

მერაბ ტულუში, თეიმურაზ შენგელია,
თემურ შენგელია, ოთარ ლონდაძე

ფიზიკა

მოსწავლის წიგნი

11

გრიფმინიჭებულია საქართველოს განათლებისა და
მეცნიერების სამინისტროს მიერ 2023 წელს



გამომცემლობა „საქართველოს მაცნე“

ფიზიკა 11

მოსწავლის ნიშანი

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

ტელ: 568 10 54 67; 574 40 08 57

ელ. ფოსტა: info@saqmatsne.ge

www.saqmatsne.ge

© გამომცემლობა „საქართველოს მაცნე“

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

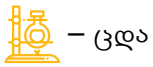
ISBN 978-9941-16-849-9

სარჩევი

შესავალი.....	7
თავი I. ელექტრომაგნიტური მოვლენები.....	9
§ 1.1 ბუნებრივი და ხელოვნური მაგნიტები.....	10
§ 1.2 დენის მაგნიტური მოქმედება. ერსტედის ცდა.....	13
§ 1.3 მაგნიტური ველი	15
§ 1.4 მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი	19
§ 1.5 მაგნიტური ინდუქციის წირები	23
§ 1.6 მაგნიტური ველის მოქმედება დენიან გამტარზე. ამპერის ძალა	27
§ 1.7 წრფივი დენიანი გამტარების ურთიერთქმედება	31
§ 1.8 მაგნიტური ველის მოქმედება მოძრავ მუხტზე. ლორენცის ძალა.....	35
§ 1.9 დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობა ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში	38
§ 1.10 ნივთიერების მაგნიტური თვისებები	43
§ 1.11 ელექტრომაგნიტური ინდუქციის ძალის აღძვრა მაგნიტურ ველში მოძრავ გამტარში	47
§ 1.12 ელექტრომაგნიტური ინდუქცია.....	50
§ 1.13 მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი.....	52
§ 1.14 ინდუქციური დენის მიმართულება. ლენცის წესი.....	55
§ 1.15 ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი	57
§ 1.16 გრიგალური ელექტრული ველი	61
§ 1.17 თვითინდუქცია. ინდუქციურობა.....	63
§ 1.18 დენის მაგნიტური ველის ენერგია.....	66
§ 1.19 მუდმივი დენის ძრავა. მუდმივი დენის გენერატორი	68
I თავის შემადგამებელი ამოცანები.....	72
თავი II. რხევები და ტალღები	75
§ 2.1 რხევითი მოძრაობა	76
§ 2.2 თავისუფალი და იძულებითი რხევები. ჰარმონიული რხევა.....	79
§ 2.3 ზამბარიანