორი მიმართული იქნება ამ წერტილში გავლებული მხეხის გასწვრივ (სურ. 51 გ). შეთანხმდნენ, მხეხის ორი საპირისპირო მიმართულებიდან აირჩიონ ის, საითკენაც მიმართული იქნება დადებითი სასინჯ მუხტზე მოქმედი ძალა. ამ მიმართულებას ძალწირზე ისრით მიუთითებენ.



ამრიგად, **ელექტრული ველის დაძაბულობის წირები ისეთი წარმოსახვითი წირებია, რომელთა ნებისმიერ წერტილში ელექტრული ველის დაძაბულობის ვექტორი ამ წერტილში გავლებული მხეხის გასწვრივაა მიმართული.**

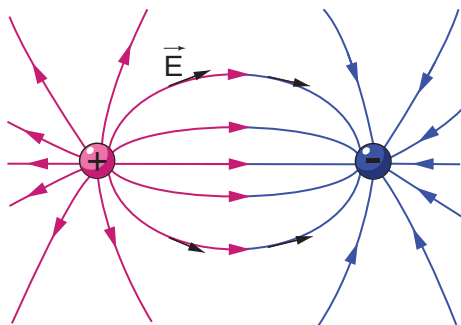
ელექტრული ველის დაძაბულობის წირები ერთმანეთს არ კვეთს. წინააღმდეგ შემთხვევაში, ელექტრული ველის დაძაბულობას გადაკვეთის წერტილში ორი მიმართულება ექნებოდა, რაც შეუძლებელია.



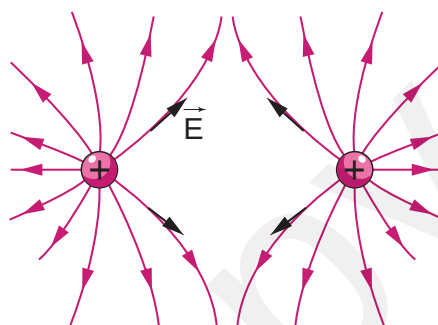
განმხილავებული (სხვა დამუხტული სხეულებისაგან საკმაოდ შორს მყოფი) დადებითი წერტილოვანი მუხტის მიერ შექმნილი ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობის წირები მიმართულია რადიალურად, მუხტიდან უსასრულობაში (სურ. 52). ამიტომ **დადებითი მუხტი წარმოადგენს დაძაბულობის წირების წყაროს.**

განმხილავებული უარყოფითი წერტილოვანი მუხტის მიერ შექმნილი ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობის წირები კი მიმართულია რადიალურად, უსასრულობიდან მუხტისაკენ (სურ. 53).

სივრცის სხვადასხვა წერტილში $\vec{E}$ ვექტორის მიმართულების განსაზღვრით შე-
საძლებელია ელექტრული ველის სხვადასხვა წყაროს დაძაბულობის წირების სურა-
თების აგება. გარკვეული მანძილით დაშორებული ორი სხვადასხვანაირი მუხტის
მიერ შექმნილი ველის ძალწირები გამოსახულია სურ. 54-ზე, ერთნაირიშნიანებისა
კი – სურ. 55-ზე.



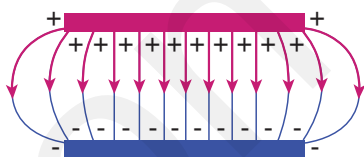
სურ. 54



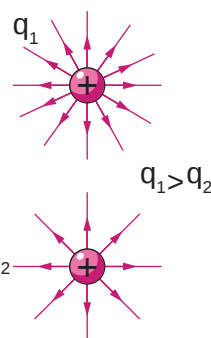
სურ. 55

ელექტრულ ველს, რომლის ნებისმიერ წერტილში დაძაბულობა ერთნაირია, ერთგვაროვანი ელექტრული ველი ეწოდება.

დიდი სიზუსტით, ერთგვაროვნად შეიძლება მივიჩნიოთ ელექტრული ველი, რომე-
ლიც შექმნილია საპირისპირო ნიშნით დამუხტულ ლითონის ორ ბრტყელ, პარალელურ
ფირფიტას შორის, როდესაც ფირფიტები მათ ზომებთან შედარებით ბევრად მცირე
მანძილითაა დაშორებული. **ერთგვაროვანი ელექტრული ველის ყოველ წერტილში
დაძაბულობას ერთნაირი მოდული და მიმართულება აქვს**, ხოლო ძალწირები ერთ-
მანეთის პარალელური და თანაბარი სიხშირისაა (სურ. 56).



სურ. 56



სურ. 57

იმისათვის, რომ დაძაბულობის წირებმა აჩვენოს არა მარტო მიმართულება, არა-
მედ ელექტრული დაძაბულობის მოდულიც, შეთანხმდნენ, სურათებზე ისინი გაავ-
ლონ გარკვეული სიხშირით – **რაც უფრო მეტია დაძაბულობის მოდული, მით მეტია
ძალწირების სიხშირე**. წერტილოვანი მუხტის შემთხვევაში, რაც უფრო ვშორდებით
მუხტს, ველის დაძაბულობის მოდული და, შესაბამისად, ძალწირების სიხშირეც იე-
ლებს. დაძაბულობის წირების სურათს ისე აგებენ, რომ ის მაქსიმალურად ზუსტად
აღწერს ელექტროსტატიკური ველის სიმეტრიას. ასევე, იმ დაძაბულობის წირების
რიცხვი, რომელთა დასაწყისი ან ბოლო მოცემული მუხტია, ამ მუხტის მოდულის პრო-
პორციულია (სურ. 57).

დაკვნები:

- ელექტრული ველის დაძაბულობის წირები ისეთი წარმოსახვითი წირებია, რომელთა ნებისმიერ წერტილში გავლებული მხების მიმართულება ამავე წერტილში ელექტრული ველის დაძაბულობის ვექტორის მიმართულებას ემთხვევა;
- დადებითი წერტილოვანი მუხტის მიერ შექმნილი ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობის წირები მიმართულია რადიალურად, მუხტიდან უსასრულობაში, უარყოფითისა კი პირიქით – უსასრულობიდან მუხტისკენ;
- ელექტრულ ველს, რომლის ნებისმიერ წერტილში დაძაბულობა ერთნაირია, ერთგვაროვანი ელექტრული ველი ეწოდება;
- ერთგვაროვანი ელექტრული ველის ყოველ წერტილში დაძაბულობას ერთნაირი მოდული და მიმართულება აქვს, ხოლო ძალწირები ერთმანეთის პარალელური და თანაბარი სიხშირისაა;
- რაც უფრო მეტია დაძაბულობის მოდული, მით მეტია ძალწირების სიხშირე.

საკონტროლო კითხვები:

1. რაზე მიუთითებს ელექტრული ველის ძალწირზე აღნიშნული ისარი?
2. რატომაა წერტილოვანი მუხტის ელექტრული ველის ძალწირი წრფე?
3. რატომ არ შეიძლება ელექტრული ველის ძალწირები ერთმანეთს კვეთდეს?
4. როგორ შეიძლება შევქმნათ ერთგვაროვანი ელექტრული ველი?
5. შეიცვლება თუ არა საცდელ მუხტზე მოქმედი ძალა, თუ მას ერთგვაროვანი ველის ერთი წერტილიდან მეორეში გადავიტანთ?

საკითხის უკეთ გასააზრებლად შეგიძლიათ იხილოთ ბმულები: <https://is.gd/eIJN7O>
<https://is.gd/CaNDP5>



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

ვერტიკალურად ზევით მიმართულ 1500 ნ/კ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ვარდნას იწყებს 20 მკკ მუხტისა და 6 გ მასის მქონე წვეთი. არქიმედეს ამომგდებ ძალას ნუ გაითვალისწინებთ და განსაზღვრეთ წვეთის სიჩქარე ვარდნის დაწყებიდან 2 წმ -ის შემდეგ.

მოცემულია: $E = 1500 \text{ ნ/კ}$; $v_0 = 0$; $q = 20 \text{ მკკ} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ კ}$; $t = 2 \text{ წმ}$. $v = ?$

ამოხსნა. პირველ რიგში, განვსაზღვროთ წვეთზე მოქმედი ძალები.

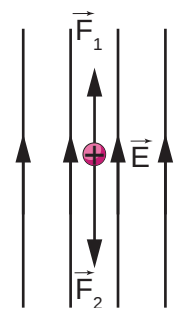
ესენია: ვერტიკალურად ზევით მიმართული $F_1 = Eq$ მოდულის მქონე ელექტრული ძალა და ვერტიკალურად ქვევით მიმართული მოდულით $F_2 = mg$ სიმძიმის ძალა (სურ. 58). მათი მოდულები ტოლია:

$F_1 = 1500 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ (ნ)}$, $F_2 = 0,006 \cdot 10 = 6 \cdot 10^{-2} \text{ (ნ)}$. ცხადია, ამ ძალთა ტოლქმედი მიმართულია ვერტიკალურად ქვევით, ხოლო მისი მოდულია $F = F_2 - F_1 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ (ნ)}$. ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად, წვეთი

შეიძენს ქვევით მიმართულ აჩქარებას: $a = \frac{F}{m} = \frac{3 \cdot 10^{-2}}{0,006} = 5 \text{ (მ/წმ}^2\text{)}$. ვინა-

იდან წვეთის საწყისი სიჩქარე ნულის ტოლია, $v = at = 5 \cdot 2 = 10 \text{ (მ/წმ)}$.

პასუხი: წვეთის სიჩქარე ვარდნის დაწყებიდან 2 წმ -ის შემდეგ 10 მ/წმ იქნება.



სურ. 58

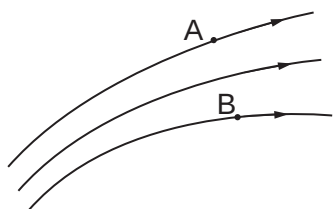


ამოხსენით ამოცანები

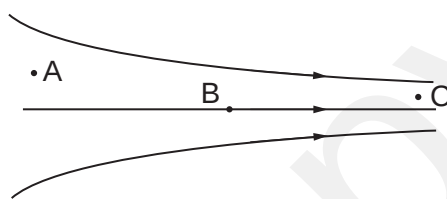
1. რა მიმართულება ექნება წერტილოვან დადებით მუხტზე მოქმედ ძალას, თუ მას მოვათავსებთ ელექტრული ველის **A** წერტილში (სურ. 59)?

2. რა მიმართულება ექნება წერტილოვან უარყოფით მუხტზე მოქმედ ძალას, თუ მას მოვათავსებთ ელექტრული ველის **B** წერტილში (სურ. 59)?

3. სურ. 60-ის მიხედვით, რომელ წერტილშია ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული ყველაზე მეტი?

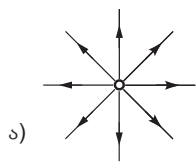


სურ. 59

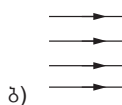


სურ. 60

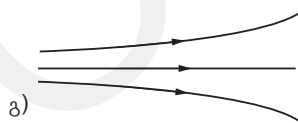
4. რომელ სურათზეა გამოსახული ერთგვაროვანი ელექტრული ველი (სურ. 61 ა), ბ), გ)? პასუხი დაასაბუთეთ.



ა)



ბ)



გ)

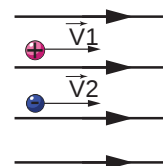
სურ. 61

5. შესაძლებელია თუ არა წერტილოვანმა მუხტმა შექმნას ერთგვაროვანი ელექტრული ველი? პასუხი დაასაბუთეთ.

6. $\vec{E}$ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში მოძრაობს q მუხტის მქონე ნაწილაკი, რომლის მასაა m . განსაზღვრეთ ნაწილაკის მოძრაობის აჩქარების მოდული. ნაწილაკზე მოქმედი სიმძიმის ძალა უგულებელყავით.

7. $\vec{E}$ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში მოძრაობას იწყებს q მუხტის მქონე ნაწილაკი, რომლის მასაა m . განსაზღვრეთ ნაწილაკის სიჩქარის მოდული მოძრაობის დაწყებიდან t დროის შემდეგ. ნაწილაკზე მოქმედი სიმძიმის ძალა უგულებელყავით.

8. ჰორიზონტალურად მიმართულ ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ერთნაირი სიჩქარით შეიჭრა $+q$ და $-q$ მუხტის მქონე ორი ნაწილაკი (სურ. 62). რომელი მათგანის სიჩქარის მოდული დაიწყებს ზრდას ველში შეჭრისას და რომელი მათგანის – შემცირებას?



სურ. 62

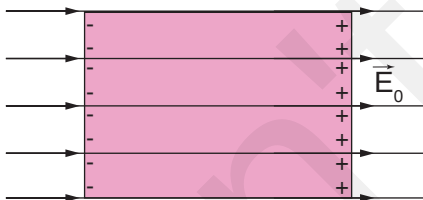
9. ვერტიკალურად ზევით მიმართულ 5000 ნ/კ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ვარდება -20 მკკ მუხტისა 10 გ მასის მქონე წვიმის წვეთი. წვეთზე მოქმედ არქიმედეს ძალას ნუ გაითვალისწინებთ და იპოვეთ მისი ვარდნის აჩქარება.

10. ძაფზე დაკიდებული 50 მკკ მუხტისა და 20 გ მასის მქონე მცირე ზომის ბურთულა შეიტანეს ჰორიზონტალურად მიმართულ 4000 ნ/კ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში. ბურთულაზე მოქმედ არქიმედეს ძალას ნუ გაითვალისწინებთ და იპოვეთ კუთხე, რომლითაც ძაფი ვერტიკალიდან გადაიხარა.

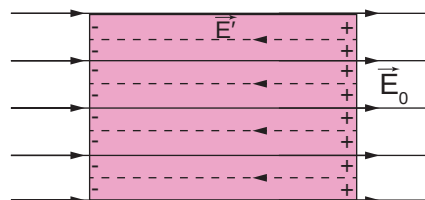
§ 10 გამტარები ელექტროსტატიკურ ველში

გრავიტაციული და ელექტრული ურთიერთქმედებების შედარებისას მათ შორის ბევრი მსგავსება აღმოვაჩინეთ. მაგრამ არსებობს მნიშვნელოვანი განსხვავებაც – გრავიტაციული ველი ყველგან შეაღწევს, ვერსად „დავემალებით“, ელექტრული ველისგან კი შეგვიძლია „თავი დავიცვათ“. როგორ შევქმნათ ელექტრული ველისაგან თავისუფალი სივრცე?

$\vec{E}_0$ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში შევიტანოთ ლითონის დაუმუხტავი ფირფიტა. სურ. 70-ზე ველის დაძაბულობა მიმართულია მარცხნიდან მარჯვნივ და მისი წირები გამოსახულია უწყვეტი ხაზებით. ველში შეტანისას ფირფიტაში მყოფ თავისუფალ ელექტრონებზე იმოქმედებს ველის დაძაბულობის საწინააღმდეგოდ მიმართული ძალა, რომლის მოქმედებით ისინი მარჯვნიდან მარცხნივ ამოძრავდებიან. შედეგად, ფირფიტის მარცხენა ნაწილი დაიმუხტება უარყოფითად, მარჯვენა კი – დადებითად. მუხტის ასეთ გადანაწილებას გამტარში **ელექტროსტატიკური ინდუქცია** ეწოდება. გადანაწილებული მუხტები ფირფიტაში შექმნილ $\vec{E}'$ დაძაბულობის ელექტრულ ველს, რომელიც გარე $\vec{E}_0$ დაძაბულობის საპირისპიროდაა მიმართული (სურ. 71). სურათზე $\vec{E}'$ დაძაბულობის ველის წირები წყვეტილი ხაზებითაა გამოსახული. ვინაიდან ლითონებში თავისუფალი ელექტრონების რაოდენობა ძალიან დიდია, ამიტომ მცირე დროის შემდეგ ინდუცირებული მუხტების შექმნილი ველის დაძაბულობა მოდულით გარე ველის დაძაბულობას გაუტოლდება. სუპერპოზიციის პრინციპის თანახმად: $\vec{E}_0 + \vec{E}' = 0$. ე.ი ფირფიტის შიგნით ველის ჯამური დაძაბულობა ნულს გაუტოლდება და ელექტრონები მიმართულ მოძრაობას შეწყვეტს.



სურ. 70



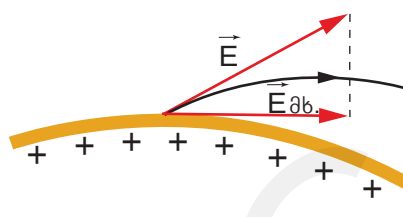
სურ. 71

ამრიგად, **ელექტროსტატიკურ ველში მოთავსებული გამტარის შიგნით ელექტრული ველის დაძაბულობა ნულის ტოლია.**

აღსანიშნავია, რომ მუხტების განონასწორების შემდეგ გამტარის შიგნით ნულის ტოლია არა მარტო ველის დაძაბულობა, არამედ მუხტიც. გამტარის შიგნით ჯამური მუხტი ნულის ტოლი რომ არ იყოს, ის ელექტრულ ველსაც შექმნიდა. მაგრამ ელექტრული ველი გამტარის შიგნით არ არსებობს. ეს ნიშნავს, რომ **მუხტები მხოლოდ გამტარის ზედაპირზეა განლაგებული.** ეს დასკვნა მართებულია ელექტრულ ველში მოთავსებული როგორც დაუმუხტავი, ასევე დამუხტული გამტარისათვის. იგი ასევე მართებულია იმ დამუხტული გამტარისთვისაც, რომელიც ელექტრულ ველში მოთავსებული არ არის. მართლაც, როცა ლითონის გამტარი დამუხტულია უარყოფითად, მასში არსებული ჭარბი ელექტრონები ურთიერთგანზიდვის გამო ერთმანეთს მაქსიმალურად დაშორდება და ამიტომ განლაგდება გამტარის ზედაპირზე. შესაბამისად გამტარის შიგნით დადებითი და უარყოფითი მუხტების ჯამი ნულის ტოლი იქნება. იმ

შემთხვევაში, როდესაც ლითონის გამტარი დამუხტულია დადებითად, თავისუფალი ელექტრონები ჭარბი დადებითი მუხტის გავლენით გამტარის სიღრმისკენ ამოძრავდება. გამტარის ზედაპირზე კი დადებითი მუხტი დარჩება.

გამტარის გარეთ, ზედაპირთან ახლოს ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობის წირები ზედაპირის მართობულია. დავასაბუთოთ ეს. დავუშვათ, რომ ველის რომელიმე ძალწირი ზედაპირის მართობული არ არის (სურ. 72). მაშინ დაძაბულობის ვექტორის ზედაპირის მხები, მდგენელი ნულისაგან განსხვავებული იქნება. ეს კი ნიშნავს, რომ ზედაპირზე მყოფ თავისუფალ მუხტებზე იმოქმედებს ძალა, რომელიც მათ ზედაპირის გასწვრივ გადაადგილებს. ეს გაგრძელდება მანამ, ვიდრე დაძაბულობის მხები მდგენელი ნულს არ გაუტოლდება, ანუ დაძაბულობის წირები გამტარის ზედაპირის მართობული გახდება. წინააღმდეგ შემთხვევაში, მუხტები სულ იმოძრავებდა ზედაპირის გასწვრივ, რაც ენერგიის მუდმივობის კანონს ეწინააღმდეგება.



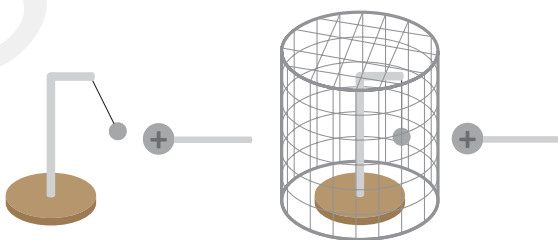
სურ. 72

იმ ფაქტზე, რომ ელექტრულ ველში მოთავსებული გამტარის შიგნით ელექტრული ველი არ არსებობს, დაფუძნებულია ე.წ. **ელექტროსტატიკური დაცვა**.

ჩავატაროთ ცდები.



ძაფზე დაკიდებულ ბურთულას მივუახლოოთ დამუხტული ბურთულა. გავლენით დამუხტვის გამო ძაფზე დაკიდებული ბურთულა გადაიხრება დამუხტული ბურთულისკენ. თუ იმავე ცდას გავიმეორებთ, ოღონდ ძაფზე დაკიდებულ ბურთულას ლითონის „გალიაში“ მოვათავსებთ (სურ. 73), ის აღარ გადაიხრება – „გალიის“ შიგნით დამუხტული ბურთულის ელექტრული ველი ვერ აღწევს, სხვანაირად, ადგილი აქვს ბურთულის ელექტრული ველის ე.წ. **ეკრანირებას**.



სურ. 73



ლითონის გალია დავმუხტოთ ელექტროფორული მანქანის გამოყენებით. ერთი ელექტროსკოპი მოვათავსოთ გალიაში და მისი ღერო მივუერთოთ „გალიის“ შიდა კედელს. ელექტროსკოპის ფურცელები არ გაიშლება – გალიის შიდა კედელზე მუხტი არ არის. მეორე ელექტროსკოპის ღერო მივუერთოთ „გალიის“ გარე კედელს. ელექტროს-



სურ. 74

კოპის ფურცლები გაიშლება – „გალიის“ მთელი მუხტი მის გარეთა ზედაპირზე განაწილებული.

პირველად ასეთი ცდები 1836 წელს მაიკლ ფარადეიმ ჩაატარა და ამიტომ მას „ფარადეის გალიას“ უწოდებენ.

იმისათვის, რომ ელექტრული ველისგან მისდამი მგრძნობიარე ხელსაწყოები დავიცვათ, მათ ლითონის ყუთებში ათავსებენ (სურ. 74).

დაკვნები:

- გარეშე ელექტრული ველის გავლენით გამტარის მოპირდაპირე ზედაპირებზე საპირისპირო ნიშნის მუხტების თავმოყრას ელექტროსტატიკური ინდუქცია ეწოდება;
- ელექტროსტატიკურ ველში მოთავსებული გამტარის შიგნით ელექტრული ველი არ არის;
- ელექტრულ ველში მოთავსებული როგორც დაუმუხტავი, ასევე დამუხტული გამტარის შიგნით ჯამური მუხტი ნულის ტოლია. მუხტები მხოლოდ გამტარის ზედაპირზე განლაგებული;
- გამტარის გარეთ, ზედაპირთან ახლოს ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობის წირები ზედაპირის მართობულია;
- ელექტროსტატიკური დაცვა დაფუძნებულია იმ ფაქტზე, რომ ელექტრულ ველში მოთავსებული გამტარის შიგნით ელექტრული ველი არ არსებობს.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა მიმართულებით ამოძრავდება თავისუფალი ელექტრონები ელექტრულ ველში მოთავსებულ გამტარში?
2. რატომ ხდება ელექტრული ველში მოთავსებულ გამტარში ჯამური დაძაბულობა ნულის ტოლი?
3. რატომ განლაგდება უარყოფითად დამუხტული გამტარის ჭარბი ელექტრონები მის ზედაპირზე?
4. რა მოხდებოდა, ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობის წირები გამტარის ზედაპირის მართობული რომ არ ყოფილიყო?

§ 11 დიელექტრიკები ელექტრულ ველში. დიელექტრიკული შეღწევადობა

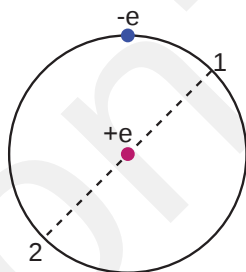
წინა პარაგრაფიდან თქვენ შეიტყვეთ, რომ ელექტრულ ველში მოთავსებული გამტარის შიგნით ელექტრული ველი არ არსებობს. ბუნებრივია, იბადება კითხვა: როგორ გავლენას ახდენს დიელექტრიკი (იზოლატორი) ელექტრულ ველზე?

მოახდენს თუ არა ელექტრული ველის ეკრანირებას „ფარადეის გალია“, თუ მას დიელექტრიკისაგან დავამზადებთ?

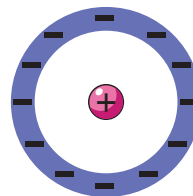
როგორც იცით, დიელექტრიკში დამუხტული ნაწილაკები – ელექტრონები და ატომბირთვები ერთმანეთთან ბმულია. გამტარების თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკებისგან განსხვავებით, მათ არ შეუძლიათ გარე ელექტრული ველის გავლენით გადაადგილება სხეულის მთელ მოცულობაში. შესაბამისად, დიელექტრიკის შიგნით გარე ელექტრული ველის მაკომპენსირებული ველი ვერ შეიქმნება. ამიტომ გარე ელექტრული ველი დიელექტრიკის შიგნითაც არსებობს. რამდენად შეუძლია დიელექტრიკს შეასუსტოს გარე ელექტრული ველი? ამ კითხვაზე პასუხის გასაცემად საჭიროა დანვრილებით გავეცნოთ ასეთი სხეულების აგებულებას.

არსებობს რამდენიმე სახის დიელექტრიკი. გავეცნოთ ზოგიერთ მათგანს.

არაპოლარული დიელექტრიკი. სურ. 75-ზე ნაჩვენებია წყალბადის ატომის სქემატური ნახაზი. ატომის დადებითი მუხტი (ატომბირთვი) მოთავსებულია მის ცენტრში. ელექტრონი ბირთვის გარშემო მოძრაობს ძალიან დიდი წირითი სიჩქარით (იხ. § 6, „ერთად ამოვხსნათ ამოცანა“). მისი ბრუნვის პერიოდი დაახლოებით 10^{-15} წმ-ია, ანუ ის წამში 10^{15} ბრუნს ასრულებს. ამიტომ ჩვენ ვერ ვიტყვით, რომელ წერტილში იმყოფება ელექტრონი, 1 წერტილში თუ 2 წერტილში, თითქოს ის ყველგანაა თავის ორბიტაზე (სურ. 76). ეს საფუძველს გვაძლევს მივიჩნიოთ, რომ საშუალოდ, დროის მიხედვით, უარყოფითი მუხტის განაწილების ცენტრი ატომის შუაშია, ანუ ემთხვევა დადებითად დამუხტულ ბირთვს.



სურ. 75



სურ. 76

დიელექტრიკს, რომლის შემადგენელ ატომებში ან მოლეკულებში დადებითი და უარყოფითი მუხტების განაწილების ცენტრები ერთმანეთს ემთხვევა, არაპოლარული დიელექტრიკი ეწოდება.

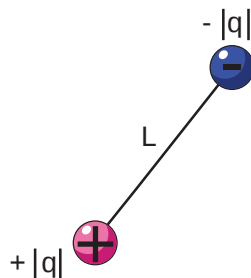
არაპოლარული დიელექტრიკებია: ერთატომიანი აირები (He, Ne, Ar, Kr და სხვა); აირები, რომლებიც შედგება ორატომიანი სიმეტრიული მოლეკულებისგან (N_2 , O_2 და სხვა); ზოგიერთი ორგანული სითხე; პლასტმასები.

პოლარული დიელექტრიკი. არსებობს ნივთიერებები, რომელთა მოლეკულებში ელექტრონული ღრუბელი წანაცვლებულია ერთი ატომისკენ. სურ. 77-ზე ნაჩვენებია წყლის მოლეკულის მოდელი. ამ მოლეკულაში უარყოფითი მუხტის განაწილების ცენტრი წანაცვლებულია ჟანგბადის ატომისკენ, ხოლო დადებითი მუხტის განაწილების ცენტრი – წყალბადის ატომებისკენ. მოლეკულის ზომებთან შედარებით დიდ მანძილ-

ზე ასეთი მოლეკულა შეიძლება განვიხილოთ როგორც ერთმანეთისგან რაღაც L მანძილით დაშორებული ორი ისეთი ნერტილოვანი მუხტის ერთობლიობა, რომლებიც მოდულით ტოლია და ნიშნით საპირისპირო (სურ. 78). მუხტების ასეთი განაწილებით მიღებულ ელექტრულად ნეიტრალურ სისტემას **ელექტრული დიპოლი** ეწოდება.



სურ. 77

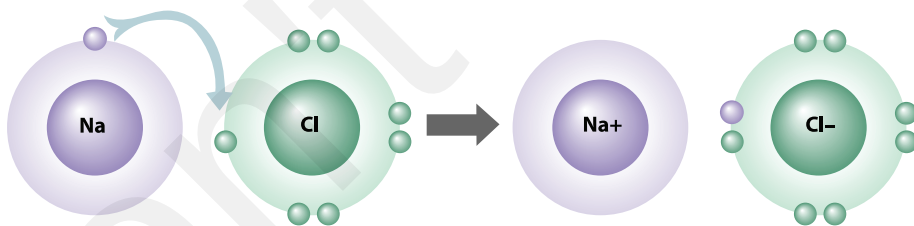


სურ. 78

დიელექტრიკს, რომლის შემადგენელ მოლეკულებში დადებითი და უარყოფითი მუხტების განაწილების ცენტრები ერთმანეთს არ ემთხვევა, პოლარული დიელექტრიკი ეწოდება.

შეიძლება ვთქვათ, რომ პოლარული დიელექტრიკი ბუნებრივი დიპოლებისაგან შედგება. პოლარული დიელექტრიკებია: წყალი, სხვადასხვა სპირტი და ა.შ.

იონური დიელექტრიკი. ბუნებაში ხშირად გვხვდება ნივთიერებები, რომლებსაც იონური სტრუქტურა აქვთ. მათ შორისაა მარილები და ტუტეები. ასეთია, მაგალითად, ნატრიუმის ქლორიდი NaCl (სუფრის მარილი). ნატრიუმის ატომს გარე შრეზე აქვს ერთი სავალენტო ელექტრონი, რომელიც სუსტ ბმაშია ატომბირთვთან. ქლორის ატომს კი გარე შრეზე შვიდი სავალენტო ელექტრონი აქვს. მოლეკულის შექმნისას ნატრიუმის ერთადერთ სავალენტო ელექტრონს ქლორი იერთებს, შედეგად, ორი ნეიტრალური ატომი გადაიქცევა საპირისპირო ნიშნის ორი იონის სისტემად (სურ. 79).

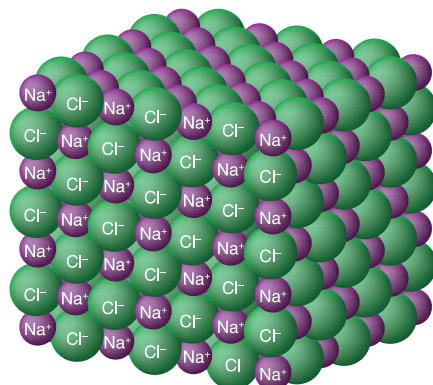


სურ.79

ასეთი სისტემებისგან შემდგარი კრისტალური მესერი შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც ერთმანეთში ჩადგმული ორი ქვემესრის ერთობლიობა. თითოეული მათგანი წარმოქმნილია ერთი ნიშნის იონებისგან (სურ. 80). თუ გარე ელექტრული ველი არ არსებობს, კრისტალის თითოეული უჯრედი ელექტრულად ნეიტრალურია.

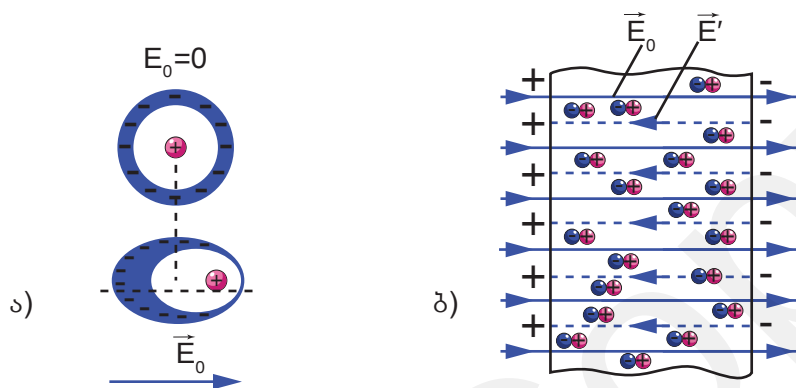
ვნახოთ, როგორ შეიცვლება გარე ერთგვაროვანი ელექტროსტატიკური ველი თითოეულ ასეთ დიელექტრიკში.

არაპოლარული დიელექტრიკის ელექტრულ ველში შეტანისას თავს იჩენს ე.წ. **ელექტრონული (დეფორმაციული) მექანიზმი**: გარე ერთგვაროვანი ელექტროსტატიკური ველის მოქმედებით ატომების დადებითი მუხტები წაინაცვლებს გარე ველის $\vec{E}_0$



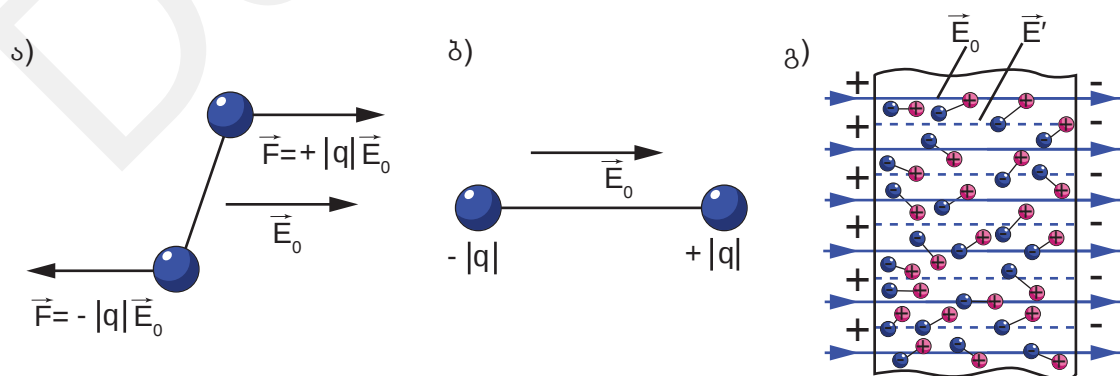
სურ. 80

დაძაბულობის მიმართულებით, ხოლო უარყოფითი მუხტები – მის საწინააღმდეგოდ (სურ. 81ა). შედეგად მოლეკულები (ატომები) გადაიქცევა გარე ელექტრული ველის დაძაბულობის წირების გასწვრივ განლაგებულ ელექტრულ დიპოლებად. დიელექტრიკის მოპირდაპირე ზედაპირებზე ჩნდება საპირისპირო ნიშნის მუხტები. დიელექტრიკის შიგნით კი ბმული მუხტები ერთმანეთს ანონასწორებს. ზედაპირებზე გაჩენილი მუხტები ქმნის ელექტრულ ველს, რომლის $\vec{E}'$ დაძაბულობა მიმართულია გარე ველის $\vec{E}_0$ დაძაბულობის საპირისპიროდ (სურ. 81ბ).



სურ. 81

პოლარულ დიელექტრიკში სითბური მოძრაობის გამო დიპოლები ქაოსურად არის ორიენტირებული, ამიტომ დიელექტრიკის ზედაპირზე და ნებისმიერ მის მოცულობაში ჯამური ელექტრული მუხტი ნულის ტოლია. შესაბამისად, ნულის ტოლია ელექტრული ველის დაძაბულობაც. პოლარული დიელექტრიკის გარე ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში მოთავსების შემდეგ თითოეულ ელექტრულ დიპოლზე იმოქმედებს მოდულით ტოლი და საპირისპიროდ მიმართული ორი ძალა (სურ. 82 ა). ისინი ქმნიან ძალთა მახრუნებელ მომენტს, რომელიც ცდილობს დიპოლის მობრუნებას ისე, რომ მისი ღერძი გარე ველის დაძაბულობის წირების გასწვრივ დადგეს (სურ. 82 ბ). მაგრამ სითბური მოძრაობა ხელს უშლის ყველა დიპოლის მოწესრიგებულ ორიენტაციას. ამრიგად, გარე ველის გავლენით დიპოლების მხოლოდ ნაწილი ორიენტირდება. ორიენტირებული დიპოლები დიელექტრიკის მოპირდაპირე ზედაპირებზე გააჩენს საპირისპირო ნიშნის მუხტებს. ზედაპირებზე გაჩენილი მუხტები ქმნის ელექტრულ ველს, რომლის $\vec{E}'$ დაძაბულობა მიმართულია გარე ველის $\vec{E}_0$ დაძაბულობის საპირისპიროდ (სურ. 82 გ).



სურ. 82

მაშასადამე, პოლარული დიელექტრიკის გარე ერთგვაროვან ველში შეტანისას თავს იჩენს **მაორიენტირებელი მექანიზმი**. ალენიშნოთ, რომ პოლარულ დიელექტრიკებში ადგილი აქვს ელექტრონულ მექანიზმსაც, მაგრამ მაორიენტირებელი მექანიზმი ბევრად დიდია ელექტრონულზე, რის გამოც მას ხშირად უგულებელყოფენ.

გარე ველის გავლენით დადებითი და უარყოფითი ბმული მუხტების ურთიერთ-საწინააღმდეგო მიმართულებით წანაცვლებას დიელექტრიკის პოლარიზაცია ეწოდება.

ერთგვაროვან ელექტრულ ველში იონური დიელექტრიკების მოთავსებისას ადგილი აქვს **იონურ პოლარიზაციას** – ველის ზეგავლენით ორი ქვემესრის შემადგენელი სხვადასხვა ნიშნის იონები ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულებით წანაცვლებს. შედეგად, კრისტალის გვერდითა წახნაგებზე ჩნდება გაუნონასწორებელი ბმული მუხტები, ანუ კრისტალი პოლარიზდება. აღსანიშნავია, რომ იონურ პოლარიზაციას აუცილებლად თან ახლავს ელექტრონული პოლარიზაციაც.

მაშასადამე, მიუხედავად იმისა, რომ დიელექტრიკში ელექტრული მუხტები ბმულია, მათ მაინც შეუძლია განსაზღვრული $\vec{E}'$ დაძაბულობის ველის შექმნა, რომელსაც გარე ველის $\vec{E}_0$ დაძაბულობის საწინააღმდეგო მიმართულება აქვს. ამის გამო დიელექტრიკში ელექტრული ველის ჯამური $\vec{E}$ დაძაბულობის მოდული ნაკლებია გარე ველის $\vec{E}_0$ დაძაბულობის მოდულზე: $E = E_0 - E'$. თუ რამდენად სუსტდება ელექტრული ველის დაძაბულობა დიელექტრიკში ვაკუუმთან შედარებით დამოკიდებულია გარემოს ელექტრულ თვისებებზე. ამ თვისებას ახასიათებენ ფიზიკური სიდიდით, რომელსაც **გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობა** ეწოდება და აღნიშნავენ ϵ ასოთი:

გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობა გვიჩვენებს, თუ რამდენჯერ ნაკლებია ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული დიელექტრიკში (E) ველის დაძაბულობის მოდულზე ვაკუუმში (E_0):

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}$$

ნივთიერებების დიელექტრიკული შეღწევადობა ერთმანეთისგან ძალიან განსხვავდება. ვაკუუმის დიელექტრიკული შეღწევადობა ერთის ტოლია, აირების დიელექტრიკული შეღწევადობა ერთზე ოდნავ მეტია, თხევადი და მყარი არაპოლარული დიელექტრიკებისა – რამდენიმე ერთეულია, პოლარული დიელექტრიკებისა კი – რამდენიმე ათეული (მაგალითად, $\epsilon_{წყალი} = 81$). არსებობს ნივთიერებები, რომელთა დიელექტრიკული შეღწევადობა ათეულ და ასეულ ათასის თანრიგს აღწევს. მათ სეგნეტოელექტრიკებს უწოდებენ.

ვაკუუმთან შედარებით გარემოში ელექტრული დაძაბულობის ϵ -ჯერ შემცირება იწვევს ელექტროსტატიკური ურთიერთქმედების ძალის შემცირებას. ამიტომ კულონის კანონი დიელექტრიკში მოთავსებული წერტილოვანი მუხტებისთვის ასე ჩაიწერება:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}$$

დიელექტრიკში მოთავსებული წერტილოვანი მუხტის ელექტრული ველის დაძაბულობის ფორმულა კი ასეთ სახეს მიიღებს:

$$E = k \frac{|q|}{\epsilon r^2}$$

დაკვნები:

- დიელექტრიკი ორი სახისაა: პოლარული და არაპოლარული;
- დიელექტრიკს, რომლის შემადგენელ ატომებსა ან მოლეკულებში დადებითი და უარყოფითი მუხტების განაწილების ცენტრები ერთმანეთს ემთხვევა, არა-პოლარული დიელექტრიკი ეწოდება;
- დიელექტრიკს, რომლის შემადგენელ მოლეკულებში დადებითი და უარყოფითი მუხტების განაწილების ცენტრები ერთმანეთს არ ემთხვევა, პოლარული დიელექტრიკი ეწოდება;
- გარკვეული მანძილით დაშორებულ, მოდულით ტოლ და სხვადასხვანიშნიანი ორი მუხტის ერთობლიობას ელექტრული დიპოლი ეწოდება;
- გარე ველის გავლენით დადებითი და უარყოფითი ბმული მუხტების ურთიერთ-საწინააღმდეგო მიმართულებით წანაცვლებას დიელექტრიკის პოლარიზაცია ეწოდება;
- ელექტრულ ველში მოთავსებულ დიელექტრიკში დიპოლები ველის გასწვრივ ორიენტირდება და შექმნის ელექტრულ ველს, რომელსაც გარე ველის დაძაბულობის საწინააღმდეგო მიმართულება აქვს, მაგრამ ვერ აკომპენსირებს მას;
- ველში მოთავსებულ დიელექტრიკში ელექტრული ველი სუსტდება;
- გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობა (ϵ) არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც გვიჩვენებს, თუ რამდენჯერ ნაკლებია ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული დიელექტრიკში (E) ველის დაძაბულობის მოდულზე ვაკუუმში (E_0):
$$\epsilon = \frac{E_0}{E};$$
- კულონის კანონს ϵ დიელექტრიკული შეღწევადობის გარემოში მოთავსებული მუხტებისათვის აქვს შემდეგი სახე: $F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2};$
- ϵ დიელექტრიკული შეღწევადობის გარემოში მოთავსებული ნერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობის მოდული გამოითვლება ფორმულით: $E = k \cdot \frac{|q|}{\epsilon r^2}.$

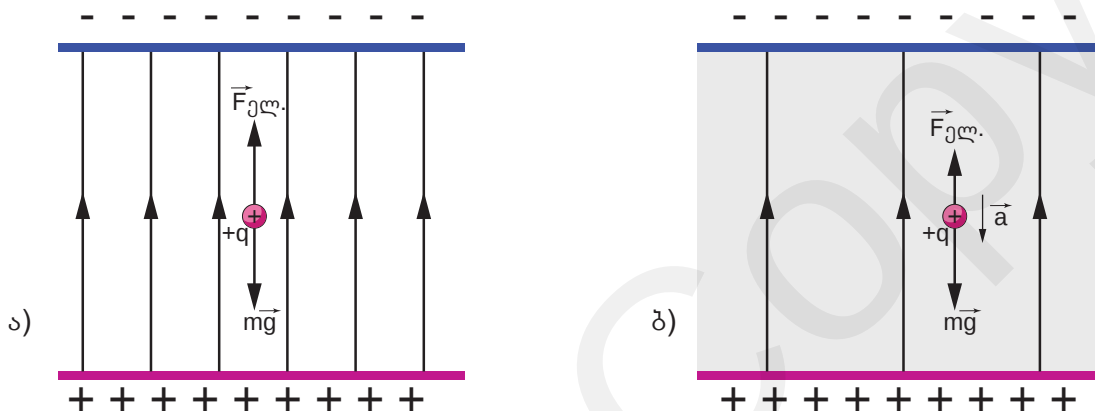
საკონტროლო კითხვები:

1. რას ნიშნავს, რომ არაპოლარულ დიელექტრიკში დადებითი და უარყოფითი მუხტების განაწილების ცენტრები ერთმანეთს ემთხვევა?
2. რატომ პოლარიზდება ელექტრულ ველში მოთავსებული არაპოლარული დიელექტრიკი?
3. $\vec{E}$ დაძაბულობის ველში მოთავსებისას რა მიმართულების ძალა იმოქმედებს დიპოლის დადებითად დამუხტულ ბოლოზე? უარყოფითად დამუხტულზე?
4. რით აიხსნება, რომ დიელექტრიკში დიპოლების ორიენტაციით შექმნილი ელექტრული ველი ვერ აკომპენსირებს გარე ველს?
5. რა უნდა გავაკეთოთ, რომ ნერტილოვანი მუხტების ვაკუუმიდან დიელექტრიკში გადატანის შემდეგ მუხტებს შორის ურთიერთქმედების ძალა არ შეიცვალოს?
6. როგორ ახსნით სუფრის მარილის (Na^+Cl^-) წყალში კარგად ხსნადობას?
7. რისი ტოლია ვაკუუმის დიელექტრიკული შეღწევადობა?
8. აქვს თუ არა დიელექტრიკულ შეღწევადობას განზომილება?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

დამუხტული ნაწილაკი განონასწორებულია ჰაერში ვერტიკალური მიმართულების ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში, რომელიც შექმნილია საპირისპირო ნიშნით დამუხტული და ჰორიზონტალურად განლაგებული ბრტყელი პარალელური ფირფიტებით (სურ. 83 ა). ფირფიტებს შორის სივრცე შეავსეს $\epsilon=2$ დიელექტრიკული შეღწევადობის მქონე თხევადი დიელექტრიკით (სურ. 83 ბ). იპოვეთ აჩქარება, რომლითაც დამუხტული ნაწილაკი დაიწყებს ვარდნას. ნაწილაკზე მოქმედ ამომგდებ ძალას ნუ გაითვალისწინებთ.



სურ. 83

მოცემულია: $\epsilon_1=1$; $\epsilon_2=2$. $a=?$

ამოხსნა: ვინაიდან თავდაპირველად ნაწილაკი განონასწორებულია, ეს ნიშნავს, რომ მასზე ვერტიკალურად ქვევით მოქმედი სიმძიმის ძალა მოდულით ვერტიკალურად ზევით მიმართული ელექტრული ძალის ტოლია: $mg = qE$. ფირფიტებს შორის სივრცის დიელექტრიკით შევსებისას ელექტრული ველის დაძაბულობა ϵ -ჯერ შემცირდება, შემცირდება მუხტზე მოქმედი ელექტრული ძალაც, რომელიც ტოლი იქნება $\frac{qE}{\epsilon}$. ამ შემთხვევაში სიმძიმის ძალისა და ელექტრული ძალის ტოლქმედი მიმართულია

ვერტიკალურად ქვევით და მისი მოდული ტოლია: $mg - \frac{qE}{\epsilon}$. ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად $mg - \frac{qE}{\epsilon} = ma$. ვინაიდან $mg = qE$, მივიღებთ: $mg - \frac{mg}{\epsilon} = ma$, საიდანაც $a = g - \frac{g}{\epsilon} = 10 - \frac{10}{2} = 5 \text{ (მ/წმ}^2\text{)}$.

პასუხი: ნაწილაკი ამოდრავდება ვერტიკალურად ქვევით 5 მ/წმ^2 აჩქარებით.



ამოხსენით ამოცანები

1. რისი ტოლია იმ გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობა, რომელშიც წერტილოვანი მუხტის მიერ განსაზღვრულ მანძილზე შექმნილი ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული ვაკუუმთან შედარებით 4-ჯერ ნაკლებია?

2. როგორ შეიცვლება ორ უძრავ დამუხტულ ნაწილაკს შორის მოქმედი კულონური ძალა ვაკუუმიდან ნავთში მათი გადატანით, თუ ნაწილაკებს შორის მანძილს უცვლელს დავტოვებთ?

3. როგორ შეიცვლება ორ უძრავ დამუხტულ ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების ძალის მოდული, თუ მათ ვაკუუმიდან გადავიტანთ გარემოში, რომლის დიელექტრიკული შეღწევადობაა 10 და ნაწილაკებს შორის მანძილს 3-ჯერ გავზრდით?

4. გარკვეული მანძილით დაშორებული ორი უძრავი დამუხტული ნაწილაკი ვაკუუმიდან გადაიტანეს წყალში. როგორ უნდა შევცვალოთ მათ შორის მანძილი, რომ კულონური ძალა იგივე დარჩეს?

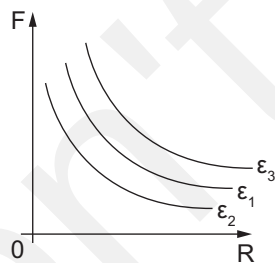
5. გარემოში, რომლის დიელექტრიკული შეღწევადობაა 4, რა მანძილზე უნდა მოვათავსოთ ეს ნაწილაკები მოცემულ გარემოში, რომ მათ შორის ურთიერთქმედების კულონური ძალა არ შეიცვალოს?

6. ზეთში მოთავსებული თანაბრად დამუხტული სფეროს რადიუსი 20 სმ-ია, მის ზედაპირზე არსებული მუხტი კი $-7 \cdot 10^{-10}$ კ. განსაზღვრეთ ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული სფეროს ზედაპირზე.

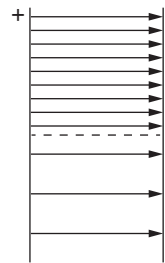
7. როგორ შეიცვლება ორ ბრტყელ, პარალელურ, სხვადასხვა ნიშნით დამუხტულ ფირფიტებს შორის არსებული ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული, თუ ფირფიტებს ნავთიდან წყალში გადავიტანთ?

8. უძრავი ნერტილოვანი მუხტი მოთავსებულია მინის და ზეთის გამყოფ საზღვარზე. რამდენჯერ განსხვავდება მუხტის მიერ შექმნილი ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული A და B ნერტილებში, თუ A ნერტილი იმყოფება ზეთში და ის 4-ჯერ უფრო შორსაა მუხტიდან, ვიდრე B ნერტილი, რომელიც თავის მხრივ, იმყოფება მინაში.

9. სურათზე გრაფიკულადაა მოცემული სამ სხვადასხვა გარემოში მოთავსებულ ორ დამუხტულ ნაწილაკს შორის მოქმედი კულონური ძალის დამოკიდებულება მათ შორის მანძილზე (სურ. 84). როგორ დამოკიდებულებაშია ϵ_1 , ϵ_2 და ϵ_3 დიელექტრიკული შეღწევადობები ერთმანეთთან?



სურ. 84

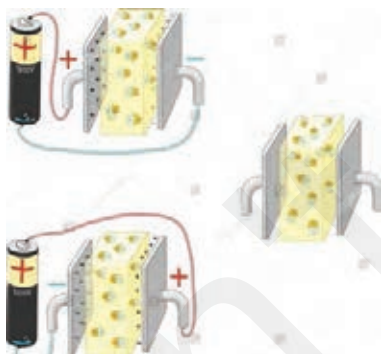
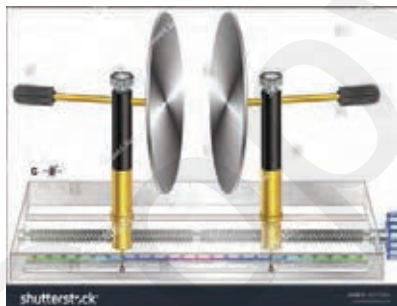
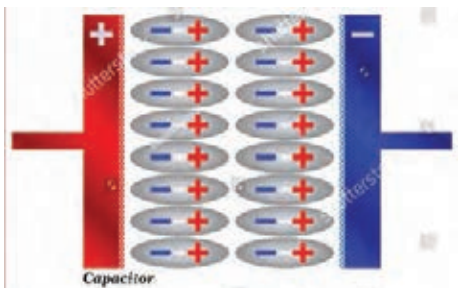


სურ. 85

10. ორ ბრტყელ, პარალელურ, სხვადასხვა ნიშნით დამუხტულ ფირფიტებს შორის სივრცე შეავსეს განსხვავებული დიელექტრიკებით. სურ. 85-ის მიხედვით იპოვეთ მათი დიელექტრიკული შეღწევადობების ფარდობა.

თავი III

ელექტრული ველის ენერგია



ამ თავში თქვენ გაეცნობით:

- ელექტრული ველის მუშაობას;
- მუხტის პოტენციალურ ენერგიას ელექტრულ ველში;
- ელექტრული ველის წერტილის პოტენციალს და პოტენციალთა სხვაობას;
- ელექტრული მუხტისა და ენერგიის დაგროვებას.

§ 12 ელექტრული ველის მუშაობა მუხტის გადაადგილებისას. მუხტის პოტენციალური ენერგია ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში

როგორც იცით, ელექტროსტატიკური ველი მასში მოთავსებულ მუხტზე გარკვეული ძალით მოქმედებს. მუხტის ელექტრულ ველში გადაადგილებისას ეს ძალა ასრულებს მუშაობას, რომელსაც ელექტრული ველის მუშაობა ეწოდება. ამ მუშაობის გამოთვლა საშუალებას მოგვცემს ელექტრული მოვლენები ენერგეტიკული კუთხით განვიხილოთ. ისევე როგორც მექანიკაში, ხშირად, ასეთი მიდგომა ელექტრობასთან დაკავშირებული ამოცანების ამოხსნას ამარტივებს.

IX კლასის ფიზიკის კურსში თქვენ შეისწავლეთ სიმძიმის ძალის მუშაობა.



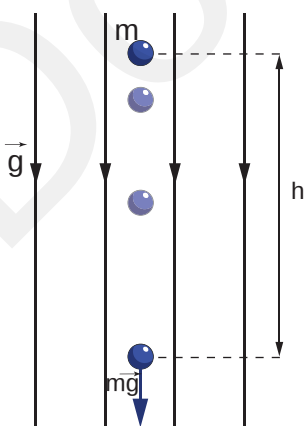
დედამიწის ზედაპირის მახლობლად გრავიტაციული ველი შეიძლება ერთგვაროვანად მივიჩნიოთ, თავისუფალი ვარდნის $\vec{g}$ აჩქარება კი – მუდმივად. ამიტომ მუშაობა, რომელსაც m მასის სხეულზე მოქმედი სიმძიმის ძალა ასრულებს სხეულის h მანძილზე $\vec{g}$ ვექტორის მიმართულებით გადაადგილებისას (სურ. 86 ა), გამოითვლება ფორმულით:

$$A_{\text{გრ}} = mgh.$$

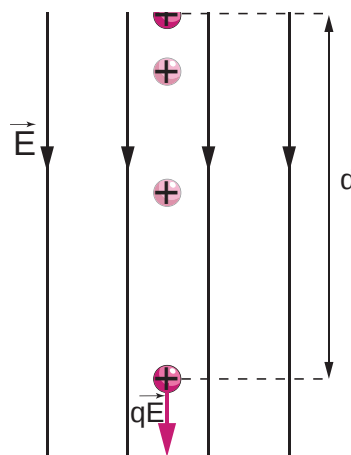
ასევე, გრავიტაციული ძალა სხეულებს შორის მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულია ($\sim \frac{1}{R^2}$) და მიმართულია სხეულთა შემაერთებული წრფის გასწვრივ. ამიტომ ერთი წერტილიდან მეორეში სხეულის გადაადგილებაზე გრავიტაციული ძალის მიერ შესრულებული მუშაობა ტრაექტორიის ფორმაზე დამოკიდებული არ არის. ის დამოკიდებულია მხოლოდ სხეულის საწყის და საბოლოო მდებარეობებზე. **გრავიტაციული ველი პოტენციალურია** და შეკრულ ტრაექტორიაზე მისი მუშაობა ნულის ტოლია.

ახლა დავუშვათ, რომ წერტილოვანი დადებითი q_0 მუხტი $\vec{E}$ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში დაძაბულობის მიმართულებით d მანძილზე გადაადგილდება (სურ. 86 ბ)). მუხტზე მოქმედი ელექტრული $\vec{F}_{\text{ელ}} = q_0\vec{E}$ ძალა ამ გადაადგილებისას შეასრულებს მუშაობას, რომელიც ტოლი იქნება:

$$A_{\text{ელ}} = q_0Ed. \quad (1)$$



სურ. 86 ა



სურ. 86 ბ

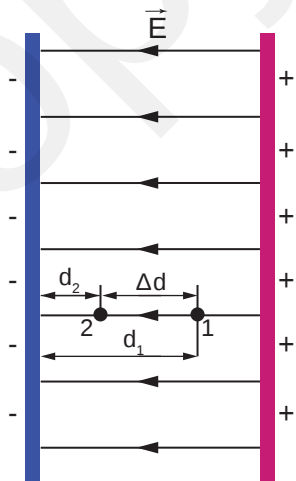
გრაფიკული ძალის მსგავსად, მუხტებს შორის მოქმედი ელექტროსტატიკური ძალაც მათ შორის მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულია და მიმართულია დაძაბულობის ვექტორის გასწვრივ. ამიტომ ერთი ნერტილიდან მეორე ნერტილში ნერტილოვანი მუხტის გადაადგილებაზე ელექტროსტატიკური ძალის მიერ შესრულებული მუშაობა არ არის დამოკიდებული ტრაექტორიის ფორმაზე. ის დამოკიდებულია მხოლოდ მუხტის საწყის და საბოლოო მდებარეობებზე, ანუ ელექტროსტატიკური ველის პოტენციალურია და შეკრულ ტრაექტორიაზე მისი მუშაობა ნულის ტოლია.

სიმძიმის ძალის მუშაობის შესწავლისას ნახეთ, რომ ეს მუშაობა სხეულის პოტენციალური ენერგიის სხვაობის ტოლია. ზუსტად ასევეა ელექტროსტატიკური ძალის შემთხვევაშიც – ნერტილოვანი მუხტის გადატანაზე ელექტროსტატიკური ველის მიერ შესრულებული მუშაობა მუხტის პოტენციალური ენერგიის სხვაობის ტოლია:

$$A = W_{\text{პოტ1}} - W_{\text{პოტ2}}, \quad (2)$$

რომელშიც $W_{\text{პოტ1}}$ და $W_{\text{პოტ2}}$ ნერტილოვანი მუხტის პოტენციალური ენერგიაა, შესაბამისად, საწყის და საბოლოო მდებარეობაში. პოტენციალური ენერგიის ნულოვანი დონის არჩევა შეიძლება ნებისმიერად.

განვიხილოთ მაგალითი. ვთქვათ, $\vec{E}$ დაძაბულობის ერთგვაროვანი ელექტრული ველი შექმნილია მოდულით ტოლი და ნიშნით საპირისპირო მუხტის მქონე დიდი ზომის ბრტყელი, პარალელური ლითონის ფირფიტებით. დავუშვათ, ნერტილოვანი დადებითი q_0 მუხტი გადაადგილდა ველის დაძაბულობის მიმართულებით 1 ნერტილიდან 2 ნერტილში, რომლებიც უარყოფითად დამუხტული ფირფიტებიდან, შესაბამისად, d_1 და d_2 მანძილითაა დაშორებული (სურ. 87). სურათიდან ჩანს, რომ მუხტის გადაადგილების მოდული ტოლია:



სურ. 87

$$\Delta d = d_1 - d_2. \quad (3)$$

თუ Δd -ს ამ მნიშვნელობას (1) ტოლობაში ჩავსვამთ, მივიღებთ:

$$A = q_0 E d_1 - q_0 E d_2. \quad (4)$$

(2) და (4) ტოლობების შედარებით დავასკვნით, რომ ნერტილოვანი მუხტის პოტენციალური ენერგია ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში ტოლია:

$$W_{\text{პოტ}} = q_0 E d. \quad (5)$$

(5) ფორმულა ანალოგიურია ნულოვანი დონიდან h სიმაღლეზე მყოფი m მასის სხეულის პოტენციალური ენერგიის გამომსახველი $W_{\text{პოტ}} = mgh$ ფორმულისა, მაგრამ მასისგან განსხვავებით, q_0 მუხტი შეიძლება იყოს როგორც დადებითი, ასევე უარყოფითი.

თუ ველი მუხტის გადატანაზე დადებით მუშაობას ასრულებს ($A > 0$), მაშინ დამუხტული სხეულის პოტენციალური ენერგია მცირდება ($W_{\text{პოტ1}} > W_{\text{პოტ2}}$). ამავე დროს, ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, იზრდება მისი კინეტიკური ენერგია (ქვე-

მომთ ვარდნილი სხეულის მსგავსად). იმ შემთხვევაში კი, როცა ელექტრული ველი უარყოფით მუშაობას ასრულებს ($A < 0$), მუხტის პოტენციალური ენერგია იზრდება ($W_{პოტ1} < W_{პოტ2}$) და შესაბამისად, მცირდება მისი კინეტიკური ენერგია (ზევით მოძრავი ასროლილი სხეულის მსგავსად).

დაკვნები:

- ერთი წერტილიდან მეორეში წერტილოვანი მუხტის გადაადგილებაზე ელექტროსტატიკური ძალის მიერ შესრულებული მუშაობა არ არის დამოკიდებული ტრაექტორიის ფორმაზე. ის დამოკიდებულია მხოლოდ მუხტის საწყის და საბოლოო მდებარეობაზე;
- შეკრულ ტრაექტორიაზე მუხტის გადატანისას ელექტროსტატიკური ველის მუშაობა ნულის ტოლია;
- ელექტროსტატიკური ველი პოტენციალურია;
- $\vec{E}$ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში წერტილოვანი დადებითი q_0 მუხტის Δd მანძილზე დაძაბულობის მიმართულებით გადაადგილებისას ველი ასრულებს $A_{ელ} = q_0 E \Delta d$ მუშაობას;
- q_0 მუხტის პოტენციალური ენერგია $\vec{E}$ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში ნულოვანი დონიდან d მანძილით დაშორებულ წერტილში გამოითვლება ფორმულით: $W_{პოტ} = q_0 E d$;
- ელექტროსტატიკური ველის მიერ მუხტის გადატანაზე შესრულებული მუშაობა ტოლია მუხტის პოტენციალური ენერგიის სხვაობისა: $A = W_{პოტ1} - W_{პოტ2}$;
- თუ ველი დადებით მუშაობას ასრულებს ($A > 0$), მუხტის პოტენციალური ენერგია მცირდება ($W_{პოტ2} < W_{პოტ1}$), კინეტიკური ენერგია კი იზრდება ($W_{კინ2} > W_{კინ1}$);
- თუ ველი უარყოფით მუშაობას ასრულებს ($A < 0$), მუხტის პოტენციალური ენერგია იზრდება ($W_{პოტ2} > W_{პოტ1}$), კინეტიკური ენერგია კი მცირდება ($W_{კინ2} < W_{კინ1}$).

საკონტროლო კითხვები:

1. რა მიმართულებით უნდა გადაადგილდეს დადებითი მუხტი ელექტრული ველის ძალწირის გასწვრივ, რომ ველმა დადებითი მუშაობა შეასრულოს?
2. რა მიმართულებით უნდა გადაადგილდეს უარყოფითი მუხტი ელექტრული ველის ძალწირის გასწვრივ, რომ ველმა უარყოფითი მუშაობა შეასრულოს?
3. რისი ტოლია ველის მიერ შესრულებული მუშაობა ელექტრული ველის ძალწირის მართობულად მუხტის გადაადგილებისას?
4. ნულოვან დონედ დადებითად დამუხტული ფირფიტა რომ აგვერჩია, შეიცვლება თუ არა ველის მიერ შესრულებული მუშაობა? მუხტის საწყისი და საბოლოო პოტენციალური ენერგია?
5. თუ ელექტრონი ველის ძალწირის მიმართულებით იმოძრავებს, როგორ შეიცვლება მისი კინეტიკური ენერგია? პოტენციალური?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

ელექტრონი მოძრაობას იწყებს $E = 200$ ნ/კ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში. განსაზღვრეთ ელექტრონის მიერ $d = 4$ სმ მანძილის გავლისას ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა, მისი კინეტიკური ენერგიის ცვლილება და შეძენილი სიჩქარე. ელექტრონზე მოქმედ სიმძიმის ძალას ნუ გაითვალისწინებთ.

მოცემულია: $E = 200$ ნ/კ; $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ კ; $d = 4$ სმ $= 0,04$ მ. $A_{\text{ველის}} = ?$ $\Delta E_{\text{კინ}} = ?$ $v = ?$

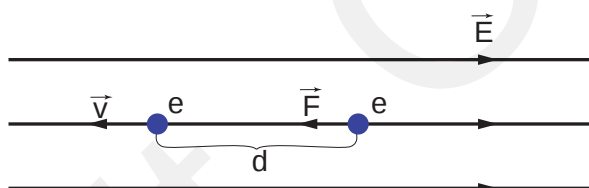
ამოხსნა: ამოცანის პირობის თანახმად, ელექტრონზე მოქმედებს მხოლოდ $F_{\text{ელ}} = |e|E$ ელექტრული ძალა, რომელიც ველის დაძაბულობის საწინააღმდეგოდამიმართული (სურ. 88). ელექტრონი d მანძილს სწორედ ამ ძალის მოქმედების მიმართულებით გაივლის, ამიტომ მისი შესრულებული მუშაობა ტოლი იქნება:

$A_{\text{ველის}} = F_{\text{ელ}} d = |e|Ed = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 200 \cdot 0,04 = 12,8 \cdot 10^{-19}$ (ჯ). თანახმად თეორემისა კინეტი-

კური ენერგიის შესახებ $A_{\text{ველის}} = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = \Delta E_{\text{კინ}}$, რომელშიც v_0 ელექტრონის საწყისი სიჩქარის მოდულია, ხოლო v – სიჩქარის მოდული d მანძილის გავლის შემდეგ. ვინა-

იდან $v_0 = 0$, მივიღებთ: $|e|Ed = \frac{mv^2}{2} = 12,8 \cdot 10^{-19}$ ჯ. აქედან

$$v = \sqrt{\frac{2|e|Ed}{m}} = \sqrt{\frac{25,6 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 1,7 \cdot 10^6 \text{ მ/წმ}.$$



სურ. 88

პასუხი: ელექტრული ველის მუშაობა $A_{\text{ველის}} = 12,8 \cdot 10^{-19}$ ჯ, ელექტრონის კინეტიკური ენერგიის ცვლილება 4 სმ-ის გავლის შემდეგ $\Delta E_{\text{კინ}} = 12,8 \cdot 10^{-19}$ ჯ, ხოლო მისი სიჩქარის მოდული $v = 1,7 \cdot 10^6$ მ/წმ.

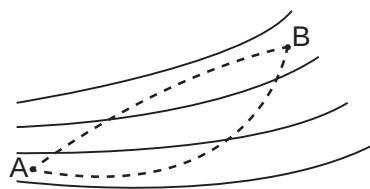


ამოხსენით ამოცანები

1. როგორ ველს ეწოდება პოტენციალური?
2. ვერტიკალურად ქვევით მიმართულ ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ვარდება უარყოფითად დამუხტული წვიმის წვეთი. დადებით თუ უარყოფით მუშაობას ასრულებს წვეთზე მოქმედი ელექტრული ძალა? პასუხი დაასაბუთეთ.

3. ჰორიზონტალურად მიმართულ ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ვარდება დადებითი მუხტის მქონე მტვრის ნაწილაკი. იპოვეთ მუხტის ველთან ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგიის ცვლილება.

4. ელექტროსტატიკურ ველში პროტონი ორი სხვადასხვა ტრაექტორიით A წერტილიდან B წერტილში გადაადგილდა (სურ. 89). შეადარეთ ერთმანეთს ამ ტრაექტორიებზე ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა.



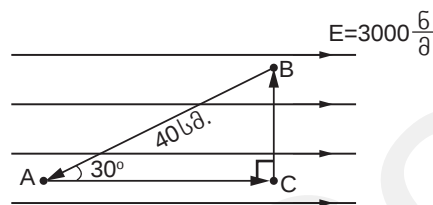
სურ. 89

5. 5000 ნ/კ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ელექტრონი დაძაბულობის მიმართულებით 10 სმ მანძილზე გადაადგილდა. განსაზღვრეთ ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა.

6. 4500 ნ/კ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ელექტრონი დაძაბულობის მიმართულებით 20 სმ მანძილზე გადაადგილდა. განსაზღვრეთ მუხტის ველთან ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგიის ცვლილება.

7. განსაზღვრეთ ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა AB უბანზე 2 მკკ წერტილოვანი მუხტის გადაადგილებისას (სურ. 90). მუხტი მოძრაობს სურათზე ნაჩვენები მიმართულებით.

8. განსაზღვრეთ ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა BC და CA უბანებზე 2 მკკ წერტილოვანი მუხტის გადაადგილებისას (სურ. 90). მუხტი მოძრაობს სურათზე ნაჩვენები მიმართულებით.



სურ. 90

9. $6 \cdot 10^4 \text{ ნ/კ}$ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში დაძაბულობის საპირისპიროდ მოძრაობს 12 ნკ მუხტის მქონე ნაწილაკი. როგორ შეიცვალა ნაწილაკის კინეტიკური ენერგია 15 სმ-ის გავლის შემდეგ?

10. $3 \cdot 10^4 \text{ ნ/კ}$ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ძალწირის გასწვრივ თანაბარშენელებულად მოძრაობს 10^{-6} გ მასისა და 16 ნკ მუხტის მქონე ნაწილაკი. განსაზღვრეთ ნაწილაკის საწყისი სიჩქარე, თუ 30 სმ-ს გავლისას მისი კინეტიკური ენერგია 2-ჯერ შემცირდა. ნაწილაკზე მოქმედ სიმძიმის ძალას ნუ გაითვალისწინებთ.

§ 13 წერტილოვანი მუხტების ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია

როგორც იცით, წერტილოვანი მუხტები ურთიერთქმედებს – მიიზიდება ან განიზიდება. ეს კი ნიშნავს, რომ ორ წერტილოვან მუხტს აქვს ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია. ამ ენერგიის განსაზღვრისათვის საჭიროა ვიპოვოთ მუშაობა, რომელსაც ასრულებს ერთი წერტილოვანი მუხტის ველი მასში მეორე წერტილოვანი მუხტის გადაადგილებისას.

დავუშვათ სასინჯი დადებითი q_0 მუხტი თავდაპირველად იმყოფება B წერტილში, რომელიც ასევე დადებითი q მუხტიდან დაშორებულია r_1 მანძილით. მივიჩნიოთ, რომ q მუხტი უძრავია და q_0 მუხტი გადაადგილდა L წერტილში რომელიც მისგან r_2 მანძილითაა დაშორებული (სურ. 91). ასევე დავუშვათ, რომ თავიდან სასინჯი q_0 მუხტი მოძრაობდა რადიუსის გასწვრივ BC მონაკვეთზე, შემდეგ კი – r_2 რადიუსის $\overline{CL}$ რკალზე. ცხადია, q მუხტის მიერ შექმნილი ელექტრული ველის შესრულებული მუშაობა q_0 მუხტის B წერტილიდან L წერტილში გადაადგილებაზე ტოლი იქნება BC და CL უბნებზე შესრულებული მუშაობის ჯამისა:

$$A_{BL} = A_{BC} + A_{CL}. \quad (1)$$

რადგან $\overline{CL}$ რკალზე მოძრაობისას ძალასა და გადაადგილებას შორის კუთხე ამ უბნის ნებისმიერ წერტილში 90° -ია, ელექტრული ველი ამ უბანზე მუშაობას არ ასრულებს: $A_{CL} = 0$. მაშასადამე, ველის მიერ შესრულებული სრული მუშაობის საპოვნელად საკმარისია ვიპოვოთ მისი მუშაობა დაძაბულობის წირის გასწვრივ BC უბანზე. ამ უბანზე სასინჯ მუხტზე ველის მხრიდან მოქმედი ძალა მუდმივი არ არის – ის წერტილიდან წერტილამდე იცვლება. ამიტომ ცვლადი ძალის მუშაობის საპოვნელად BC მონაკვეთი დავყოთ იმდენად მცირე უბნებად, რომ შეგვეძლოს თითოეულ უბანზე ძალა მუდმივად მივიჩნიოთ. ვიპოვოთ ყოველ უბანზე შესრულებული მუშაობა და შემდეგ შევეკრიბოთ.

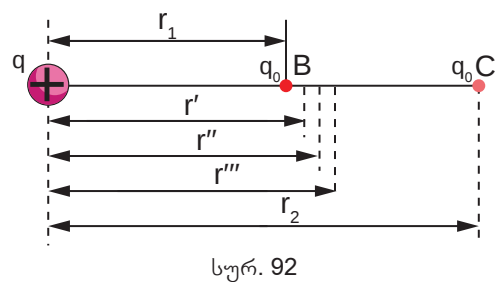
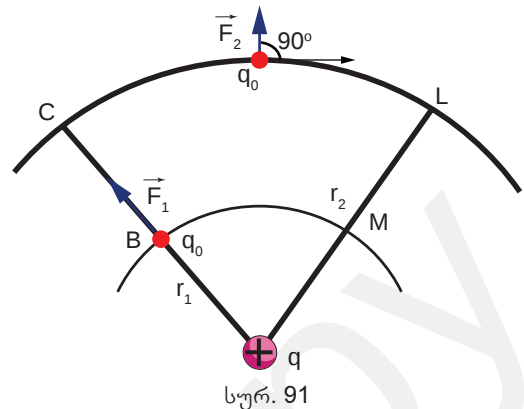
q მუხტიდან მცირე უბნების ბოლო წერტილებამდე მანძილები აღვნიშნოთ r' -ით, r'' -ით, r''' -ით, ... r_2 -ით (სურ. 92). B წერტილში სასინჯ მუხტზე მოქმედებს ძალა

$$F_1 = k \frac{qq_0}{\epsilon r_1^2}, \quad (2)$$

პირველი უბნის ბოლოს კი –

$$F' = k \frac{qq_0}{\epsilon r'^2}. \quad (3)$$

ვინაიდან $r_1 \approx r'$, ამიტომ $r_1^2 \approx r'^2 \approx r_1 r'$. შესაბამისად, $F_1 \approx F'$ და (2) და (3) ტოლობები შეგვიძლია შემდეგნაირად ჩავწეროთ:



$$F_1 \approx F' = k \frac{q q_0}{\epsilon r_1 r'} . \quad (4)$$

თუ ძალის მოდულის ამ მნიშვნელობას შესაბამისი გადაადგილების $s_1 = r' - r_1$ მოდულზე გავამრავლებთ, მივიღებთ პირველ მცირე უბანზე შესრულებულ A' მუშაობას:

$$A' = k \frac{q q_0}{\epsilon r_1 r'} (r' - r_1) = k \frac{q q_0}{\epsilon r_1} - k \frac{q q_0}{\epsilon_1 r'} . \quad (5)$$

(5) ტოლობის ანალოგიური ფორმულები მიიღება მომდევნო მცირე უბნებზე შესრულებული მუშაობისთვისაც:

$$A'' = k \frac{q q_0}{\epsilon r' r''} (r'' - r') = k \frac{q q_0}{\epsilon r'} - k \frac{q q_0}{\epsilon_1 r''} , \dots \quad (6)$$

ამ მუშაობების შეკრებით მივიღებთ სრულ მუშაობას BC უბანზე:

$$A = k \frac{q q_0}{\epsilon r_1} - k \frac{q q_0}{\epsilon r_2} . \quad (7)$$

თუ სასინჯი მუხტი ნებისმიერი სხვა ტრაექტორიით მივა B წერტილიდან L წერტილში, მაგალითად, BML ტრაექტორიით, იგივე შედეგი მიიღება. ე.ი. უძრავი წერტილოვანი მუხტის მიერ შექმნილი ელექტრული ველი პოტენციალურია, ამიტომ

$$A = W_{\text{პოტ1}} - W_{\text{პოტ2}} , \quad (8)$$

რომელშიც $W_{\text{პოტ1}}$ და $W_{\text{პოტ2}}$ სასინჯი მუხტის პოტენციალური ენერგებია, შესაბამისად, საწყის და ბოლო წერტილებში. (7) და (8) ტოლობების შედარებით მივიღებთ:

$$k \frac{q q_0}{\epsilon r_1} - k \frac{q q_0}{\epsilon r_2} = W_{\text{პოტ1}} - W_{\text{პოტ2}} \quad (9)$$

როგორც წესი, თვით პოტენციალური ენერგიის განსასაზღვრავად უნდა შევარჩიოთ მდგომარეობა, რომელშიც მას ნულის ტოლად მივიჩნევთ (ნულოვანი დონე). ორი წერტილოვანი მუხტის ურთიერთქმედებისას პოტენციალური ენერგია ნულის ტოლია, როდესაც მათ შორის მანძილი ძალიან დიდია ($r_2 \rightarrow \infty$).

ამრიგად, r მანძილით დაშორებული ორი წერტილოვანი q_1 და q_2 მუხტების ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია გამოისახება ფორმულით:

$$W_{\text{პოტ}} = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r} \quad (10)$$

ერთნაირნიშნის მუხტების ურთიერთქმედებისას პოტენციალური ენერგია დადებითია, სხვადასხვანიშნის მუხტების შემთხვევაში კი – უარყოფითი.



როცა ერთნაირნიშნის დამუხტული ნაწილაკები ერთმანეთს შორდება, როგორ იცვლება მათი პოტენციალური ენერგია? კინეტიკური ენერგია?



როცა სხვადასხვანიშნის დამუხტული ნაწილაკები ერთმანეთს შორდება, როგორ იცვლება მათი პოტენციალური ენერგია? კინეტიკური ენერგია?

დაკვნები:

- ერთმანეთისაგან r მანძილით დაშორებული ორი წერტილოვანი q_1 და q_2 მუხტების პოტენციალური ენერგია გამოისახება ფორმულით: $W_{\text{პოტ}} = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r}$;
- ძალიან დიდი მანძილით დაშორებული ორი წერტილოვანი მუხტის პოტენციალური ენერგია ნულის ტოლად მიჩნეული;
- ერთნაირნიშნის მუხტების ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია დადებითია, სხვადასხვანიშნის მუხტებისა კი – უარყოფითი.

საკონტროლო კითხვები:

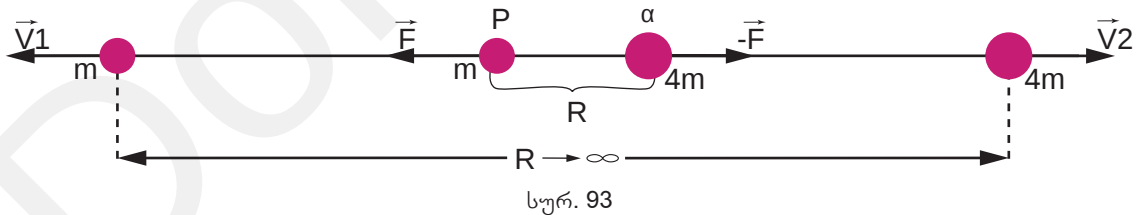
1. რატომაა რთული წერტილოვანი მუხტის ელექტრულ ველში მოძრავ მუხტზე მოქმედი ძალის მუშაობის გამოთვლა?
2. როცა ერთნაირნიშნის დამუხტული ნაწილაკები ერთმანეთს უახლოვდება, როგორ იცვლება მათი პოტენციალური ენერგია? კინეტიკური ენერგია?
3. როცა სხვადასხვანიშნის დამუხტული ნაწილაკები ერთმანეთს უახლოვდება, როგორ იცვლება მათი პოტენციალური ენერგია? კინეტიკური ენერგია?

საკითხის უკეთ გასააზრებლად შეგიძლიათ იხილოთ ბმულები: <https://is.gd/EhcLt5>



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

უძრავად მყოფ პროტონსა და α ნაწილაკს შორის მანძილი 1 მ-ია (სურ. 93). α ნაწილაკის მუხტი პროტონის მუხტზე ორჯერ მეტია, ხოლო მასა – 4-ჯერ მეტი. ურთიერთგანზიდვის ძალის გავლენით ისინი იწყებენ მოძრაობას საპირისპირო მიმართულებით. იპოვეთ მაქსიმალური სიჩქარეები, რომლებსაც ეს ნაწილაკები განავითარებს. გრავიტაციულ ურთიერთქმედებას ნუ გაითვალისწინებთ.



მოცემულია: $R_1 = 1\text{მ}$; $R_2 \rightarrow \infty$; $q_1 = |e|$; $q_2 = 2|e|$; $m_1 = m$; $m_2 = 4m$; $v_1 = ?$; $v_2 = ?$

ამოხსნა: სისტემას – პროტონი – α ნაწილაკი თავდაპირველად მხოლოდ პოტენცი-

ალური ენერგია აქვს. ეს ენერგია ტოლია: $W_{\text{პოტ}} = k \cdot \frac{|e| \cdot |2e|}{R}$. ურთიერთგანზიდვის გამო პროტონისა და α ნაწილაკის სიჩქარე თანდათან მოიმატებს და მაქსიმალურ მნიშვნელობას მაშინ მიაღწევს, როცა მათ შორის მანძილი ძალიან დიდი იქნება. ანუ, როცა $R \rightarrow \infty$. ასეთ მანძილზე მუხტების პოტენციალური ენერგია ნულის ტოლია, მაგრამ ნაწილაკებს ექნებათ მაქსიმალური სიჩქარე და, შესაბამისად, მაქსიმალური კინეტიკური

ენერგია. ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, $k \cdot \frac{|e| \cdot |2e|}{R} = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{4mv_2^2}{2}$, რომელშიც v_1 და v_2 , შესაბამისად, პროტონისა და α ნაწილაკის მაქსიმალური სიჩქარის მოდულებია, m და $4m$ კი – მათი მასები. პროტონისა და α ნაწილაკის სანწყისი იმპულსები ნულის ტოლია, ამიტომ ეს ნაწილაკები შეიძენს მოდულით ტოლ და მიმართულებით სანინაალმდეგო იმპულსს. ე.ი. $mv_1 = 4mv_2$, ანუ, $v_1 = 4v_2$. ამ შედეგის გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$k \cdot \frac{2e^2}{R} = \frac{m16v_2^2}{2} + \frac{4mv_2^2}{2}, \text{ აქედან } k \cdot \frac{2e^2}{R} = 10mv_2^2,$$

საიდანაც $v^2 = |e| \sqrt{\frac{k}{5mR}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \sqrt{\frac{9 \cdot 10^9}{5 \cdot 6,7 \cdot 10^{-27} \cdot 1}} \approx 0,08 \text{ მ/წმ}$. პროტონის სიჩქარე კი ტოლი იქნება: $v_1 = 4v_2 = 0,32 \text{ მ/წმ}$.

პასუხი: პროტონის მაქსიმალური სიჩქარე იქნება $0,32 \text{ მ/წმ}$, α ნაწილაკისა კი – $0,08 \text{ მ/წმ}$.



ამოხსენით ამოცანები

1. როგორ შეიცვლება ერთნაირი ნიშნით დამუხტული ორი ნერტილოვანი მუხტის ელექტრული ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია, თუ მათ შორის მანძილს გავზრდით? პასუხი დაასაბუთეთ.

2. როგორ შეიცვლება სხვადასხვა ნიშნით დამუხტული ორი ნერტილოვანი მუხტის ელექტრული ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია, თუ მათ შორის მანძილს გავზრდით? პასუხი დაასაბუთეთ.

3. თუ სხვადასხვა ნიშნის მქონე ორ ნერტილოვან მუხტებს ერთმანეთს მივუახლოვებთ, მაშინ ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა დადებითი იქნება თუ უარყოფითი? პასუხი დაასაბუთეთ.

4. განსაზღვრეთ 1 მ მანძილით დაშორებული $-5 \cdot 10^{-5} \text{ კ}$ და $-6 \cdot 10^{-5} \text{ კ}$ ნერტილოვანი მუხტების ელექტრული ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია*.

5. განსაზღვრეთ ორი ნერტილოვანი მუხტის ელექტრული ურთიერთქმედების თავდაპირველი პოტენციალური ენერგია, თუ მუხტებს შორის მანძილის 3-ჯერ გადიდების შემდეგ ენერგია $2,5 \text{ ჯ}$ გახდა.

6. დიდი მანძილით დაშორებული პროტონი და α ნაწილაკი, რომლის მუხტი 2-ჯერ მეტია პროტონისაზე, ერთმანეთს 30 სმ მანძილზე მიუახლოვეს. იპოვეთ ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა.

7. განსაზღვრეთ ორი ნერტილოვანი მუხტის ელექტრული ურთიერთქმედების თავდაპირველი პოტენციალური ენერგია, თუ მათ შორის მანძილის 2-ჯერ გადიდებით ენერგია 24 ჯ-ით გაიზარდა.

8. 12 ნკ მუხტის უძრავ ნაწილაკს უახლოვდება 4 ნკ მუხტის მეორე ნაწილაკი. იპოვეთ მეორე ნაწილაკის კინეტიკური ენერგიის ცვლილება ნაწილაკებს შორის მანძილის $3 \text{ მ-დან } 1 \text{ მ}$ მანძილამდე შემცირებისას.

9. თავდაპირველად უძრავ ელექტრონებს შორის მანძილი $0,5 \text{ მ-ია}$. იპოვეთ მათი კინეტიკური ენერგიები განთავისუფლების შემდეგ 2 მ მანძილზე დაშორებისას. გრაფიკული ურთიერთქმედება უმნიშვნელოა.

10. 1 გ მასისა და 1 მკკ მუხტის უძრავ ნაწილაკებს შორის მანძილი 1 მ-ია . იპოვეთ მათი მაქსიმალური სიჩქარეები განთავისუფლების შემდეგ. გრაფიკული ურთიერთქმედება უმნიშვნელოა.

* თუ ამოცანებში არ არის სპეციალური მითითება, იგულისხმეთ რომ გარემო ვაკუუმი.

§ 14 პოტენციალი. პოტენციალთა სხვაობა. წერტილოვანი მუხტის ველის პოტენციალი

ალბათ ბევრ თქვენგანს უნახავს წარწერები: „ფრთხილად, მაღალი ძაბვაა!“, „არ შეეხოთ, საშიშია!“ რას ნიშნავს მაღალი ძაბვა? რის გამო უნდა ვიყოთ ფრთხილად?

წინა პარაგრაფებში ვნახეთ, რომ ელექტროსტატიკურ ველში მოთავსებული წერტილოვანი მუხტის პოტენციალური ენერგია ამ მუხტის პროპორციულია. ამასთან, ეს მართებულია როგორც ერთგვაროვანი, ასევე არაერთგვაროვანი ველისთვის. შესაბამისად, **პოტენციალური ენერგიის შეფარდება მუხტთან არ არის დამოკიდებული ველში მოთავსებულ მუხტზე**. ეს საშუალებას გვაძლევს შემოვიღოთ ელექტრული ველის ენერგეტიკული მახასიათებელი – **პოტენციალი**, მსგავსად ელექტრული ველის ძალური მახასიათებლის – დაძაბულობისა.

ელექტროსტატიკური ველის წერტილის პოტენციალი ეწოდება მასში მოთავსებული წერტილოვანი მუხტის პოტენციალური ენერგიის შეფარდებას მუხტთან. პოტენციალს φ ასოთი აღნიშნავენ. ამრიგად,

$$\varphi = \frac{W_{\text{პოტ}}}{q_0}. \quad (1)$$

პოტენციალი სკალარული სიდიდეა. ის განსაზღვრავს მუხტის პოტენციალურ ენერგიას ველის მოცემულ წერტილში. რადგან პოტენციალური ენერგია დამოკიდებულია ნულოვანი დონის არჩევაზე, ამიტომ ეს მართებულია პოტენციალისთვისაც. ელექტრული ველის მიერ მუხტის გადატანაზე შესრულებული მუშაობა კი პოტენციალური ენერგიის საწყისი და საბოლოო მნიშვნელობათა სხვაობის ტოლია და ნულოვანი დონის არჩევაზე დამოკიდებული არ არის:

$$A = W_{\text{პოტ1}} - W_{\text{პოტ2}}. \quad (2)$$

თუ (1) ტოლობიდან პოტენციალურ ენერგიას განვსაზღვრავთ და (2)-ში ჩავსვათ, მივიღებთ:

$$A = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2), \quad (3)$$

რომელშიც φ_1 ველის პოტენციალია q_0 მუხტის საწყისი მდებარეობის წერტილში, ხოლო φ_2 – საბოლოო წერტილში. (3)-დან გამომდინარეობს, რომ პოტენციალთა სხვაობა ნულოვანი დონის არჩევაზე დამოკიდებული არ არის.

პოტენციალთა სხვაობას ძაბვას უწოდებენ და U ასოთი აღნიშნავენ:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q_0}. \quad (4)$$

ელექტროსტატიკური ველის ორ წერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობა (ძაბვა) ტოლია საწყისი წერტილიდან ბოლო წერტილში ველის მიერ მუხტის გადატანაზე შესრულებული მუშაობის შეფარდებისა ამ მუხტთან.

პოტენციალთა სხვაობის (შესაბამისად, პოტენციალის) განზომილებას (4) ფორმულის საშუალებით ადგენენ.

ველის ორ წერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობა ერთის ტოლია, თუ ერთი წერტილიდან მეორეში 1 კ მუხტის გადატანისას ელექტრული ველი 1 ჯ მუშაობას ასრულებს.



ალესანდრო ვოლტა
(1745– 1827)

SI-ში პოტენციალთა სხვაობის ერთეულია 1ვოლტი (ვ), ცნობილი იტალიელი ფიზიკოსის ალესანდრო ვოლტას პატივსაცემად. $1 \text{ ვ} = 1 \text{ ჯ/1კ}$.

თუ ერთგვაროვანი ელექტრული ველი შექმნილია სხვადასხვა ნიშნით დამუხტული ორი ბრტყელი, პარალელური, დიდი ზომის ფირფიტით და ნულოვან დონედ ავირჩევთ უარყოფითად დამუხტულ ფირფიტას, მაშინ ამ ველის რაიმე წერტილის პოტენციალისათვის გვექნება:

$$\varphi = \frac{W_{\text{პოტ}}}{q_0} = \frac{q_0 \cdot Ed}{q_0} = Ed, \quad (5)$$

რომელშიც d უარყოფითად დამუხტული ფირფიტიდან მოცემულ წერტილამდე მანძილია.

წერტილოვანი მუხტის ელექტროსტატიკურ ველისათვის პოტენციალის ნულოვან დონედ მუხტიდან უსასრულოდ დაშორებული წერტილი ავირჩიოთ (როცა $r \rightarrow \infty$, $\varphi \rightarrow 0$). მაშინ ამ ველის რაიმე წერტილის პოტენციალისთვის გვექნება:

$$\varphi = \frac{W_{\text{პოტ}}}{q_0} = \frac{kq \cdot q_0}{\varepsilon r} = \frac{kq}{\varepsilon r}, \quad (6)$$

რომელშიც r მუხტიდან ველის მოცემულ წერტილამდე მანძილია.

თუ ელექტრული ველი შექმნილია რამდენიმე მუხტით, მაშინ ველის ჯამური პოტენციალი რაიმე წერტილში თითოეული მუხტის მიერ ამ წერტილში შექმნილი ველების პოტენციალების ჯამის ტოლია: $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n$. ეს პრინციპი შეიძლება გამოვიყენოთ რაიმე ზედაპირზე თანაბრად განაწილებული მუხტის მიერ შექმნილი პოტენციალის საპოვნელად მოცემულ წერტილში.

(6) ფორმულით შეგვიძლია ვისარგებლოთ თანაბრად დამუხტული სფეროს მიერ შექმნილი ელექტროსტატიკური ველის წერტილის პოტენციალის გამოსათვლელადაც, ოღონდ იმ წერტილებში, რომლებისთვისაც $r \geq R$ (R სფეროს რადიუსია, r – მანძილი სფეროს ცენტრიდან მოცემულ წერტილამდე).

დადებითი წერტილოვანი მუხტის მიერ შექმნილი ველის პოტენციალი მის ნებისმიერ წერტილში დადებითია, უარყოფითი მუხტისა კი – უარყოფითი. თუ წერტილოვანი დადებითი მუხტი მაღალი პოტენციალის წერტილიდან დაბალი პოტენციალის წერტილისკენ მოძრაობს, მისი სიჩქარის მოდული იზრდება. ასევე იზრდება უარყოფითი წერტილოვანი მუხტის სიჩქარის მოდული, თუ ის დაბალი პოტენციალის წერტილიდან მაღალი პოტენციალის წერტილისაკენ მოძრაობს.

კინეტიკურ ენერგიას, რომელსაც შეიძენს ელექტრონი ელექტროსტატიკური ველის დაბალი პოტენციალის წერტილიდან მაღალი პოტენციალის წერტილამდე მოძრაობისას, როცა ამ წერტილებს შორის ძაბვა 1 ვ-ია, 1 ელექტრონვოლტი ეწოდება.

1 ელექტრონვოლტი (1 ევ) ენერგიის სისტემის გარეშე ერთეულია, რომელიც $A = q_0 U$ ფორმულის გამოყენებით შეგვიძლია გამოვსახოთ ჯოულებში: $q_0 = e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ კ}$, $U = -1 \text{ ვ}$, ამიტომ, $1 \text{ ევ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ ჯ}$. როგორც ვხედავთ, 1 ევ ძალიან მცირე ენერგიაა, მაგრამ ამ ერთეულს ხშირად იყენებენ ელემენტარული ნაწილაკების მოძრაობის შესწავლისას.

დაკვნები:

- ელექტროსტატიკური ველის ნერტილის პოტენციალი ეწოდება მასში მოთავსებული ნერტილოვანი მუხტის პოტენციალური ენერგიის შეფარდებას მუხტთან. $\varphi = \frac{W_{\text{პოტ}}}{q_0}$;
- ელექტროსტატიკური ველის ორ ნერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობა (ძაბვა) ტოლია საწყისი ნერტილიდან ბოლო ნერტილში ველის მიერ მუხტის გადატანაზე შესრულებული მუშაობის შეფარდებისა ამ მუხტთან: $U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q_0}$;
- SI-ში პოტენციალთა სხვაობის ერთეულია 1ვოლტი(ვ). ის ველის იმ ორ ნერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობის ტოლია, რომელთა შორის 1 კ მუხტის გადატანისას ელექტრული ველი 1 ჯ მუშაობას ასრულებს: 1 ვ = 1 ჯ/1კ;
- ერთგვაროვანი ელექტრული ველის პოტენციალი რაიმე ნერტილში გამოითვლება ფორმულით: $\varphi = Ed$;
- ნერტილოვანი მუხტის ველის პოტენციალი რაიმე ნერტილში გამოითვლება ფორმულით: $\varphi = k \frac{q}{r}$;
- თუ ელექტრული ველი შექმნილია რამდენიმე მუხტით, მაშინ ველის ჯამური პოტენციალი რაიმე ნერტილში თითოეული მუხტის მიერ ამ ნერტილში შექმნილი ველის პოტენციალების ჯამის ტოლია: $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n$;
- კინეტიკურ ენერგიას, რომელსაც შეიძენს ელექტრონი ელექტროსტატიკური ველის დაბალი პოტენციალის ნერტილიდან მაღალი პოტენციალის ნერტილამდე მოძრაობისას, როცა ამ ნერტილებს შორის ძაბვა 1 ვ-ია, 1 ელექტრონვოლტი ეწოდება. 1 ევ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ ჯ.

საკონტროლო კითხვები:

1. ელექტრული ველის როგორი მახასიათებელია პოტენციალი, ძალური თუ ენერგეტიკული?
2. როგორ გამოითვლება თანაბრად დამუხტული სფეროს მიერ შექმნილი ელექტროსტატიკური ველის ნერტილის პოტენციალი?
3. რა ნიშნის პოტენციალს ქმნის დადებითი მუხტი? უარყოფითი მუხტი?
4. როგორ იცვლება პროტონის კინეტიკური ენერგია, თუ ის მაღალი პოტენციალის ნერტილიდან დაბალი პოტენციალის ნერტილში გადადის?

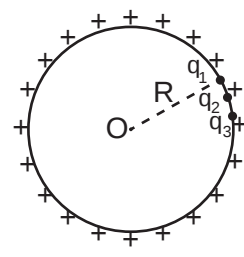


ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

განსაზღვრეთ R რადიუსის მქონე თანაბრად დამუხტული სფეროს პოტენციალი მის ცენტრში, თუ სფეროს მუხტია q.

მოცემულია: R; q. $\varphi = ?$

ამოხსნა: როგორც იცით, როდესაც ელექტრული ველი შექმნილია რამდენიმე მუხტით, მაშინ ველის ჯამური პოტენციალი რაიმე წერტილში თითოეული მუხტის მიერ ამ წერტილში შექმნილი ველების პოტენციალების ჯამის ტოლია: $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n$. გამოვიყენოთ ეს პრინციპი სფეროს ცენტრში პოტენციალის საპოვნელად. ამისათვის სფეროს ზედაპირზე თანაბრად განაწილებული q მუხტი დავყოთ იმდენად მცირე $q_1, q_2, q_3, \dots$ მუხტებად, რომ თითოეული შეგვეძლოს წერტილოვნად მივიჩნიოთ (სურ. 94).



სურ. 94

მაშინ ეს მუხტები სფეროს ცენტრში შექმნის $\varphi_1 = k \frac{q_1}{R}$, $\varphi_2 = k \frac{q_2}{R}$,
 $\dots \varphi_n = k \frac{q_n}{R}$ პოტენციალებს. ჯამური პოტენციალი სფეროს ცენტრში კი ტოლი იქნება:
 $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n = k \frac{q_1}{R} + k \frac{q_2}{R} + \dots + k \frac{q_n}{R} = \frac{k}{R} (q_1 + q_2 + \dots + q_n)$. მაგრამ $q_1 + q_2 + \dots + q_n = q$ სფეროს მთლიანი მუხტია. ამიტომ მივიღებთ: $\varphi = k \frac{q}{R}$.

პასუხი: R რადიუსის მქონე თანაბრად დამუხტული სფეროს პოტენციალი მის ცენტრში, თუ სფეროს მუხტია q , გამოითვლება ფორმულით: $\varphi = k \frac{q}{R}$. ის სფეროს ზედაპირის პოტენციალის ტოლია.



ამოხსენით ამოცანები

- ელექტრული ველის რომელიმე წერტილში მოთავსებულ 7 ნკ მუხტს $21 \cdot 10^{-9}$ ჯ პოტენციალური ენერგია აქვს. იპოვეთ პოტენციალი ამ წერტილში.
- განსაზღვრეთ $16 \cdot 10^{-8}$ კ წერტილოვანი მუხტის ელექტრული ველის პოტენციალი წერტილში, რომელიც მუხტიდან 150 სმ-ით არის დაშორებული*.
- დადებითი წერტილოვანი მუხტის ელექტრული ველის ორ წერტილში პოტენციალები 4 -ჯერ განსხვავდება ერთმანეთისგან. რამდენჯერ განსხვავდება ერთმანეთისგან შესაბამის წერტილებში ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდულები?
- იპოვეთ პოტენციალითა სხვაობა 48 მკვ წერტილოვანი მუხტიდან 3 და 4 მ-ით დაშორებულ ორ წერტილს შორის.
- გამოთვალეთ პოტენციალი წერტილში, რომელიც ერთნაირი, 25 სმ მანძილითაა დაშორებული 12 ნკ და 24 ნკ წერტილოვანი მუხტებიდან.
- წერტილში, რომელიც $-36 \cdot 10^{-7}$ კ და $+26 \cdot 10^{-7}$ კ წერტილოვანი მუხტიდან ერთნაირი 0.6 მ მანძილითაა დაშორებული, მოთავსეს მესამე 4 მკვ წერტილოვანი მუხტი. გამოთვალეთ ამ მუხტის ველთან ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია.
- $+18q$ და $-6q$ წერტილოვანი მუხტებს შორის მანძილი 2 მ-ია. მუხტებზე გავლებულ წრფეზე, მცირე მუხტიდან რა მანძილით დაშორებულ წერტილებში იქნება ელექტრული ველის ჯამური პოტენციალი ნულის ტოლი?
- განსაზღვრეთ ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა $22 \cdot 10^{-5}$ კ მუხტის გადაადგილებისას 100 ვ პოტენციალის მქონე წერტილიდან 150 ვ პოტენციალის მქონე წერტილში.
- α გვერდის მქონე კვადრატის ოთხივე წვეროში მოთავსებულია $+q$ წერტილოვანი მუხტი. რა მუშაობას შეასრულებს ელექტრული ველი ერთ-ერთი მუხტის უსასრულოდ დაშორებულ წერტილში გადატანისას?
- წერტილოვანი მუხტის ველის ძალწირის A და B წერტილებში პოტენციალები, შესაბამისად, 200 ვ და 50 ვ-ია. იპოვეთ პოტენციალი AB მონაკვეთის შუა წერტილში.

* თუ ამოცანებში არ არის სპეციალური მითითება, იგულისხმეთ რომ გარემო ვაკუუმი.

§15 ეკვიპოტენციალური ზედაპირები. კავშირი ერთგვაროვანი ელექტრული ველის დაძაბულობასა და პოტენციალთა სხვაობას შორის

შესაძლებელია თუ არა, რომ ელექტროსტატიკურ ველში მუხტი შეკრულ ტრაექტორიაზე არ გადაადგილდებოდეს, მაგრამ ელექტრული ველის მუშაობა მაინც ნულის ტოლი იყოს?



თუ სხეულზე მოქმედებს მუდმივი $\vec{F}$ ძალა და სხეულმა შეასრულა $\vec{s}$ გადაადგილება, მაშინ ამ ძალის მიერ შესრულებული მუშაობა ტოლია:

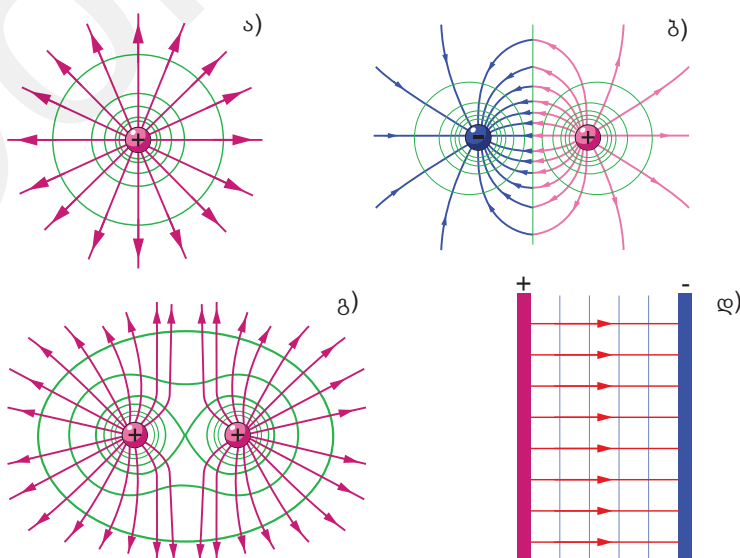
$$A = F s \cos \alpha,$$

რომელშიც α კუთხეა ძალასა და გადაადგილებას შორის. როცა $\alpha = 90^\circ$, მაშინ $\cos \alpha = 0$, და $A = 0$, ანუ გადაადგილების მართობული ძალა მუშაობას არ ასრულებს.

ელექტრული ველის ნებისმიერ წერტილში მოთავსებულ მუხტზე მოქმედი ელექტრული ძალა ყოველთვის მიმართულია დაძაბულობის გასწვრივ. ამიტომ წერტილოვანი მუხტის დაძაბულობის წირებისადმი მართი კუთხით გადაადგილებისას ელექტრული ველი მუშაობას არ ასრულებს. მაშასადამე, თუ ავაგებთ ისეთ ზედაპირს, რომლის ყოველ წერტილში დაძაბულობა ამ ზედაპირის მართობული იქნება, მაშინ მასზე მუხტის გადაადგილებისას მუშაობა არ შესრულდება. ეს კი, $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q_0}$ ფორმულის თანახმად, ნიშნავს, რომ ასეთი ზედაპირის ნებისმიერ ორ წერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობა ნულის ტოლია, ანუ მისი ყველა წერტილის პოტენციალი ერთნაირია.

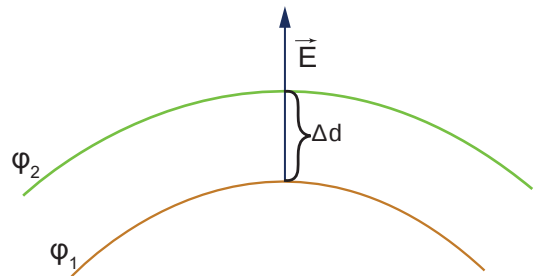
ზედაპირს, რომლის ყველა წერტილში ელექტრული ველის პოტენციალს ერთი და იგივე მნიშვნელობა აქვს, ეკვიპოტენციალური ზედაპირი ეწოდება.

სურ. 95 ა), ბ), გ) და დ)-ზე, შესაბამისად, გამოსახულია წერტილოვანი მუხტის, დიპოლის, ერთსახელა წერტილოვანი მუხტებისა და ერთგვაროვანი ელექტროსტატიკური ველის ეკვიპოტენციალური ზედაპირები. ნითელი ფერით ნაჩვენებია დაძაბულობის წირები, ლურჯი ფერით – ეკვიპოტენციალური ზედაპირები. წერტილოვანი მუხტის ეკვიპოტენციალური ზედაპირები სფეროებია, რომელთა ცენტრი მუხტს ემთხვევა (სურ. 95 ა), ხოლო ერთგვაროვანი ელექტრული ველისა – ძალწირების მართობული ერთმანეთის პარალელური სიბრტყეები (სურ. 95 დ).



სურ. 95

ელექტრული ველის ყოველ წერტილს პოტენციალისა და დაძაბულობის გარკვეული მნიშვნელობა შეესაბამება. რა კავშირია ამ ორ ფიზიკურ სიდიდეს შორის? ამ კითხვაზე პასუხის გასაცემად გამოვთვალოთ ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა იმ შემთხვევაში, როდესაც მუხტი ორ მეზობელ ეკვიპოტენციალურ ზედაპირს შორის მათ მართობულად გადაადგილდება. ექვიპოტენციალურ ზედაპირების შორის Δd მანძილი იმდენად მცირე ავიღოთ, რომ შეგვეძლოს ველი ერთგვაროვნად მივიჩნიოთ (სურ. 96). ამ უბანზე ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობისათვის გვექნება ტოლობა:



სურ. 96

$$\Delta A = qE\Delta d. \quad (1)$$

მეორე მხრივ, თუ წერტილოვანი მუხტი გადაადგილდა $\phi_1 = \phi$ პოტენციალის მქონე წერტილიდან $\phi_2 = \phi + \Delta\phi$ პოტენციალის მქონე წერტილში, ეს მუშაობა ტოლი იქნება:

$$\Delta A = q(\phi_1 - \phi_2) = -q\Delta\phi. \quad (2)$$

თუ (1) და (2) ფორმულებით გამოსახულ მუშაობას ერთმანეთს გავუტოლებთ, მივიღებთ:

$$E = -\frac{\Delta\phi}{\Delta d}. \quad (3)$$

იმ შემთხვევაში, როცა ელექტრული ველი ერთგვაროვანია, Δd მანძილად შეიძლება ავიღოთ დაძაბულობის წირის გასწვრივ ველის ნებისმიერ ორ წერტილს შორის მანძილი. თუ $\Delta d = d$, მაშინ (3) ტოლობა შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$E = -\frac{\phi_2 - \phi_1}{d} = \frac{\phi_1 - \phi_2}{d}. \quad (4)$$

მაგრამ $\phi_1 - \phi_2 = U$, ამიტომ

$$E = \frac{U}{d}. \quad (5)$$

ეს ფორმულა გამოსახავს კავშირს ველის დაძაბულობასა და პოტენციალთა სხვაობას (ძაბვას) შორის და გვიჩვენებს, რომ რაც უფრო მეტად იცვლება პოტენციალი მოცემულ მანძილზე, მით მეტია ველის დაძაბულობა.

(4)-დან გამომდინარეობს, რომ ელექტრული ველის დაძაბულობა შეიძლება გაიზომოს ვ/მ-ში.

დაძაბულობის წირების მსგავსად, ეკვიპოტენციალური ზედაპირებიც თვისობრივად ახასიათებს სივრცეში ელექტრული ველის განაწილებას. დაძაბულობის ვექტორი ეკვიპოტენციალური ზედაპირის მართობულია და პოტენციალის კლების მხარესაა მიმართული.

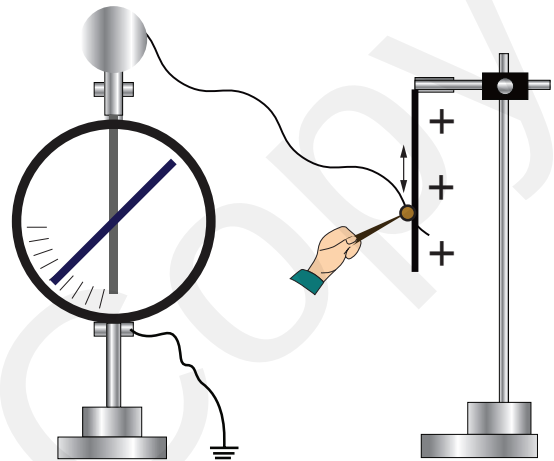
ეკვიპოტენციალურ ზედაპირებს ისე აგებენ, რომ პოტენციალთა სხვაობა ორ მეზობელ ზედაპირს შორის მუდმივი იყოს. ვინაიდან წერტილოვანი მუხტიდან დაშორების მიხედვით ელექტრული ველის დაძაბულობა იკლებს, ამიტომ (4) ფორმულის თანახმად, მანძილი მეზობელ ეკვიპოტენციალურ ზედაპირებს შორის მატულობს (სურ. 95 ა). ერთგვაროვანი ველის ეკვიპოტენციალური ზედაპირები კი ერთმანეთისაგან ტოლი მანძილითაა დაშორებული.

როგორც იცით, ელექტროსტატიკურ ველში მოთავსებული გამტარის გარეთ, ზედაპირთან ახლოს, ველის დაძაბულობის წირები ზედაპირის მართობულია. ეს ნიშნავს, რომ ველში მოთავსებული ნებისმიერი გამტარის ზედაპირი ეკვიპოტენციალურია. გამტარის შიგნით ველის დაძაბულობა ნულის ტოლია, ამიტომ ნულის ტოლი იქნება პოტენციალთა სხვაობაც ნებისმიერ ორ წერტილს შორის, ანუ გამტარის შიგნითაც და მის ზედაპირზეც ყველა წერტილს ერთნაირი პოტენციალი აქვს.

ასევე ერთნაირი პოტენციალი აქვს დამუხტული გამტარის ნებისმიერ წერტილს. ამაში შეიძლება დავრწმუნდეთ შემდეგი ცდით:



ავიღოთ იზოლატორის სადგამზე დამაგრებული დამუხტული გამტარი. ელექტრომეტრის კორპუსი დავამიწოთ, დერო კი მავთულით შევაერთოთ იზოლატორის სახელურზე დამაგრებულ ლითონის ბურთულასთან (სურ. 97). თუ მას გამტარის სხვადასხვა წერტილს მივადებთ, დავინახავთ, რომ ელექტრომეტრის ჩვენება ერთნაირი იქნება, ე.ი გამტარის ყველა წერტილის პოტენციალი ერთნაირია.



სურ. 97

დაკვნები:

- ზედაპირს, რომლის ყველა წერტილში ელექტრული ველის პოტენციალს ერთი და იგივე მნიშვნელობა აქვს, ეკვიპოტენციალური ზედაპირი ეწოდება;
- კავშირი ველის დაძაბულობასა და პოტენციალთა სხვაობას შორის ერთგვაროვანი ელექტრული ველისათვის გამოისახება ფორმულით: $E = \frac{U}{d}$;
- SI-ში 1 ნ/კ-თან ერთად დაძაბულობის ერთეულია 1 ვ/მ;
- ელექტრული ველის დაძაბულობის ვექტორი ეკვიპოტენციალური ზედაპირის მართობულია და პოტენციალის კლების მხარესაა მიმართული;
- ეკვიპოტენციალური ზედაპირების აგებისას, ყოველ ორ მეზობელ ეკვიპოტენციალურ ზედაპირს შორის პოტენციალთა სხვაობა ერთი და იგივეა უნდა იყოს;
- ელექტროსტატიკურ ველში მოთავსებული გამტარის ყველა წერტილს ერთი და იგივე პოტენციალი აქვს;
- დამუხტული გამტარის ყველა წერტილს ერთი და იგივე პოტენციალი აქვს.

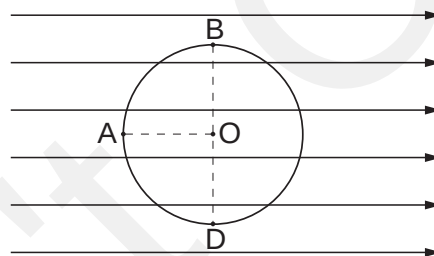
საკონტროლო კითხვები:

1. რატომაა ეკვიპოტენციალური ზედაპირის ყოველ წერტილში დაძაბულობის ვექტორი მისი მართობული?
2. რას წარმოადგენს ერთგვაროვანი ელექტრული ველის ეკვიპოტენციალური ზედაპირები?
3. რას წარმოადგენს წერტილოვანი მუხტის ეკვიპოტენციალური ზედაპირები?
4. წერტილოვანი მუხტიდან დაშორების მიხედვით, რატომ იზრდება მანძილი ეკვიპოტენციალურ ზედაპირებს შორის?
5. რატომაა გამტარის ზედაპირის ყველა წერტილის პოტენციალი ერთნაირი?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

3 კვ/მ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში 40 სმ რადიუსის წრეწირზე ბრუნავს -4 მკკ მუხტის მქონე ნაწილაკი (სურ. 98). იპოვეთ A წერტილიდან B წერტილში, ასევე B-დან D-ში ნაწილაკის გადაადგილებისას ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა და ძაბვა მოცემულ წერტილებს შორის.



სურ. 98

მოცემულია: $E = 3 \text{ კვ/მ} = 3 \cdot 10^3 \text{ ვ/მ}$; $q = -4 \text{ მკკ} = -3 \cdot 10^{-6} \text{ კ}$; $R = 40 \text{ სმ} = 0,4 \text{ მ}$.

$A_{AB} = ?$; $A_{BD} = ?$; $U_{AB} = ?$; $U_{BD} = ?$; $U_{AD} = ?$.

ამოხსნა: აღვნიშნოთ წრეწირის ცენტრი O-თი. B, O და D წერტილები მდებარეობს ერთ სიბრტყეში, რომელიც დაძაბულობის ვექტორის მართობულია, ამიტომ ეს სიბრტყე ეკვიპოტენციალურია. ე.ი. $\varphi_B = \varphi_O = \varphi_D$. შესაბამისად, $A_{AB} = A_{AO} = q \cdot E \cdot AO = q \cdot E \cdot R$. ველის მიერ შესრულებული ეს მუშაობა უარყოფითია, რადგან უარყოფითი მუხტი ველის დაძაბულობის მიმართულებით გადაადგილდება.

ე.ი. $A_{AB} = -3 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 0,4 = -3,6 \cdot 10^{-3} \text{ ჯ}$. მეორეს მხრივ, $A_{AB} = q(\varphi_A - \varphi_B)$. აქედან

$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{A}{q} = \frac{-3,6 \cdot 10^{-3}}{-3 \cdot 10^{-6}} = 1,2 \cdot 10^3 \text{ (ვ)}.$$

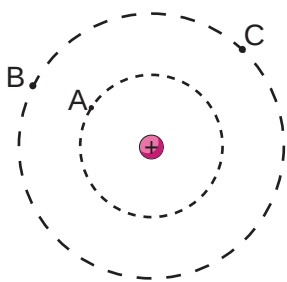
$A_{BD} = q(\varphi_B - \varphi_D)$. ვინაიდან $\varphi_B = \varphi_D$, ამიტომ $A_{BD} = 0$ და $U_{BD} = 0$. $U_{AD} = U_{AB} = 1,2 \cdot 10^3 \text{ (ვ)}$.

პასუხი: $A_{AB} = -3,6 \cdot 10^{-3} \text{ ჯ}$; $A_{BD} = 0$; $U_{AD} = U_{AB} = 1,2 \cdot 10^3 \text{ ვ}$; $U_{BD} = 0$.

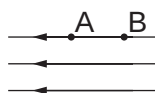


ამოხსენით ამოცანები

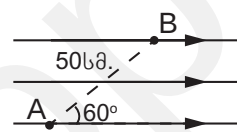
1. რისი ტოლია ეკვიპოტენციალურ ზედაპირზე მუხტის გადაადგილებისას ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა?
2. სურათ 99-ზე გამოსახულია წერტილოვანი მუხტის მიერ შექმნილი ელექტრული ველის ეკვიპოტენციალური ზედაპირები. შეადარეთ ერთმანეთს A და B-ში და A და C-ში მუხტის გადაადგილებაზე ველის მიერ შესრულებული მუშაობა.
3. შეადარეთ სურათ 100-ზე გამოსახული ელექტრული ველის A და B წერტილის პოტენციალები ერთმანეთს.
4. განსაზღვრეთ ძაბვა სურათ 101-ზე გამოსახული 2000 ვ/მ დაძაბულობის ერთგვაროვანი ელექტრული ველის A და B წერტილებს შორის.



სურ. 99



სურ. 100



სურ. 101

5. გვაქვს ორი ბრტყელი, პარალელური, მოდულით ტოლი და საპირისპირო ნიშნით თანაბრად დამუხტული ფირფიტა, რომელთა შორის მანძილი ბევრად ნაკლებია მათ ზომებზე. იპოვეთ ძაბვა ფირფიტებს შორის, თუ ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული მათ შორის 1500 ვ/მ-ია, მანძილი კი – 3 მმ.
6. გვაქვს ორი ბრტყელი, პარალელური, მოდულით ტოლი და საპირისპირო ნიშნით თანაბრად დამუხტული ფირფიტა, რომელთა შორის მანძილი ბევრად ნაკლებია მათ ზომებზე. განსაზღვრეთ ფირფიტებს შორის ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული, თუ ძაბვა ფირფიტებს შორის 240 ვ-ია, ფირფიტებს შორის მანძილი კი – 4 სმ.
7. დამუხტული R რადიუსიანი ლითონის ბურთულის ზედაპირის პოტენციალია φ . იპოვეთ იმ წერტილის პოტენციალი, რომელიც ბურთულის ცენტრიდან $R/3$ მანძილითაა დაშორებული.
8. 36 სმ რადიუსის ლითონის ბურთულის მუხტია 16 ნკ. იპოვეთ ელექტრული ველის პოტენციალი ბურთულის ცენტრიდან 18 სმ-ით დაშორებულ წერტილში.
9. 24 სმ რადიუსის მქონე დამუხტული გამტარი ბურთულის პოტენციალი ცენტრიდან 12 სმ-ზე 100 ვ-ია. რისი ტოლია ელექტრული ველის პოტენციალი ბურთულის ცენტრიდან 48 სმ-ით დაშორებულ წერტილში?
10. დამუხტული ლითონის ბურთულის ცენტრიდან 2 სმ მანძილზე ელექტრული ველის პოტენციალი 12 ვ-ია, ბურთულის ცენტრიდან 10 სმ მანძილზე კი – 6 ვ. იპოვეთ ბურთულის რადიუსი.

§17 ელექტროტევადობა

რა მასის სითხე ჩაეტევა ჭურჭელში? ცხადია, ეს დამოკიდებულია ჭურჭლის მოცულობაზე – ტევადობაზე. თუ სითხის მასა იმდენად დიდია, რომ მისი მოცულობა ჭურჭლის მოცულობას აღემატება, სითხე გადმოიღვრება.

დავსვათ ანალოგიური კითხვა: რა მუხტის დაგროვება შეიძლება **განმხილვად** – სხვა სხეულებიდან ძალიან დიდი მანძილით დაშორებულ გამტარზე? ცხადია, ეს დამოკიდებულია გამტარის „ტევადობაზე“. თუ დამუხტული გამტარის ზედაპირის პოტენციალი ძალიან გაიზრდება, განზიდვის გამო მუხტები დაიწყებს მისი ზედაპირის დატოვებას. ე.ი. გამტარზე მხოლოდ განსაზღვრული სიდიდის მუხტის დაგროვება შეიძლება – ყველა გამტარს განსაზღვრული ელექტრული ტევადობა აქვს.

ავიღოთ r რადიუსის მქონე განმხილვადი სფერული გამტარი. მისთვის q მუხტის მინიჭებისას სფეროს გარემომცველ სივრცეში აღიძვრება ელექტრული ველი, რომლის მახასიათებელი ფიზიკური სიდიდე – პოტენციალი სფეროს ზედაპირზე ტოლი იქნება:

$$\varphi = \frac{k}{\varepsilon} \cdot \frac{q}{r}. \quad (1)$$

ამ ფორმულიდან ჩანს, რომ სფეროს ზედაპირის პოტენციალი მასზე არსებული მუხტის პირდაპირპროპორციულია. ამიტომ სფეროს მუხტის შეფარდება მის პოტენციალთან –

$$\frac{q}{\varphi} = \frac{\varepsilon r}{k} \quad (2)$$

მუხტზე დამოკიდებული არ არის. ეს შეფარდება დამოკიდებულია მხოლოდ სფეროს რადიუსზე და იმ გარემოს დიელექტრიკულ შეღწევადობაზე, რომელშიც სფეროა მოთავსებული.

თუ გავიმეორებთ §15-ის ბოლოს ჩატარებულ ცდას, ოღონდ ჯერ ელექტრომეტრით დავაფიქსირებთ q მუხტის მქონე განმხილვადი გამტარის პოტენციალს, შემდეგ კი $q/2$ მუხტის მქონე ამავე გამტარის პოტენციალს, დავრწმუნდებით, რომ გამტარის პოტენციალი მისი მუხტის პროპორციულია. ე.ი. **ნებისმიერი ფორმის გამტარის მუხტის შეფარდება მის პოტენციალთან მუხტის სიდიდეზე დამოკიდებული არ არის და განისაზღვრება მხოლოდ მისი გეომეტრიული ზომებით და გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობით.** ეს საშუალებას გვაძლევს შემოვიღოთ განმხილვადი გამტარის ელექტროტევადობის ცნება.

განმხილვადი გამტარის ელექტროტევადობა ეწოდება მისი q მუხტის შეფარდებას φ პოტენციალთან. ელექტროტევადობას C ასოთი აღნიშნავენ. ე.ი.

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (3)$$

გამტარის ელექტროტევადობა არც მის შემადგენელ ნივთიერებაზეა დამოკიდებული – ერთნაირი გეომეტრიული ზომების მქონე განსხვავებული გამტარების ელექტროტევადობები ტოლია.

ელექტროტევადობის ცნება შემოღებულ იქნა ჭურჭლის ტევადობის ანალოგიით. რაც უფრო დიდია ცილინდრული ჭურჭლის ფუძის ფართობი, მით უფრო ნაკლებად გაიზრდება სითხის სიმაღლე მისი დამატებისას. რაც მეტია გამტარის ელექტროტევადობა, მით უფრო ნაკლებად გაიზრდება მისი პოტენციალი მუხტის გადაცემისას.

SI-ში ელექტროტევადობის ერთეულია 1 ფარადა (ფ), ინგლისელი ფიზიკოსის მაიკლ ფარადეის პატივსაცემად. ეს ერთეული შემოღებულია (3) ფორმულის მიხედვით.

1 ფარადა იმ გამტარის ელექტროტევადობაა, რომლის პოტენციალი იზრდება 1 ვ-ით მისთვის 1 კ მუხტის გადაცემისას. $1\text{ფ}=1\text{კ}/1\text{ვ}$.

ზემოთ უკვე ვნახეთ, რომ r რადიუსიანი განმხოლოებული გამტარი სფეროს მუხტის შეფარდება მის პოტენციალთან, ანუ სფეროს ელექტროტევადობა ტოლია:

$$C = \frac{q}{\phi} = \frac{er}{k} \quad (4)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, სფეროს ელექტროტევადობა შეიძლება ასეც ჩავწეროთ:

$$C = 4\pi\epsilon_0 er. \quad (5)$$

(4) ფორმულის გამოყენებით შეგვიძლია წარმოდგენა შევიქმნათ 1 ფ ელექტროტევადობის სიდიდეზე. 1 ფ ელექტროტევადობა აქვს ვაკუუმში ($\epsilon = 1$) მოთავსებულ გამტარ სფეროს, რომლის r რადიუსი რიცხობრივად k -ს ტოლია, ანუ

$$r = 9 \cdot 10^9 \text{მ} = 9 \cdot 10^6 \text{კმ},$$

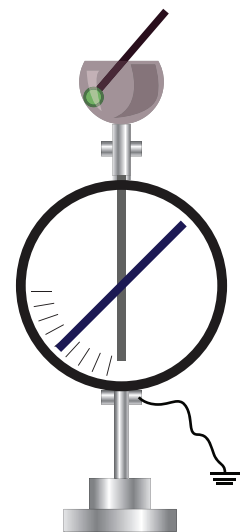
რაც 13-ჯერ აღემატება მზის რადიუსს. ე.ი. 1 ფ ძალიან დიდი ელექტროტევადობაა, ამიტომ პრაქტიკაში გამოიყენება ფარადას წილადი ნაწილები: $1\text{მფ}=10^{-3}\text{ფ}$, $1\text{მკფ}=10^{-6}\text{ფ}$, $1\text{ნფ}=10^{-9}\text{ფ}$, $1\text{პფ}=10^{-12}\text{ფ}$ და ა.შ. დედამიწის ელექტროტევადობაა $0,7\text{მფ}$, ამიტომაც, რომ დამუხტული სხეულის დამინებისას პრაქტიკულად მთელი მუხტი დედამიწაზე გადადის.

სინამდვილეში, არც ერთი გამტარი არ არის განმხოლოებული. ყველა დამუხტული სხეულის სიახლოვეს სხვა სხეულებიც არსებობს. ამ შემთხვევაშიც შეიძლება გამტარის ელექტროტევადობაზე საუბარი, მაგრამ მისი მნიშვნელობა დამოკიდებული იქნება გარემომცველი სხეულების მდებარეობაზე.



ჩავატაროთ ცდა. ელექტრომეტრი, რომლის ღეროზე ღრუ სფეროა დამაგრებული, კორპუსით დავამინოთ. დავმუხტოთ ელექტრომეტრი – ელექტრომეტრის ისარი გადაიხრება (სურ. 104). სფეროსთან ხელის მიახლოებისას, ელექტრომეტრის ჩვენება შემცირდება. სფეროს მუხტი არ შეცვლილა, მაგრამ სფეროს პოტენციალი შემცირდა, ანუ გაიზარდა მისი ელექტროტევადობა.

ავესწნათ ეს მოვლენა. გამტარის პოტენციალი განისაზღვრება არა მხოლოდ მის ზედაპირზე არსებული მუხტით. სუპერპოზიციის პრინციპის თანახმად, რაიმე წერტილში ველის პოტენციალი ტოლია ცალკეული მუხტების მიერ შექმნილი ველების პოტენციალების ჯამისა. სფეროსთან ხელის მიტანისას, მისი მუხტის გავლენით, სფეროსთან ახლოს მყოფი ხელის ზედაპირი დაიმუხტება საწინააღმდეგო ნიშნის მუხტით და შეამცირებს სფეროს პოტენციალს, შესაბამისად, გაზრდის მის ტევადობას. სფეროს ელექტროტევადობა შეიცვლება მასთან დამუხტული სხეულის მიახლოებითაც. სწორედ ამიტომ დამუხტული სხეული განმხოლოებულად მხოლოდ პირობითად შეგვიძლია მივიჩნიოთ.



სურ. 104

დაკვნები:

- გამხოლოებული გამტარის ზედაპირის პოტენციალი მისი მუხტის პირდაპირპროპორციულია;
- ნებისმიერი ფორმის გამტარის მუხტის შეფარდება მის პოტენციალთან მუხტის სიდიდეზე დამოკიდებული არ არის და განისაზღვრება მხოლოდ მისი გეომეტრიული ზომებით და გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობით;
- განხოლოებული გამტარის ელექტროტევალობა ეწოდება მისი q მუხტის შეფარდებას ϕ პოტენციალთან: $C = \frac{q}{\phi}$
- SI-ში ელექტროტევალობის ერთეულია 1 ფარადა. ეს იმ გამტარის ელექტროტევალობაა, რომლის პოტენციალი იზრდება 1 ვ-ით მისთვის 1 კ მუხტის გადამცემისას;
- არაგანხოლოებული გამტარი სხეულის ელექტროტევალობა მისი გარემომცველი სხეულების მდებარეობაზეა დამოკიდებული.

საკონტროლო კითხვები:

1. როგორ გამტარს უწოდებენ განხოლოებულს?
2. დიდია თუ მცირე 1 ფარადა ტევალობა? რატომ?
3. აქვს თუ არა ელექტროტევალობა დაუმუხტავ გამტარს?
4. რატომ იცვლება დამუხტული გამტარის ელექტროტევალობა მასთან სხვა სხეულის მიახლოებისას?

საკითხის უკეთ გასააზრებლად შეგიძლიათ იხილოთ ბმული: <https://is.gd/W4ztaK>



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

ერთი განხოლოებული გამტარის ელექტროტევალობა და პოტენციალი, შესაბამისად, 45 ნფ და 600 ვ-ია, მეორე განხოლოებული გამტარისა კი – 90 ნფ და 400 ვ. იპოვეთ გამტარების მუხტები მათი წვრილი მავთულით შეერთების შემდეგ.

მოცემულია: $C_1 = 45 \text{ ნფ} = 4,5 \cdot 10^{-8} \text{ ფ}$; $C_2 = 90 \text{ ნფ} = 9 \cdot 10^{-8} \text{ ფ}$; $\phi_1 = 600 \text{ ვ}$; $\phi_2 = 400 \text{ ვ}$; $q_1 = ?$ $q_2 = ?$.

ამოხსნა: პირველი და მეორე გამტარის თავდაპირველი მუხტები ტოლია: $q_1 = C_1 \phi_1 = 4,5 \cdot 10^{-8} \cdot 600 = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ (კ)}$; $q_2 = C_2 \phi_2 = 9 \cdot 10^{-8} \cdot 400 = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ (კ)}$; მუხტის შენახვის კანონის თანახმად, ამ მუხტთა ჯამი გამტარების q_1 და q_2 მუხტთა ჯამის ტოლია მათი მავთულით შეერთების შემდეგ: $q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2$. როგორც იცით, გამტარებს შორის მუხტების გადანაწილება სრულდება მაშინ, როდესაც მათი პოტენციალები გათანაბრდება. აღვნიშნოთ ეს პოტენციალი ϕ -ით. მაშინ შეგვიძლია დავწეროთ: $q'_1 = C_1 \phi$ და

$q'_2 = C_2 \phi$. მაშასადამე, $C_1 \phi_1 + C_2 \phi_2 = \phi(C_1 + C_2)$. აქედან მივიღებთ: $\phi = \frac{C_1 \phi_1 + C_2 \phi_2}{C_1 + C_2}$. შესაბამისად, გამტარების მუხტები მათი შეერთების შემდეგ იქნება:

$$q'_1 = C \cdot \frac{C_1 \varphi_1 + C_2 \varphi_2}{C_1 + C_2} = 4,5 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2,7 \cdot 10^{-5} + 3,6 \cdot 10^{-5}}{4,5 \cdot 10^{-8} + 9 \cdot 10^{-8}} = 21 \cdot 10^{-6} (\text{კ}) = 21 (\text{მკკ});$$

$$q'_2 = C_2 \cdot \frac{C_1 \varphi_1 + C_2 \varphi_2}{C_1 + C_2} = 9 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2,7 \cdot 10^{-5} + 3,6 \cdot 10^{-5}}{4,5 \cdot 10^{-8} + 9 \cdot 10^{-8}} = 42 \cdot 10^{-6} \text{ კ} = 42 (\text{მკკ});$$

პასუხი: პირველი გამტარის მუხტი შეერთების შემდეგ იქნება 21 მკკ, მეორე გამტარისა კი – 42 მკკ;



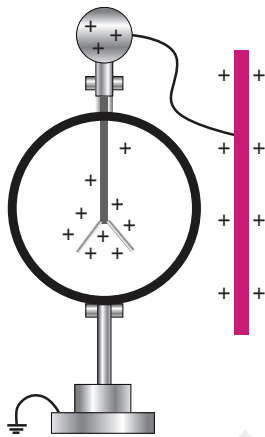
ამოხსენით ამოცანები

- განსაზღვრეთ 27 ნკ მუხტის მქონე განმხოლოებული გამტარის ელექტროტევადობა, თუ მისი პოტენციალი 900 ვ-ია.
- 12 პფ ტევადობის განმხოლოებული გამტარის პოტენციალი 500 ვ-ია. განსაზღვრეთ გამტარის მუხტი.
- 25 ნფ ტევადობის განმხოლოებული გამტარი დამუხტულია -1,2 კვ პოტენციალამდე. იპოვეთ მასზე ჭარბი ელექტრონების რაოდენობა.
- რამდენჯერ განსხვავდება 80 სმ დიამეტრის მქონე ალუმინის სფეროს ელექტროტევადობა იმავე გარემოში მოთავსებული 20 სმ რადიუსის სპილენძის სფეროს ელექტროტევადობისგან?
- რისი ტოლია წყალში მოთავსებული იმ გამტარი სფეროს ელექტროტევადობა, რომლის დიამეტრი 60 სმ-ია?
- რამდენჯერ შეიცვლება ნავთში მოთავსებული დამუხტული გამტარი სფეროს პოტენციალი, თუ მას 20-ის ტოლი დიელექტრიკული შეღწევადობის გარემოში გადავიტანთ?
- ვაკუუმში მოთავსებული 50 პფ ტევადობის განმხოლოებული გამტარი სფეროს პოტენციალი 100 ვ-ია. იპოვეთ სფეროს ცენტრიდან 33 სმ-ით დაშორებული წერტილის პოტენციალი.
- ვაკუუმში მოთავსებული 30 პფ ტევადობის განმხოლოებული გამტარი სფეროს პოტენციალი 540 ვ-ია. იპოვეთ სფეროს ცენტრიდან 81 სმ-ით დაშორებული წერტილის პოტენციალი.
- ვაკუუმში მოთავსებული 20 პფ ტევადობის განმხოლოებული გამტარი სფეროს პოტენციალი 150 ვ-ია. იპოვეთ ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული სფეროს ცენტრიდან 11 სმ-ით დაშორებულ წერტილში.
- ვაკუუმში მოთავსებული 40 პფ ტევადობის განმხოლოებული გამტარი სფეროს პოტენციალი 720 ვ-ია. იპოვეთ ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული სფეროს ზედაპირზე.

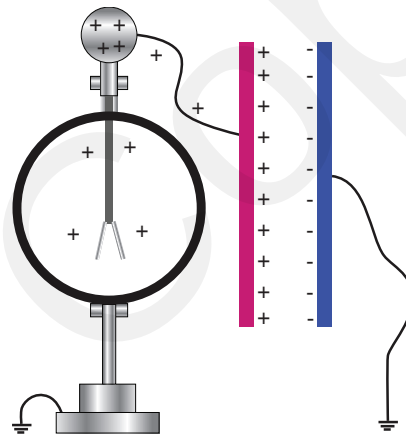
§18 კონდენსატორი. ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობა

წინა პარაგრაფიდან იცით, რომ ნებისმიერ გამტარს მხოლოდ განსაზღვრული მუხტის დაგროვება შეუძლია. შეიძლება თუ არა გავზარდოთ მისი მუხტის დაგროვების უნარი?

 ჩავატაროთ ცდა. დადებითად დამუხტული ფირფიტა ელექტროსკოპის ღეროს მივუერთოთ. ფირფიტის დადებითი მუხტი თითქმის თანაბრად გადანაწილდება მათ შორის და ელექტროსკოპის ფურცლები გაიშლება (სურ. 105). შემდეგ დამუხტულ ფირფიტას მივუახლოვოთ ისეთივე დაუმუხტავი დამინებული ფირფიტა (სურ. 106). ელექტროსტატიკური მიზიდულობის გამო ელექტრონები გადმოვა დედამიწიდან ფირფიტაზე და დაგროვდება დადებითი ფირფიტისაკენ მიმართულ მხარეს. შესაბამისად, მოპირდაპირე მხარეს მოიმატებს დადებითი მუხტი.



სურ. 105

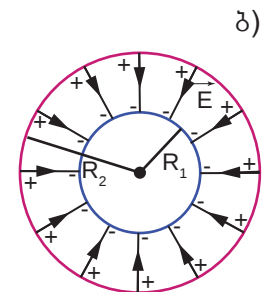
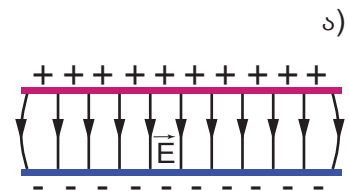


სურ. 106

ამასთან, დამინებული ფირფიტის უარყოფითი მუხტები გამოიწვევს ელექტროსკოპიდან დამატებითი დადებითი მუხტების გადმოსვლას დადებითად დამუხტულ ფირფიტაზე. შედეგად, ელექტროსკოპის ფურცლები ნაწილობრივ დაეშვება. ამრიგად, დამატებითი ფირფიტის შემოტანამ გამოიწვია მუხტების დაგროვების უნარის გაზრდა, ანუ გაიზარდა სისტემის ელექტროტევადობა. ფირფიტებზე არსებული მუხტები იქნება მოდულით ტოლი და ნიშნით საპირისპირო, რის გამოც თითქმის მთელი ელექტრული ველი ფირფიტებს შორის იქნება კონცენტრირებული.

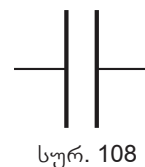
ერთმანეთისაგან დიელექტრიკის თხელი ფენით გამოყოფილ ორი გამტარისგან შემდგარ სისტემას კონდენსატორი ეწოდება. ამ გამტარებს კონდენსატორის შემონაფენები ეწოდება.

თუ კონდენსატორის შემონაფენები ბრტყელი პარალელური ფირფიტებია, მას **ბრტყელ კონდენსატორს** უწოდებენ, თუ კონცენტრული სფეროებია – **სფერულ კონდენსატორს**, თუ საერთო ღერძის მქონე ცილინდრებია – **ცილინდრულ კონდენსატორს** და ა.შ. სურ. 107 ა)-სა და ბ)-ზე ნაჩვენებია ბრტყელი და სფერული კონდენსატორების ელექტრული ველი.



სურ. 107

კონდენსატორის სქემატური გამოსახულება მოცემულია სურ. 108-ზე. კონდენსატორის დასამუხტად საჭიროა მისი შემონაფენები მუდმივი ძაბვის წყაროს პოლუსებს მივუერთოთ (მაგ., ელექტროფორულ მანქანას), ან ერთ-ერთი შემონაფენი მივუერთოთ ძაბვის წყაროს რომელიმე პოლუსს, მეორე კი დავამინოთ.



სურ. 108

კონდენსატორის ერთ-ერთი შემონაფენის მუხტის მოდულს კონდენსატორის მუხტი ეწოდება. სიმარტივისათვის კონდენსატორის მუხტი q -ით აღვნიშნოთ.

კონდენსატორში გროვდება ელექტრული მუხტი და, შესაბამისად, ელექტროსტატიკური ველის ენერგია. კონდენსატორის ელექტროტევადობა კი სწორედ მუხტისა და ელექტრული ენერგიის დაგროვების უნარს განსაზღვრავს.

კონდენსატორის შემონაფენებს შორის პოტენციალთა სხვაობა პროპორციულია მის შიგნით არსებული ელექტრული ველის დაძაბულობისა. თვით ელექტრული ველის დაძაბულობა კი კონდენსატორის მუხტის პროპორციულია. ამიტომ მუხტის შეფარდება პოტენციალთა სხვაობასთან (ძაბვასთან) მუხტზე დამოკიდებული არ არის. ის განისაზღვრება მხოლოდ შემონაფენების გეომეტრიული ზომებით, ფორმით, ურთიერთგანლაგებითა და მათ შორის არსებული გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობით.

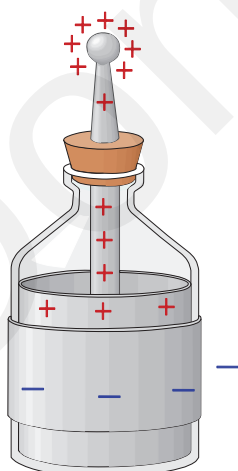
კონდენსატორის მუხტის შეფარდებას შემონაფენებს შორის ძაბვასთან კონდენსატორის ელექტროტევადობა ეწოდება. ანუ,

$$C = \frac{q}{U}. \quad (1)$$

კონდენსატორის ელექტროტევადობის ერთეული იგივეა, რაც განმხოლოებული გამტარის ელექტროტევადობისა – 1 ფარადა.

რაც უფრო დიდია კონდენსატორის ელექტროტევადობა, მით ნაკლები ძაბვა იქნება შემონაფენებს შორის კონდენსატორისათვის გარკვეული მუხტის მინიჭებისას.

პირველი კონდენსატორი შექმნა ჰოლანდიელმა ფიზიკოსმა პიტერ ვან მუშენბრუკმა 1745-1746 წლებში ქ. ლეიდენში, ამიტომ მას ლეიდენის ქილა უწოდეს (სურ. 109). ლეიდენის ქილებია გამოყენებული ელექტროფორულ მანქანაში მუხტის დასაგროვებლად (სურ. 110).



სურ. 109



სურ. 110

დავადგინოთ ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობის გამოსათვლელი ფორმულა.



როგორც § 9-დან იცით, მოდულით ტოლი და საპირისპირო ნიშნით დამუხტული ორი ბრტყელი პარალელური ფირფიტის მიერ შექმნილი ველის დაძაბულობის მოდული ფირფიტებს შორის სივრცეში გამოითვლება ფორმულით:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}, \quad (1)$$

რომელშიც σ ბრტყელი კონდენსატორის შემონაფენის მუხტის ზედაპირული სიმკვრივეა, ხოლო ϵ – შემონაფენებს შორის სივრცის შემაღლებელი გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობა. თუ გავითვალისწინებთ, რომ მუხტის ზედაპირული სიმკვრივე (σ) ტოლია კონდენსატორის მუხტის (q) შეფარდებისა შემონაფენის ფართობთან (S), მაშინ (1) ფორმულა შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon S},$$

შესაბამისად, ძაბვა კონდენსატორის შემონაფენებს შორის ტოლი იქნება:

$$U = Ed = \frac{qd}{\epsilon_0 \epsilon S}.$$

ჩავსვათ ძაბვის ეს მნიშვნელობა კონდენსატორის ელექტროტევადობის ფორმულაში:

$$C = \frac{q}{U},$$

მივიღებთ:

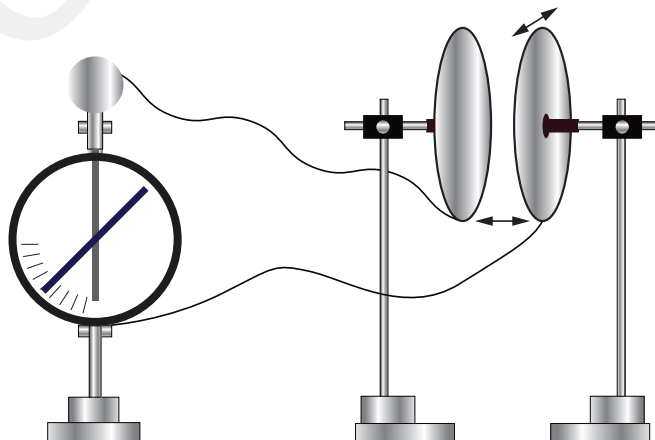
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}. \quad (2)$$

როგორც ვხედავთ, ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობა დამოკიდებულია შემონაფენების ფართობზე, მათ შორის მანძილსა და გარემოს დიელექტრიკულ შეღწევადობაზე.

(2) ფორმულის სისწორეში შეგვიძლია დავრწმუნდეთ ცდით:



ავიღოთ ბრტყელი კონდენსატორი, რომლის შემონაფენები შეგვიძლია გადავადგილოთ ერთმანეთის მიმართ და ელექტრომეტრი (სურ. 111). დავმუხტოთ კონდენსატორი. ელექტრომეტრი გვიჩვენებს პოტენციალთა სხვაობას შემონაფენებს შორის.



სურ. 111

შემონაფენები ისე გადავაადგილოთ, რომ მათი ურთიერთგადამფარავი S ფართობი შემცირდეს. დავინახავთ, რომ ელექტრომეტრის ჩვენება მოიმატებს – გაიზარდა შემონაფენებს შორის ძაბვა, რაც ელექტროტევადობის შემცირებას ნიშნავს. იგივე მოხდება შემონაფენებს შორის დიელექტრიკის (მაგ., ორგანული მინის) შეტანისას – დიელექტრიკის ბმული მუხტები მიიზიდავს დამატებით მუხტებს ელექტრომეტრიდან და შემონაფენებზე მუხტი გაიზრდება. შემონაფენების დაშორებისას შევამჩნევთ ძაბვის მომატებას, რაც ელექტროტევადობის შემცირებას ნიშნავს.

დაკვნები:

- ერთმანეთისაგან დიელექტრიკის თხელი ფენით გამოყოფილ ორი გამტარისგან შემდგარ სისტემას კონდენსატორი ეწოდება;
- არსებოს ბრტყელი, სფერული, ცილინდრული და სხვა სახის კონდენსატორები;
- კონდენსატორის ერთ-ერთი შემონაფენის მუხტის მოდულს კონდენსატორის მუხტი ეწოდება;
- კონდენსატორის მუხტის შეფარდებას შემონაფენებს შორის ძაბვასთან კონდენსატორის ელექტროტევადობა ეწოდება. $C = \frac{q}{U}$;
- ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობა დამოკიდებულია შემონაფენების ფართობზე, მათ შორის მანძილზე, გარემოს დიელექტრიკულ შეღწევადობაზე და გამოითვლება ფორმულით: $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$.

საკონტროლო კითხვები:

1. რატომ იზრდება გამტარი ფირფიტის მუხტის დაგროვების უნარი მასთან დამინებული მეორე ფირფიტის მიახლოებისას?
2. რა დანიშნულება აქვს კონდენსატორს?
3. როგორ შეიცვლება ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობა, თუ შემონაფენებს შორის მანძილს გავზრდით? შემონაფენების ფართობს შევამცირებთ?
4. როგორ შეიცვლება ბრტყელი ჰაერიანი კონდენსატორის ელექტროტევადობა, თუ შემონაფენებს შორის მინას მოვათავსებთ?

საკითხის უკეთ გასააზრებლად შეგიძლიათ იხილოთ ბმულები:

<https://is.gd/TknMMI>

<https://is.gd/K6RyXL>



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

40 მკვ ტევადობის ბრტყელი ჰაერიანი კონდენსატორი მიერთებულია ძაბვის წყაროსთან. რა მუხტი გაივლის მიმყვან სადენებში, თუ კონდენსატორზე მოდებულ ძაბვას 150 ვ-დან 450 ვ-მდე გავზრდით?

მოცემულია: $C = 40 \text{ მკვ} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ ფ}$; $U_1 = 150 \text{ ვ}$; $U_2 = 450 \text{ ვ}$. $\Delta q = ?$

ამოხსნა: კონდენსატორის ელექტროტევადობა უცვლელია, ამიტომ მისი მუხტის ცვლილება გამოწვეულია შემონაფებებზე ძაბვის ზრდით. $C = qU$ ფორმულის გამოყენებით ვიპოვოთ კონდენსატორის მუხტის ნაზრდი: $\Delta q = q_2 - q_1 = CU_2 - CU_1 = C(U_2 - U_1) = 4 \cdot 10^{-5} (450 - 150) = 4 \cdot 10^{-5} \cdot 300 = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ კ}$. ცხადია, ზუსტად ამდენივე მუხტმა უნდა გაიაროს კონდენსატორის ძაბვის წყაროსთან შემაერთებელ სადენებში.

პასუხი: კონდენსატორის ძაბვის წყაროსთან შემაერთებელ სადენებში გაივლის $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ კ}$ მუხტი.



ამოხსენით ამოცანები

1. განსაზღვრეთ კონდენსატორის ელექტროტევადობა, თუ მის შემონაფენებზე დაგროვებული მუხტის 150 ნკ-ით ცვლილებისას ძაბვა კონდენსატორზე 300 ვ-დან 900 ვ-მდე გაიზარდა.

2. შეიცვლება თუ არა კონდენსატორის ელექტროტევადობა, თუ შემონაფენებს შორის ძაბვას გავანახევრებთ? პასუხი დაასაბუთეთ.

3. განსაზღვრეთ ბრტყელი ჰაერიანი კონდენსატორის ელექტროტევადობა, თუ მის ფირფიტებს შორის მანძილი 6 მმ-ია, ფირფიტის ფართობი კი -120 სმ^2 .

4. როგორ შეიცვლება ბრტყელი ჰაერიანი კონდენსატორის ელექტროტევადობა, თუ ფირფიტებს შორის სივრცეს ქარსით შევავსებთ და მათ შორის მანძილს 2-ჯერ გავზრდით?

5. 350 ვ ძაბვის წყაროზე მიერთებისას ბრტყელ კონდენსატორზე 105 ნკ მუხტი დაგროვდა. რა მუხტი დაგროვდება ამავე კონდენსატორზე, თუ მას 400 ვ ძაბვის წყაროს მიუერთებთ და ფირფიტებს შორის მანძილს 3-ჯერ შევამცირებთ?

6. დამუხტული ბრტყელი ჰაერიანი კონდენსატორის ფირფიტებს შორის სივრცე შეავსეს დიელექტრიკით, რის გამოც ფირფიტებს შორის ძაბვა 800 ვ-დან 200 ვ-მდე შემცირდა. განსაზღვრეთ ფირფიტებს შორის შეტანილი დიელექტრიკის დიელექტრიკული შეღწევადობა.

7. მუდმივი ძაბვის წყაროსთან მიერთებული ბრტყელი ჰაერიანი კონდენსატორის ფირფიტებს შორის სივრცე შეავსეს დიელექტრიკით, რომლის დიელექტრიკული შეღწევადობაა 11. როგორ შეიცვალა კონდენსატორზე დაგროვილი მუხტი?

8. მუდმივი ძაბვის წყაროსთან მიერთებული ბრტყელი ჰაერიანი კონდენსატორის ფირფიტებს შორის სივრცე შეავსეს დიელექტრიკით, რომლის დიელექტრიკული შეღწევადობა 1-ზე მეტია. დაასაბუთეთ, რომ ველის დაძაბულობა კონდენსატორის ფირფიტებს შორის არ შეიცვლება.

9. განსაზღვრეთ 12 ნფ ელექტროტევადობის ბრტყელი კონდენსატორის მუხტი, თუ ფირფიტებს შორის მანძილი 5 მმ-ია, ხოლო ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული -2500 ვ/მ .

10. 10 სმ გვერდის მქონე კვადრატული ფირფიტებისგან დამზადებული ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობა 200 პფ-ია. რისი ტოლი გახდება კონდენსატორის ტევადობა, თუ მის ფირფიტებს ერთმანეთის პარალელურად, კვადრატის გვერდის გასწვრივ 2 სმ-ით წავანაცვლებთ?

§ 19 კონდენსატორების შეერთება

სხვადასხვა ელექტრულ ხელსაწყოში განსხვავებული ელექტროტევადობის კონდენსატორი გამოიყენება. მწარმოებლები კი მხოლოდ განსაზღვრული ტევადობის კონდენსატორებს ამზადებენ. ამიტომ ხშირად კონდენსატორებს ერთმანეთთან აერთებენ ბატარეად, რათა მოცემული კონდენსატორებისაგან სასურველი ტევადობა მიიღონ. კონდენსატორების შეერთების უმარტივესი ტიპებია მიმდევრობითი და პარალელური შეერთება.

ორი კონდენსატორის მიმდევრობითი შეერთების სქემა მოცემულია სურ. 112-ზე. ამ შემთხვევაში პირველი კონდენსატორის უარყოფითად დამუხტული შემონაფენი შეერთებულია მეორე კონდენსატორის დადებითად დამუხტულ შემონაფენთან. თუ პირველი კონდენსატორის განაპირა შემონაფენის მუხტია $+|q|$, მაშინ მეორე შემონაფენზე ელექტროსტატიკური ინდუქციის შედეგად გაჩნდება $-|q|$ მუხტი. მართლაც, რადგან შიდა შემონაფენები და მათი შემაერთებული გამტარი მთლიანობაში ნეიტრალურია, ამიტომ მეორე კონდენსატორის შიდა შემონაფენზე გაჩნდება $+|q|$ მუხტი. ამრიგად, კონდენსატორების მიმდევრობითი შეერთებისას მათი მუხტები ტოლია.

თუ კიდურა შემონაფენების პოტენციალებია φ_1 და φ_2 , ხოლო შიდა შემონაფენებისა – φ' , მაშინ ბატარეისა და თითოეული კონდენსატორის ტევადობა, შესაბამისად, ტოლი იქნება:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}, \quad C_1 = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi'}, \quad \text{და} \quad C_2 = \frac{q}{\varphi' - \varphi_2}.$$

ვიპოვოთ კონდენსატორების ელექტროტევადობების შეზრუნებული სიდიდეების ჯამი:

$$\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{\varphi_1 - \varphi'}{q} + \frac{\varphi' - \varphi_2}{q} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{q} = \frac{1}{C}.$$

მაშასადამე, კონდენსატორების მიმდევრობითი შეერთებით მიღებული ბატარეის ელექტროტევადობის შეზრუნებული სიდიდე თითოეული კონდენსატორის ელექტროტევადობის შეზრუნებული სიდიდეების ჯამის ტოლია:

$$\frac{1}{C} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

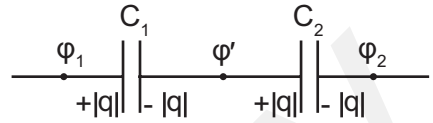
 რისი ტოლი იქნება n რაოდენობის მიმდევრობით შეერთებული ერთნაირი C_0 ტევადობის კონდენსატორთა ბატარეის ტევადობა?

ორი კონდენსატორის პარალელური შეერთების სქემა მოცემულია ნახ. 113-ზე. ასეთი შეერთებისას დადებითად დამუხტული შემონაფენები ერთადაა შეერთებული და უარყოფითები – ერთად. ამ დროს ძაბვა ორივე კონდენსატორზე ერთნაირია: $U_1 = U_2 = U$. თუ პირველი კონდენსატორის მუხტია q_1 , მეორესი კი – q_2 , მაშინ ბატარეის მუხტი იქნება:

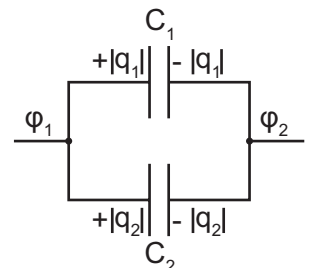
$$q = q_1 + q_2.$$

ბატარეის ტევადობისათვის მივიღებთ:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q_1}{U} + \frac{q_2}{U}.$$



სურ. 112



სურ. 113

რადგან $\frac{q_1}{U} = C_1$ და $\frac{q_2}{U} = C_2$,

შესაბამისად, პირველი და მეორე კონდენსატორის ტევადობებია, ამიტომ გვექნება:

$$C = C_1 + C_2.$$

კონდენსატორების პარალელური შეერთებისას მათი საერთო ელექტროტევადობა თითოეული კონდენსატორის ტევადობების ჯამის ტოლია:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n.$$



რისი ტოლი იქნება n რაოდენობის პარალელურად შეერთებული ერთნაირი C_0 ტევადობის კონდენსატორთა ბატარეის ტევადობა?

კონდენსატორების მიმდევრობითი, პარალელური და შერეული შეერთება საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ სხვადასხვა ტევადობის კონდენსატორთა ბატარეა.

დაკვნები:

- კონდენსატორების მიმდევრობითი შეერთებით მიღებული ბატარეის ელექტროტევადობის შებრუნებული სიდიდე თითოეული კონდენსატორის ელექტროტევადობის შებრუნებული სიდიდეების ჯამის ტოლია: $\frac{1}{C} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$;
- კონდენსატორების პარალელური შეერთებისას მათი საერთო ელექტროტევადობა თითოეული კონდენსატორის ტევადობის ჯამის ტოლია: $C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$.

საკონტროლო კითხვები:

1. რისთვის გამოიყენება კონდენსატორების მიმდევრობითი და პარალელური შეერთება?
2. რატომაა კონდენსატორების მიმდევრობითი შეერთებისას ყველა მათგანზე ერთნაირი მუხტი?
3. რატომ არის კონდენსატორთა პარალელური შეერთებისას ძაბვა ყველა მათგანზე ერთნაირი?
4. კონდენსატორთა მიმდევრობითი შეერთებისას ბატარეის ტევადობა ცალკეული კონდენსატორის ტევადობაზე მეტია თუ ნაკლები? პარალელური შეერთებისას?

საკითხის უკეთ გასააზრებლად შეგიძლიათ იხილოთ ბმული: <https://is.gd/Gg5U1T>



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

280 ვ მუდმივი ძაბვის წყაროსთან მიმდევრობითაა შეერთებული ორი ერთნაირი 12 მკფ ტევადობის კონდენსატორი (სურ. 114 ა). როგორ შეიცვლება ძაბვა და მუხტი თითოეულ კონდენსატორზე, თუ ერთ-ერთი კონდენსატორის შემონაფენებს შორის სივრცეს შევავსებთ ქარსით (სურ. 114 ბ), რომლის დიელექტრიკული შეღწევადობა ϵ -ის ტოლია?



სურ. 114

მოცემულია: $C_1 = C_2 = 12 \text{ მკფ} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ ფ}$; $U = 280 \text{ ვ}$. $\Delta q_1 = ?$; $\Delta q_2 = ?$; $\Delta U_1 = ?$; $\Delta U_2 = ?$

ამოხსნა: ვინაიდან თავდაპირველად ყველა კონდენსატორის ელექტროტევადობა ერთნაირია, მათზე დაბნა თანაბრად განაწილდება და ტოლი იქნება: $U_1 = U_2 = 140 \text{ (ვ)}$. ასევე ტოლი იქნება თითოეული კონდენსატორის მუხტიც: $q_1 = q_2 = C_1 U_1 = 1,68 \cdot 10^{-3} \text{ (კ)}$. ვთქვათ, პირველი კონდენსატორის შემონაფენებს შორის სივრცე ქარსით შევავსეთ, მაშინ მისი ტევადობა 6-ჯერ გაიზრდება და ტოლი გახდება 72 მკფ-ის. კონდენსატორებზე მუხტი შეიცვლება, მაგრამ კვლავ ერთნაირი იქნება: $q'_1 = q'_2$, ანუ, $7,2 \cdot 10^{-5} U'_1 = 1,2 \cdot 10^{-5} U'_2$. ე.ი. $6U'_1 = U'_2$. ამასთან, $U'_1 + U'_2 = 280 \text{ ვ}$. წინა ტოლობის გათვალისწინებით გვექნება: $\frac{U'_2}{6} + U'_2 = 280 \text{ ვ}$. საიდანაც მივიღებთ: $U'_2 = 240 \text{ ვ}$ და $U'_1 = 40 \text{ ვ}$, ხოლო მუხტები $q'_1 = q'_2 = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 240 = 2,88 \cdot 10^{-3} \text{ კ}$. ამრიგად, პირველ კონდენსატორზე დაბნა 100 ვ-ით შემცირდება, მეორე კონდენსატორზე კი 100 ვ-ით გაიზრდება. ყველა კონდენსატორზე მუხტი $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ კ}$ -ით გაიზრდება.

პასუხი: $\Delta U_1 = -100 \text{ ვ}$; $\Delta U_2 = 100 \text{ ვ}$; $\Delta q_1 = \Delta q_2 = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ კ}$.



ამოხსენით ამოცანები

1. 18 მკფ ელექტროტევადობის სამი ერთნაირი კონდენსატორი შეერთებულია მიმდევრობით, იპოვეთ მიღებული ბატარეის ელექტროტევადობა.

2. 3 მკფ და 6 მკფ ელექტროტევადობის ორი კონდენსატორის მიმდევრობით შეერთებით მიღებული ბატარეა შეაერთეს 50 ვ დაბნის წყაროსთან. განსაზღვრეთ ბატარეაზე დაგროვილი მუხტი.

3. ერთმანეთთან მიმდევრობით შეერთებული 2 ნფ, 8 ნფ და 16 ნფ ელექტროტევადობის კონდენსატორებიდან დაბნა ყველაზე მცირე ტევადობის კონდენსატორზე 64 ვ-ია. განსაზღვრეთ დაბნათა ჯამი დანარჩენ ორ კონდენსატორზე.

4. 17 ნფ ელექტროტევადობის 4 ერთნაირი კონდენსატორი შეაერთეს პარალელურად. განსაზღვრეთ მიღებული ბატარეის ელექტროტევადობა.

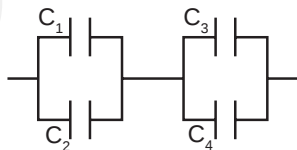
5. როგორ შეიცვლება კონდენსატორთა ბატარეის ელექტროტევადობა, თუ მიმდევრობით შეერთებულ 10 ერთნაირ კონდენსატორს პარალელურად შევავსებთ?

6. 5 ნფ, 10 ნფ და 40 ნფ ელექტროტევადობის სამი კონდენსატორი შეერთებულია პარალელურად. განსაზღვრეთ დაბნა კონდენსატორებზე და თითოეული კონდენსატორის მუხტი, თუ ბატარეის მუხტი 33 მკკ-ია.

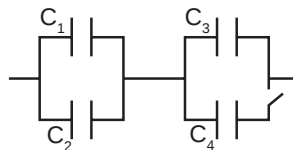
7. რა ელექტროტევადობა შეიძლება მივიღოთ სამი ერთნაირი 12 ნფ ტევადობის კონდენსატორისაგან?

8. გამოთვალეთ სურათ 115-ზე გამოსახული ბატარეის ელექტროტევადობა, თუ $C_1=2 \text{ პფ}$, $C_2=6 \text{ პფ}$, $C_3=7 \text{ პფ}$, $C_4=7 \text{ პფ}$.

9. როგორ და რამდენით შეიცვლება სურათ 116-ზე გამოსახული ბატარეის ელექტროტევადობა ჩამრთველის ჩართვის შემდეგ, თუ $C_1=6 \text{ პფ}$, $C_2=6 \text{ პფ}$, $C_3=4 \text{ პფ}$ და $C_4=8 \text{ პფ}$?



სურ. 115



სურ. 116

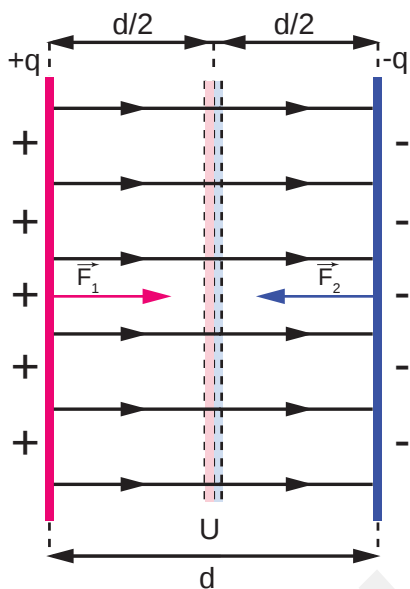
10. მიმდევრობით შეერთებული ორი ერთნაირი ბრტყელი კონდენსატორი მიერთებულია მუდმივი დაბნის წყაროსთან. რამდენჯერ შეიცვლება დაბნა პირველ კონდენსატორზე, თუ მეორე კონდენსატორის შემონაფენებს შორის მანძილს 3-ჯერ შევამცირებთ?

§ 20 დამუხტული კონდენსატორის ენერგია



იმისათვის, რომ ზამბარამ პოტენციალური ენერგია შეიძინოს, საჭიროა ის გავჭიმოთ (ან შევკუმშოთ), ანუ საჭიროა შევასრულოთ გარკვეული მუშაობა, რომელიც ზამბარის მიერ შეძენილი ენერგიის ტოლია.

ანალოგიურად, იმისათვის, რომ დავმუხტოთ კონდენსატორი, საჭიროა შევასრულოთ მუშაობა დადებითი და უარყოფითი მუხტების განცალკევებაზე. ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, ეს მუშაობა დამუხტული კონდენსატორის ენერგიის ტოლია.



სურ. 117

დამუხტულ კონდენსატორს რომ ენერგია აქვს, შეგვიძლია ცდით დავრწმუნდეთ: თუ მის შემონაფენებს მავთულით ნათურასთან შევკერებთ, კონდენსატორი განიმუხტება და ნათურა წამიერად გაანათება. ეს ნიშნავს, რომ კონდენსატორის ენერგია გადადის ჯერ სითბურ, შემდეგ კი სინათლის ენერგიაში. სწორედ ამიტომ ინთება თქვენი ფოტოაპარატის ან სმარტფონის ნათურა სურათის გადაღებისას.

რა ფორმულით შეიძლება გამოვთვალოთ დამუხტული კონდენსატორის ენერგია?

ვთქვათ, გვაქვს ბრტყელი კონდენსატორი, რომლის შემონაფენების ფართობია S , ხოლო მათ შორის მანძილია d . შემონაფენების მუხტებია $+q$ და $-q$, მათ შორის ძაბვაა U , ველის დაძაბულობის მოდული კი E (სურ. 117).

კონდენსატორის შემონაფენები ერთმანეთს იზიდავს. თითოეულ შემონაფენზე მოქმედი კულონური მიზიდვის F_1 და F_2 ძალა განისაზღვრება მეორე შემონაფენის მიერ შექმნილი ელექტრული ველის დაძაბულობით, რომლის მოდული ტოლია:

$$E_1 = E_2 = \frac{1}{2} E. \quad (1)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $E = \frac{U}{d}$, მაშინ (1) ტოლობა ასე ჩაიწერება:

$$E_1 = E_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{U}{d}.$$

შესაბამისად, F_1 და F_2 ძალებისათვის გვექნება:

$$F_1 = F_2 = q \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U}{d}. \quad (2)$$

დავუშვათ, შემონაფენებს შეუძლია თავისუფლად მოძრაობა. მიზიდულობის გამო ისინი იმოძრავენ მანამ, სანამ ერთმანეთს არ მიედებან. თუ ამ დროს შემონაფენების ენერგიას ნულის ტოლად მივიჩნევთ, მივიღებთ, რომ ელექტროსტატიკური ველის მიერ მათ გადაადგილებაზე შესრულებული მუშაობა დამუხტული შემონაფენების (კონდენსატორის) საწყისი პოტენციალური ენერგიის ტოლია: $A = W_{\text{პოტ.}}$

გამოვთვალოთ თითოეული შემონაფენის კონდენსატორის ცენტრამდე გადაადგილებაზე ველის მიერ შესრულებული მუშაობა. რადგან ეს გადაადგილება $d/2$ -ის ტოლია, ამიტომ

$$A_1 = F_1 \frac{d}{2}, \quad A_2 = F_2 \frac{d}{2}.$$

კონდენსატორის ელექტროსტატიკური ენერგია ტოლი იქნება:

$$W_{\text{პოტ}} = A = A_1 + A_2 = (F_1 + F_2) \frac{d}{2}.$$

თუ გავითვალისწინებთ (2) ტოლობას, მივიღებთ:

$$W_{\text{პოტ}} = q \cdot \frac{U}{d} \cdot \frac{d}{2} = \frac{q \cdot U}{2} \quad (3)$$

გავიხსენოთ, რომ $q = CU$, მაშინ კონდენსატორის ენერგია ასეც შეიძლება გამოვსახოთ:

$$W_{\text{პოტ}} = \frac{CU^2}{2} \quad (4) \quad \text{ან} \quad W_{\text{პოტ}} = \frac{q^2}{2C}. \quad (5)$$

ასევე, თუ გავიხსენებთ ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობის ფორმულას

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \text{ გვექნება:}$$

$$W_{\text{პოტ}} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2}{2d}. \quad (6)$$

ვინაიდან $U = Ed$, (6) ტოლობა შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$W_{\text{პოტ}} = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} Sd. \quad (7)$$

ამ ტოლობაში ნამრავლი Sd ბრტყელი კონდენსატორის მოცულობაა: $V = Sd$. თუ კონდენსატორის ენერგიას V -ზე გავყოფთ, მივიღებთ ველის ენერგიას ერთეულ მოცულობაში. მას ელექტრული ველის ენერგიის სიმკვრივე ეწოდება.

ფიზიკურ სიდიდეს, რომელიც ტოლია რაიმე მოცულობაში კონცენტრირებული ელექტრული ველის ენერგიის ფარდობისა ამ მოცულობასთან, ელექტრული ველის ენერგიის სიმკვრივე ეწოდება. ის w ასოთი აღინიშნება:

$$w = \frac{W}{V}. \quad (8)$$

SI-ში ელექტრული ველის ენერგიის სიმკვრივის ერთეულია 1 ჯ/მ^3 .

(7) ტოლობის გათვალისწინებით (8) ტოლობა შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$w = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2}. \quad (9)$$

როგორც ვხედავთ, (9) ტოლობა არ შეიცავს სიდიდეს, რომელიც ბრტყელი კონ-

დენსატორის გეომეტრიული მახასიათებელია. როგორც წესი, ეს ნიშნავს, რომ (9) ფორმულა მართებულია არა მხოლოდ ბრტყელი კონდენსატორის ერთგვაროვანი ველისთვის, არამედ ნებისმიერ კონდენსატორისთვისაც.

კონდენსატორის თვისებას, დააგროვოს და გარკვეული დროის განმავლობაში შეინახოს ელექტრული ენერგია, ფართო გამოყენება აქვს ელექტროტექნიკაში, რადიოტექნიკასა და სატელევიზიო ხელსაწყოებში, ტელეფონებში, ლაზერულ ტექნიკაში, მეტალურგიაში, მედიცინაში, ფოტოგრაფიაში და სხვა. ამის გამო, დანიშნულების მიხედვით, მრავალი სახის კონდენსატორი არსებობს – პატარა ზომიდან დაწყებული, ძალიან დიდით დამთავრებული (მისი მასა შეიძლება რამდენიმე ტონაც იყოს), მუდმივი ან ცვლადი ტევადობით და სხვა (სურ. 118).



სურ. 118

დაკვნები:

- დამუხტულ კონდენსატორს აქვს ელექტრული ველის ენერგია;
- დამუხტული კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგია გამოისახება ფორმულებით: $W_{\text{პოტ}} = \frac{q \cdot U}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$;
- ბრტყელი დამუხტული კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგიის გამოსათვლელი ფორმულაა: $W_{\text{პოტ}} = \frac{\epsilon_0 S U^2}{2d}$.
- ფიზიკურ სიდიდეს, რომელიც ტოლია რაიმე მოცულობაში კონცენტრირებული ელექტრული ველის ენერგიის ფარდობისა ამ მოცულობასთან, ელექტრული ველის ენერგიის სიმკვრივე ეწოდება: $w = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$.

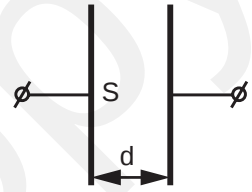
საკონტროლო კითხვები:

1. როგორ დაასაბუთებ, რომ დამუხტულ კონდენსატორს აქვს ელექტრული ველის ენერგია?
2. რა მუშაობის ტოლია დამუხტული კონდენსატორის ენერგია?
3. რას გვიჩვენებს ველის ენერგიის სიმკვრივე?
4. რატომ შეგვიძლია ველის ენერგიის სიმკვრივის ფორმულის გამოყენება ნებისმიერი კონდენსატორისათვის?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

მუდმივი ძაბვის წყაროსთან მიერთებული ბრტყელი ჰაერიანი კონდენსატორის (იხ. ნახ 119 ა) ელექტრული ველის ენერგია 0,12 ჯ-ია. რამდენი ჯოულით შეიცვლება კონდენსატორის ენერგია, თუ ფირფიტებს შორის არსებული სივრცის ნახევარს შევავსებთ დიელექტრიკით, რომლის დიელექტრიკული შეღწევადობა 5-ის ტოლია.



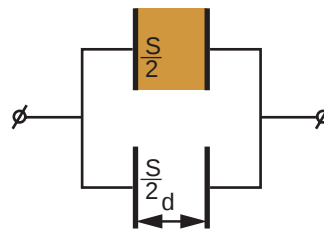
სურ. 119 ა

მოცემულია: $U = \text{const}$; $W_1 = 0,12$ ჯ; $\epsilon_1 = 1$; $\epsilon_2 = 5$; $W_2 - W_1 = ?$

ამოხსნა: კონდენსატორის თავდაპირველი ტევადობა $C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{d}$, ხოლო მისი ელექტრული ველის ენერგია $W_1 = \frac{\epsilon_0 S U^2}{2d}$. კონდენსატორის სივრცის ნახევრის დიელექტრიკით შევსების შემდეგ (სურ. 119 ბ) ის შეიძლება განვიხილოთ როგორც ორი, პარალელურად შეერთებული კონდენსატორი, რომელთაგან ერთი ჰაერიანია, მეორე კი – დიელექტრიკით შევსებული. ორივე კონდენსატორის შემონაფენის ფართობი $\frac{S}{2}$ -ის ტოლია (სურ. 119 გ). ამიტომ $C_2 = \frac{\epsilon_0 \frac{S}{2}}{d} + \frac{\epsilon_0 \epsilon \frac{S}{2}}{d} = \frac{\epsilon_0 S}{2d} (1 + \epsilon)$. შესაბამისად, $W_2 = \frac{\epsilon_0 S U^2}{2d} (1 + \epsilon) = W_1 \frac{1 + \epsilon}{2} = 0,12 \cdot 3 = 0,36$ (ჯ). $W_2 - W_1 = 0,36 - 0,12 = 0,24$ (ჯ).



სურ. 119 ბ



სურ. 119 გ

პასუხი: კონდენსატორის ფირფიტებს შორის არსებული სივრცის ნახევრის შევსებით მისი ელექტრული ველის ენერგია 0,24 ჯ-ით გაიზრდება.



ამოხსენით ამოცანები

1. გამოთვალეთ 10 მკფ ელექტროტევადობის კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგია, თუ მის შემონაფენებს შორის დაბვა 70 ვ-ის ტოლია.

2. გამოთვალეთ 500 პკფ ელექტროტევადობის კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგია, თუ მისი მუხტი 20 მკკ-ია.

3. როგორ შეიცვლება კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგია, თუ კონდენსატორზე მოდებულ დაბვას 2-ჯერ გავზრდით?

4. კონდენსატორის მუხტის 3-ჯერ გაზრდით ელექტრული ველის ენერგია 0,48 ჯ-ით გაიზარდა. განსაზღვრეთ ელექტრული ველის ენერგიის საწყისი მნიშვნელობა.

5. მუდმივი დაბვის წყაროსთან მიერთებული ბრტყელი ჰაერიანი კონდენსატორის ფირფიტებს შორის სივრცე შეავსეს ზეთით. როგორ შეიცვალა კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგია?

6. მუდმივი დაბვის წყაროსთან მიერთებული ბრტყელი კონდენსატორი გამორთეს დაბვის წყაროდან. როგორ შეიცვლება კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგია, თუ ფირფიტებს შორის მანძილს 2-ჯერ შევამცირებთ?

7. მუდმივი დაბვის წყაროსთან მიერთებული ბრტყელი ჰაერიანი კონდენსატორი გამორთეს დაბვის წყაროდან. როგორ შეიცვლება კონდენსატორის ელექტრული ველის დაბაბულობის მოდული და ველის ენერგიის სიმკვრივე, თუ ფირფიტებს შორის სივრცეს მთლიანად შევავსებთ დიელექტრიკით, რომლის დიელექტრიკული შეღწევა-დობაა 6.

8. მიმდევრობით შეერთებული ორი ერთნაირი ბრტყელი კონდენსატორი მიერთებულია მუდმივი დაბვის წყაროსთან (სურ 120). როგორ შეიცვლება თითოეული კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგია, თუ პირველი კონდენსატორის ფირფიტებს შორის მანძილს 3-ჯერ გაზრდით?

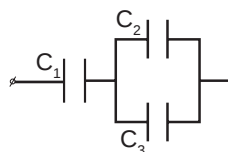


სურ. 120

9. სურათ 121-ზე გამოსახული 2C ტევადობის კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგია 0.18 ჯ-ია. რისი ტოლია 4C და 6C ტევადობის კონდენსატორების ენერგიები?



სურ. 121



სურ. 122

10. სურათ 122-ზე გამოსახული $C_1=3C$ ტევადობის კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგია 0.24 ჯ-ია. რისი ტოლია $C_2=3C$ და $C_3=6C$ ტევადობის კონდენსატორების ენერგიები?

შემაჯამებელი ამოცანები

1. ერთი და იგივე მუხტის მქონე ორი ერთნაირი ლითონის პატარა ბურთულა გა-
ნიზიდება 1,6 ნ ძალით*. ისეთივე ნეიტრალური მესამე ბურთულა შეახეს ჯერ ერთ,
შემდეგ მეორე ბურთულას და მოათავსეს მათი შემაერთებული მონაკვეთის შუა წერ-
ტილში. იპოვეთ მესამე ბურთულაზე მოქმედი ძალა. ბურთულებს შორის გრავიტა-
ციულ ურთიერთქმედებას ნუ გაითვალისწინებთ.

2. გლუვ ჰორიზონტალურ იზოლირებულ ზედაპირზე დევს ①②③
სამი ერთნაირი მცირე ზომის ლითონის ბურთულა ისე, როგორც სურ. 123
სურათ 123-ზეა ნაჩვენები. მეორე ბურთულას მიანიჭეს 12 ნკ მუხტი.
გამოთვალეთ პირველ ბურთულაზე მოქმედი ძალა იმ მომენტში, როდესაც პირველ და
მესამე ბურთულებს შორის მანძილი 40 სმ გახდება. მიიჩნიეთ, რომ ბურთულები ერთი
წრფის გასწვრივ მოძრაობს.

3. 1,8 ნკ და -3 ნკ წერტილოვან მუხტებს შორის მანძილი 4 სმ-ია. რა ნიშნისა
და მოდულის მქონე წერტილოვანი მუხტი უნდა მოვათავსოთ პირველი მუხტიდან
2 სმ-ით დაშორებულ წერტილში, რომ პირველი მუხტი წონასწორობაში აღმოჩნდეს?
განიხილეთ ორი შესაძლო შემთხვევა.

4. ერთ წერტილში დამაგრებულ 20 სმ სიგრძის ძაფებზე ორი ერთნაირი, 5 გ მასის
მცირე ზომის ნეიტრალური ბურთულაა დაკიდებული. მათთვის ერთნაირი მუხტის მინი-
ჭების შემდეგ ბურთულები ერთმანეთს 8 სმ-ზე დაშორდა. იპოვეთ ბურთულების მუხტი.
მათ შორის გრავიტაციულ ურთიერთქმედებას ნუ გაითვალისწინებთ ($g=10$ მ/წმ²).

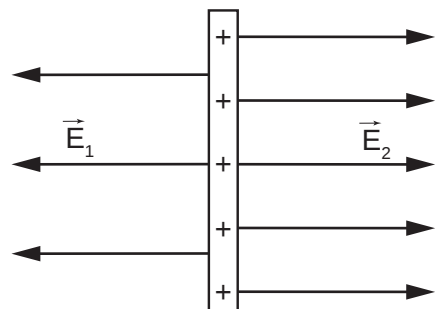
5. ერთ წერტილში დამაგრებულ 18 სმ სიგრძის ძაფებზე ორი ერთნაირი, მცირე
ზომის ნეიტრალური ბურთულაა დაკიდებული. მათთვის ერთნაირი 0,2 მკკ მუხტის
მინიჭების შემდეგ ბურთულები ერთმანეთს 4 სმ-ზე დაშორდა. განსაზღვრეთ ბურთუ-
ლის მასა და ძაფის დაჭიმულობის ძალა. ბურთულებს შორის გრავიტაციულ ურთიერ-
თქმედებას ნუ გაითვალისწინებთ ($g=10$ მ/წმ²).

6. ჰორიზონტალურად მიმართულ 2000 ნ/კ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტ-
რულ ველში შეიტანეს უჭიმვად ძაფზე დაკიდებული 4 მკკ მუხტისა და 0,4 გ მასის
მცირე ზომის სხეული. იპოვეთ იმ კუთხის ტანგენსი, რომლითაც ძაფი ვერტიკალიდან
გადაიხრება. არქიმედეს ამომგდებ ძალას ნუ გაითვალისწინებთ ($g=10$ მ/წმ²).

7. წერტილოვანი მუხტის მიერ შექმნილი ელექტრული ველის ერთ-ერთი ძალ-
წირის A და B წერტილებში დაძაბულობის მოდულები, შესაბამისად, 2700 ვ/მ და
300 ვ/მ-ია. იპოვეთ ველის დაძაბულობის მოდული AB მონაკვეთის შუა წერტილში.

8. a გვერდის მქონე კვადრატის წვეროებში
მოთავსებულია $+2q, +2q, +2q$ და $-q$ წერტილოვანი
მუხტები. იპოვეთ ელექტრული ველის დაძაბულო-
ბის მოდული კვადრატის ცენტრში.

9. ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში
მოთავსებულია დადებითად თანაბრად დამუხტული
დიდი ზომის თხელი ფირფიტა. ელექტრული ველის
დაძაბულობა ფირფიტის სიახლოვეს მის მარცხენა
მხარეს არის $\vec{E}_1$, ხოლო მარჯვენა მხარეს $-\vec{E}_2$ (იხ.
სურ. 124). იპოვეთ ფირფიტის მუხტის ზედაპირული
სიმკვრივე.



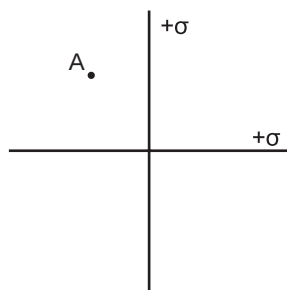
სურ. 124

* თუ ამოცანებში არ არის სპეციალური მითითება, იგულისხმეთ, რომ გარემო ვაკუ-
უმი ან ჰაერია.

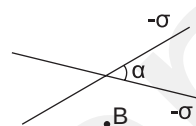
10. $\vec{E}$ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში მოძრაობას იწყებს q მუხტისა და m მასის მქონე ნაწილაკი. განსაზღვრეთ ნაწილაკის იმპულსის ცვლილება d მანძილის გავლის შემდეგ. ნაწილაკზე მოქმედ სიმძიმის ძალას ნუ გაითვალისწინებთ.

11. სურათ 125-ზე გამოსახულია ორი თანაბრად დამუხტული ურთიერთმართობული უსასრულო სიბრტყე. იპოვეთ ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული A წერტილში, თუ თითოეული სიბრტყის მუხტის ზედაპირული სიმკვრივეა σ .

12. სურათ 126-ზე გამოსახულია ორი თანაბრად დამუხტული უსასრულო სიბრტყე $\epsilon=1,85$ დიელექტრიკული შეღწევადობის გარემოში. იპოვეთ ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული B წერტილში, თუ $\alpha=45^\circ$ და თითოეული სიბრტყის მუხტის ზედაპირული სიმკვრივეა $-\sigma$.



სურ. 125



სურ. 126

13. რამდენი ე.ვ-ით შეიცვლება 4 ნკ და -3 ნკ წერტილოვან მუხტებს შორის ელექტრული ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია ვაკუუმში, თუ მათ შორის მანძილს 6 სმ-დან 12 სმ-მდე გავზრდით?

14. რა მუშაობა უნდა შევასრულოთ, რომ დიდი მანძილით დაშორებული ორი ელექტრონი ერთმანეთს 1 მ მანძილზე მივუახლოვოთ? ელექტრონებს შორის გრავიტაციულ მიზიდვას ნუ გაითვალისწინებთ.

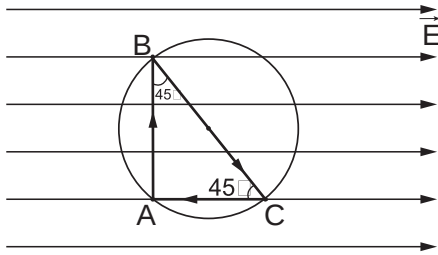
15. 1 მ მანძილით დაშორებული 12 ნკ მუხტისა და 90 მკ მასის ორი წერტილოვანი მუხტი ურთიერთგანზიდვის ძალის მოქმედებით იწყებს მოძრაობას. გრავიტაციული ურთიერთქმედება არ გაითვალისწინოთ და იპოვეთ მათი მაქსიმალური იმპულსების მოდულები.

16. ϵ დიელექტრიკული შეღწევადობის გარემოში a გვერდის მქონე კვადრატის წვეროებში მოთავსებულია m მასის და q მუხტის მქონე ნაწილაკები. ელექტრული განზიდვის ძალის მოქმედებით ისინი იწყებს მოძრაობას. იპოვეთ მათი მაქსიმალური სიჩქარის მოდულები. ნაწილაკებს შორის გრავიტაციულ მიზიდვას ნუ გაითვალისწინებთ.

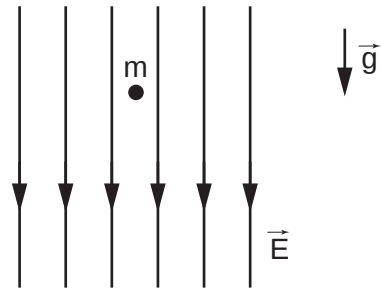
17. 2 კვ/მ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში მუდმივი კუთხური სიჩქარით აბრუნებენ 50 სმ სიგრძის არაგამტარ ღეროზე მიმაგრებულ 5 მკკ წერტილოვან მუხტს (სურ. 127). იპოვეთ A-დან B-ში და B-დან C-ში მუხტის გადაადგილებისას ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა.

18. ნახაზზე გამოსახულ 5000 ნ/კ დაძაბულობის ვერტიკალურ, ერთგვაროვან ელექტრულ ველში მოძრაობას იწყებს 3 მკ მასისა და 5 ნკ მუხტის ნაწილაკი (სურ. 128). იპოვეთ ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა და ნაწილაკის კინეტიკური ენერგია მოძრაობის დაწყებიდან 2 ნამის შემდეგ ($g=10$ მ/წმ²).

19. განმხოლოებული 48 სმ რადიუსის დამუხტული გამტარი სფეროს ცენტრიდან 24 სმ-ით დაშორებული წერტილის პოტენციალი 60 ვ-ია. გამოთვალეთ სფეროს ზედაპირიდან 96 სმ-ით დაშორებული წერტილის პოტენციალი.



სურ. 127



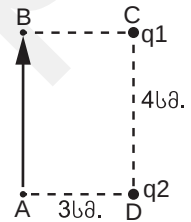
სურ. 128

20. 10 ნკ მუხტისა და 30 სანტიმეტრი რადიუსის მქონე ლითონის სფეროს ზედაპირიდან 70 სმ მანძილზე მოათავსეს -14 ნკ ნერტილოვანი მუხტი. გამოთვალეთ სფეროს ზედაპირის პოტენციალი.

21. დამინებული 32 სმ დიამეტრის ნეიტრალურ გამტარ სფეროს მისი ცენტრიდან 40 სმ მანძილზე მიუახლოვეს 12 ნკ ნერტილოვანი მუხტი. იპოვეთ დედამიწიდან სფეროზე გადმოსული ელექტრონების რაოდენობა.

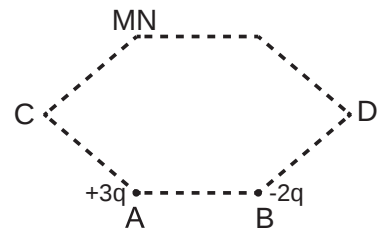
22. ნერტილოვანი მუხტის მიერ შექმნილი ელექტრული ველის ერთ-ერთი ძალწირის A და B ნერტილებში პოტენციალები, შესაბამისად, -180 ვ და -60 ვ-ია. იპოვეთ პოტენციალი AB მონაკვეთის შუა წერტილში.

23. ABCD მართკუთხედის C და D წვეროებში მოთავსებულია, შესაბამისად, $q_1=3$ მკკ და $q_2=18$ მკკ ნერტილოვანი მუხტები (სურ. 129). გამოთვალეთ ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა $q=0.5$ მკკ მუხტის გადაადგილებაზე მართკუთხედის A დან B წვეროში, თუ $AB=4$ სმ, ხოლო $BC=3$ სმ.



სურ. 129

24. a გვერდის მქონე წესიერი ექვსკუთხედის A და B წვეროებში მოთავსებულია, შესაბამისად, $2q$ და $-3q$ ნერტილოვანი მუხტები (სურ. 130). იპოვეთ C წვეროდან D წვეროში q მუხტის გადაადგილებაზე ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა.



სურ. 130

25. სფერული ფორმის ერთი და იმავე მუხტის მქონე 8 ერთნაირი ვერცხლისწყლის წვეთის შეერთებით მიღებული დიდი წვეთის პოტენციალი 52 ვ აღმოჩნდა. გამოთვალეთ პატარა წვეთის პოტენციალი.

26. 10 ნკ და 90 ნკ ნერტილოვან მუხტებს შორის მანძილი 60 სმ-ია. იპოვეთ იმ წერტილის პოტენციალი, რომელშიც ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული ნულის ტოლია.

27. 80 სმ გვერდის მქონე ტოლგვერდა სამკუთხედის წვეროებში 4 ნკ, 8 ნკ და -10 ნკ ნერტილოვანი მუხტებია მოთავსებული. რა მუხტი უნდა მოვათავსოთ სამკუთხედის ერთ-ერთი გვერდის შუა წერტილში, რომ სამკუთხედის ცენტრში პოტენციალი ნულს გაუტოლდეს?

28. ორი ერთნაირი მცირე ზომის ლითონის ბურთულიდან ერთის მუხტი 9-ჯერ მეტია მეორეზე. რამდენჯერ შეიცვლება ბურთულების ურთიერთქმედების კულონური ძალა მათი შეხებისა და იმავე მანძილზე დაშორების შემდეგ?

29. $R_1=20$ სმ რადიუსის ლითონის ბურთულის მუხტის ზედაპირული სიმკვრივეა $\sigma_1=16$ ნკ/სმ², ხოლო მისგან დიდი მანძილით დაშორებული $R_2=60$ სმ რადიუსის ლითონის ბურთულისა კი - $\sigma_2=80$ ნკ/სმ². იპოვეთ ბურთულების მუხტის ზედაპირული სიმკვრივეები წვრილი გამტარით მათი შეერთების შემდეგ.

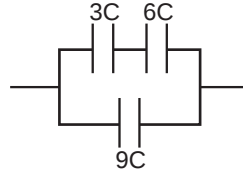
30. ერთი განმხოლოებული გამტარის მუხტი და პოტენციალი, შესაბამისად, $q_1=30$ ნკ, $\phi_1=15$ ვ-ია, მეორე განმხოლოებული გამტარისა კი – $q_2=90$ ნკ, $\phi_2=5$ ვ. იპოვეთ გამტართა მუხტები წვრილი გამტარით მათი შეერთების შემდეგ.

31. განსაზღვრეთ სურათ 131-ზე გამოსახული ბატარეის ელექტროტევადობა.

32. განსაზღვრეთ სურათ 132-ზე გამოსახული ბატარეის ელექტროტევადობა.



სურ. 131

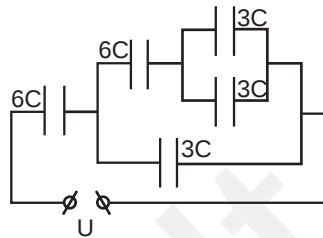


სურ. 132

33. განსაზღვრეთ სურათ 133-ზე გამოსახულ ბატარეაზე დაგროვილი მუხტი, თუ $C=4$ ნფ $U=300$ ვ.

34. როგორ შეიცვლება ბრტყელი, ჰაერიანი კონდენსატორის ელექტროტევადობა, თუ შემონაფენებს შორის მათ პარალელურად შევიტანთ ისეთივე ზომის ლითონის ფირფიტას, რომლის სისქე კონდენსატორის შემონაფენებს შორის მანძილის მესამედია?

35. როგორ შეიცვლება ბრტყელი, ჰაერიანი კონდენსატორის ელექტროტევადობა, თუ ფირფიტებს შორის სივრცის მესამედს შევავსებთ 6-ის ტოლი დიელექტრიკული შეღწევადობის მქონე დიელექტრიკით (სურ. 134).



სურ. 133



სურ. 134

36. 200 ვ ძაბვის წყაროსთან მიერთებულია 3 ნფ ტევადობის კონდენსატორი. რა ენერგია გაედინება კონდენსატორიდან, თუ ფირფიტებს შორის მანძილს 2-ჯერ გავზრდით?

37. დამუხტული, ბრტყელი ჰაერიანი კონდენსატორი გამორთულია ძაბვის წყაროდან. როგორ შეიცვლება კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგია და ველის დაძაბულობის მოდული, თუ ფირფიტებს შორის მანძილს გავაორმაგებთ, მათ შორის სივრცეს კი პარაფინით ამოვავსებთ?

38. 4 კვ ძაბვის წყაროსთან მიერთებულია ბრტყელი კონდენსატორი, რომლის ფირფიტებს შორის სივრცე შევსებულია მინით. ფირფიტების გადაფარვის ფართობი და მათ შორის მანძილი, შესაბამისად, 10 სმ² და 7 მმ-ია. იპოვეთ: კონდენსატორის ტევადობა, მასზე დაგროვილი მუხტი, ელექტრული ველის დაძაბულობა ფირფიტებს შორის და კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგიის სიმკვრივე.

39. 600 ვ ძაბვის წყაროსთან მიერთებული კონდენსატორის ფირფიტებს შორის მანძილი 5 მმ-ია. კონდენსატორში ფირფიტების პარალელურად შეიჭრა ელექტრონი. სიმძიმის ძალას ნუ გაითვალისწინებთ და იპოვეთ აჩქარება, რომლითაც ელექტრონი კონდენსატორში იმოძრაავებს.

40. 800 ვ ძაბვის წყაროსთან მიერთებული კონდენსატორის ფირფიტებს შორის მანძილი 16 მმ-ია. კონდენსატორის ფირფიტების პარალელურად შუაში 20 მგ $\frac{3}{5}$ სიჩქარით შეიჭრა ელექტრონი. სიმძიმის ძალას ნუ გაითვალისწინებთ და იპოვეთ ელექტრონის სიჩქარე კონდენსატორიდან გამოსვლის მომენტში, თუ კონდენსატორის ფირფიტის სიგრძე 2 სმ-ია.

ზოგიერთი ნივთიერების სიმკვრივე

ნივთიერება	ρ , კგ/მ ³	ρ , გ/სმ ³	ნივთიერება	ρ , კგ/მ ³	ρ , გ/სმ ³
მყარი ნივთიერება, 20 °C (გარდა ყინულისა)					
ოსმიუმი	22 600	22,6	მარმარილო	2 700	2,7
ირიდიუმი	22 400	22,4	ფანჯრის მინა	2 500	2,5
პლატინა	21 500	21,5	ფაიფური	2 300	2,3
ოქრო	19 300	19,3	ბეტონი	2 300	2,3
ტყვია	11 300	11,3	სუფრის მარილი	2 200	2,2
ვერცხლი	10 500	10,5	აგური	1 800	1,8
სპილენძი	8 900	8,9	პოლიეთილენი	920	0,92
ფოლადი, რკინა	7 800	7,8	პარაფინი	900	0,9
კალა	7 300	7,3	ყინული	900	0,9
თუთია	7 100	7,1	მუხა (მშრალი)	700	0,7
თუჯი	7 000	7	ფიჭვი (მშრალი)	400	0,4
ალუმინი	2 700	2,7	კორპი	240	0,24
თხევადი ნივთიერება, 20 °C					
ვერცხლისწყალი	13 600	13,6	ნავთი	800	0,8
გოგირდმჟავა	1 800	1,8	სპირტი	800	0,8
გლიცერინი	1 200	1,2	ნავთობი	800	0,8
ზღვის წყალი	1 030	1,03	აცეტონი	790	0,79
წყალი	1 000	1	ბენზინი	710	0,71
მზესუმზირის ზეთი	930	0,93	თხევადი კალა 400 °C	6 800	6,8
მანქანის ზეთი	900	0,9	თხევადი ჟანგბადი -194 °C	860	0,86
აირადი ნივთიერება, 0 °C (ნორმალური პირობებისას)					
ქლორი	3,21	0,00321	ბუნებრივი აირი	0,8	0,0008
ჟანგბადი	1,43	0,00143	წყლის ორთქლი 100 °C	0,59	0,00059
ჰაერი	1,29	0,00129	ჰელიუმი	0,18	0,00018
აზოტი	1,25	0,00125	წყალბადი	0,09	0,00009

გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობა 20° C-ზე.			
ქალაქი	5	პარაფინი	2,1
ვაკუუმი	1	ქარვა	2,8
წყალი	81	ქარსი	6
ჰაერი	1	მინა	7
კვარცი	4,3	ფაიფური	7
ნავთი	2,1	ებონიტი	2,8
ზეთი	2,5	ეთილის სპირტი	24

საგნობრივი საძიებელი

- არაპოლარული დიელექტრიკი 53
ატომი 7,19
ახლოქმედების თეორია 34
გავლენით დაელექტროება 27
გამტარი 30,50
განმხილვითი გამტარი 82
დიელექტრიკი 22
დიელექტრიკის პოლარიზაცია 56
დიელექტრიკული შეღწევადობა 56,88,104
ეკვიპოტენციალური ზედაპირები 73,75
ელექტრონვოლტი 70
ელექტრონი 16,17,18,19
ელექტრონული მექანიზმი 54
ელექტროსტატიკური დაცვა 51
ელექტროსტატიკური ველი 36,40,41
ელექტროსტატიკური ინდუქცია 50
ელექტროტევადობა 82,83,86,87
ელექტრულად ჩაკეტილი სისტემა 25
ელექტრული დიპოლი 54
ელექტრული ველების სუპერპოზიციის პრინციპი 37
ელექტრული ველი 34
ელექტრული ველის დაძაბულობა 36,45
ელექტრული ველის დაძაბულობის წირები 40
ელექტრული ველის მუშაობა 60
ელექტრული ველის ენერგიის სიმკვრივე 95
ელექტრული ველის ნერტილის პოტენციალი 69
ელექტრული მუდმივა 31
ელექტრული მუხტი 13
ერთგვაროვანი ელექტრული ველი 42
ვოლტი 69
იონური დიელექტრიკი 54
კონდენსატორების შეერთება 91
კონდენსატორი 86
კონდენსატორის შემონაფენი 86
კულონი 13
კულონის კანონი 30,31
კულონური ძალები 31
„ლეიდენის ქილა“ 87
მანძილზე ქმედების თეორია 34
მუხტის ზედაპირული სიმკვრივე 79
მუხტის შენახვის კანონი 25
ნახევარგამტარი 23
ნეიტრონი 17
პოლარული დიელექტრიკი 53
პოტენციალური ველი 60
პროტონი 17
სასინჯი მუხტი 35,66
სხეულთა დაელექტროება 10
ფარადა 83
„ფარადეის გალია“ 51
ძაბვა 69
ნერტილოვანი ელექტრული მუხტი 30
ხახუნით დამუხტვა 26

პასუხები

თავი I

§3 1) სკალარული; 2) ნულის; 3) ოთხს; 4) $9,6 \cdot 10^{-19}$; 5) არა; 6) არა; 7) $-4,8 \cdot 10^{-19}$ კ; 8) $3,2 \cdot 10^{-19}$ კ; 6,68 $\cdot 10^{-27}$ კგ; 9) $1,6 \cdot 10^{-11}$ კ; $-1,6 \cdot 10^{-11}$ კ; არ შეცვლილა; 10) დაახლოებით 3670-ჯერ.

§4 1) უმნიშვნელოდ შემცირდება; 2) უმნიშვნელოდ შემცირდება; 3) გაიზრდება; 4) შესაძლებელია; 5) შესაძლებელია; ჭექა-ქუხილი; 6) ჰაერში არსებული ნაწილაკები შეხებისას ართმევს მუხტს; 7) პლასტმასის სავარცხელი იმუხტება. ალუმინის სავარცხელი არა; 8) რომ არ დაგროვდეს მუხტი; 9) არა; 10) ღერო უნდა იყოს გამტარი.

§5 1) 6 ნკ; 2) -q; 3) 5 ნკ; 4) ბუშტი გავლენით ელექტროვდება; 5) არა; 8) უარყოფითი; 9) დადებითი.

§6 1) $36 \cdot 10^{-9}$ ნ; 2) არ შეიცვლება; 3) 9-ჯერ შემცირდება; 4) 10^{11} ელექტრონი 5) მიზიდვა შეიცვლება განზიდვით; ძალის მოდული შემცირდება 15-ჯერ; 6) $81 \cdot 10^{-7}$ ნ; 7) 0,91 ნ; 8) დიდი მუხტიდან 6 მ მანძილზე; 9) მოდულით პატარა მუხტიდან 4 მ მანძილზე; 10) $\sqrt{2 \cdot 36 \cdot 10^{-3}}$ ნ.

თავი II

§7 1) 250 ნ/კ; 2) $42 \cdot 10^{-8}$ ნ; 3) $5 \cdot 10^4$ ნ/კ ვერტიკალურად ზევით მიმართული; 4) $25 \cdot 10^{11}$; 5) 1600 ნ/კ; 6) სხვადასხვანიშნიანის შემთხვევაში; 7) 40 კნ/მ მიმართული დადებითი მუხტიდან უარყოფითისკენ; 8) პატარა მუხტიდან 1 მ მანძილზე; 9) $k \frac{4|q|}{3a^2}$; 10) 0.

§8 1) დაძაბულობის ვექტორის მიმართულება; 2) დაძაბულობის ვექტორის საპირისპირო მიმართულება; 3) C ნერტილში; 4) მე-2 სურათზე; 5) არა; 6) $a = Eq/m$; 7) $v = Eq/m$; 8) დადებითი იმოდრავებს ზრდადი სიჩქარით, უარყოფითი კი - კლებადით; 9) 20 მ/წმ²; 10) 45°.

§9 1) 1800 ნ/კ; 2) $28 \cdot 10^{-10}$ კ; 3) 0; 4) 170 ნ/კ; 5) $-6 \cdot 10^{-3}$ კ/მ²; 6) $3 \cdot 10^{-3}$ კ; 7) 10^4 ნ/კ; 8) გაიზრდება 6-ჯერ; 9) 0; $q/\epsilon_0 S$; 10) 15 სმ.

§11 1) 4; 2) შემცირდება 2,1-ჯერ; 3) შემცირდება 90-ჯერ; 4) შევამციროთ 9-ჯერ;

5) 1 მ; 6) 63 ნ/კ; 7) შემცირდა $\frac{810}{21}$ -ჯერ; 8) $\frac{40}{7}$; 9) $\epsilon_3 < \epsilon_1 < \epsilon_2$; 10) 1/3.

თავი III

§12 1) შეკრულ ტრაექტორიაზე ველის მუშაობა ნულია; 2) უარყოფითს; 3) 0;

4) ტოლია; 5) $-8 \cdot 10^{-17}$ ჯ; 6) $14,4 \cdot 10^{-17}$ ჯ; 7) მიახლოებით $2,1 \cdot 10^{-3}$ ჯ; 8) 0; მიახლოებით $-2,1 \cdot 10^{-3}$ ჯ; 9) შემცირდა $10,8 \cdot 10^{-5}$ ჯ-ით; 10) 24 მ/წმ.

§13 1) მცირდება; 2) იზრდება; 3) დადებითს; 4) 27 ჯ; 5) 7,5 ჯ; 6) $-15,36 \cdot 10^{-28}$ ჯ; 7) -48 ჯ; 8) შემცირდა $288 \cdot 10^{-9}$ ჯ-ით; 9) $17,28 \cdot 10^{-29}$ ჯ; 10) 3 მ/წმ.

§14 1) 3 ვ; 2) 960 ვ; 3) 16-ჯერ; 4) 36 კვ; 5) 1296 ვ; 6) $-6 \cdot 10^{-2}$ ჯ; 7) მცირე მუხტიდან 0,5 მ-ით და 1 მ-ით დაშორებულ წერტილებში; 8) $-11 \cdot 10^{-3}$ ჯ; 9) $A = k \frac{q^2}{a} \cdot \frac{4 + \sqrt{2}}{2}$; 10) 80 ვ.

§15 1) 0; 2) მუშაობები ტოლია; 3) $\varphi_A < \varphi_B$; 4) 500 ვ; 5) 4,5 ვ; 6) 6000 ვ/მ; 7) ფ; 8) 400 ვ; 9) 50 ვ; 10) 5 სმ.

§16 1) 10^{11} ელექტრონი; 2) თითოეულს +2 ნკ; 3) შემცირდება 3-ჯერ; 4) გაიზრდება 25/16-ჯერ; 5) 150 ვ; 6) $k \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \cdot \frac{2}{1}$; 7) 3 მკვ და 9 მკვ; 8) -3 მკვ და -12 მკვ; 9) თითოეულის 180 კვ; 10) $\sigma_1 = 15 \cdot 10^{-12}$ კ/სმ² $\sigma_2 = 7,5 \cdot 10^{-12}$ კ/სმ².

§17 1) 0,3 მკვ; 2) 6 ნკ; 3) $1875 \cdot 10^{11}$ ელექტრონი; 4) პირველის ტევადობა 2-ჯერ მეტია მეორისაზე; 5) 2,7 ნვ; 6) შემცირდება 8-ჯერ; 7) 100 ვ; 8) 180 ვ; 9) 0; 10) 2000 ვ/მ;

§18 1) 250 პვ; 2) არა; 3) 17,7 პვ; 4) გაიზრდება 3-ჯერ; 5) 360 ნკ; 6) 4; 7) 11-ჯერ გაიზარდა;

8) ძაბვა და ფირფიტებს შორის მანძილი უცვლელია; 9) $15 \cdot 10^{-8}$ კ; 10) 160 პვ.

§19 1) 6 მკვ; 2) 10^{-4} კ; 3) 20 ვ; 4) 68 ნვ; 5) გაიზრდება 100-ჯერ; 6) 600ვ, 3 მკვ, 6 მკვ, 24 მკვ; 7) 12 ნვ, 24 ნვ, 36 ნვ, 6 ნვ, 4 ნვ, 18 ნვ, 8 ნვ; 8) $\frac{56}{11}$ პვ; 9) გაიზრდება 9 პვ-ით; 10) გაიზრდება 1,5-ჯერ.

§20 1) 24,5 მჯ; 2) 0,4 ჯ; 3) გაიზრდება 4-ჯერ; 4) 0,06 ჯ; 5) გაიზრდება 2,5-ჯერ;

6) შემცირდება 2-ჯერ; 7) დაძაბულობის მოდულიც და ენერგიის სიმკვრივეც შემცირდება 6-ჯერ; 8) პირველის ენერგია შემცირდება 4/3-ჯერ, მეორეს ენერგია შემცირდა 4-ჯერ; 9) 0,09 ჯ და 0,06 ჯ; 10) $w_2 = \frac{80}{3}$ მჯ $w_3 = \frac{160}{3}$ მჯ.

შემაჯამებელი ამოცანები

- 1) 1,2 ნ; 2) $45 \cdot 10^{-7}$ ნ; 3) +0,75 ნკ; -0,75 ნკ; 4) მიახლოებით $8,4 \cdot 10^{-8}$ კ; 5) მიახლოებით 2 ნ და მიახლოებით 22,5 გ; 6) $\operatorname{tg} \alpha = 2$; 7) 675 ვ/მ; 8) $E = \frac{6kq}{a^2}$; 9) $\sigma = \epsilon_0(E_2 - E_1)$;
 10) $\Delta p = \sqrt{2mdEq}$; 11) $E = \frac{\sqrt{2}\sigma}{2\epsilon_0}$; 12) $E \approx \frac{|\sigma|}{2\epsilon_0}$; 13) 5,625 ტეე; 14) $23,04 \cdot 10^{-29}$ ჯ;
 15) $108 \cdot 10^{-12}$ კგ $\frac{\text{მ}}{\text{წმ}}$; 16) $v \approx 1,65q\sqrt{\frac{k}{ma}}$; 17) $A_1 = 0$, $A_2 \approx +7$ მჯ;
 18) $E_{\text{კინ}} = \frac{121}{6} \cdot 10^{-4}$ ჯ $A = \frac{55}{6} \cdot 10^{-4}$ ჯ; 19) 20 ვ; 20) +174 ვ; 21) $3 \cdot 10^{10}$; 22) -90 ვ; 23) 0,9 ჯ;
 24) $A = \frac{5k \cdot q^2}{a} \cdot \frac{(3 - \sqrt{3})}{3}$; 25) 13 ვ; 26) 2,4 კვ; 27) -1 ნკ; 28) გაიზრდება 25/9-ჯერ;
 29) 184 ნკ/სმ² და $184/3 = 61,3$ ნკ/სმ²; 30) 12 ნკ და 108 ნკ; 31) 9C; 32) 11C; 33) 3,6 მკვ;
 34) გაიზარდა 3/2-ჯერ; 35) გაიზარდა 18/13-ჯერ; 36) $3 \cdot 10^{-5}$ ჯ; 37) ენერგია შემცირდა 21/20-ჯერ. დაძაბულობის მოდული შემცირდა 2,1-ჯერ; 38) $8,85 \cdot 10^{-12}$ ფ; $354 \cdot 10^{-10}$ კ;
 მიახლოებით $57 \cdot 10^4$ ვ/მ; მიახლოებით 20 ჯ/მ³; 39) $2,1 \cdot 10^{16}$ მ/წმ²; 40) მიახლოებით $22 \cdot 10^6$ მ/წმ.

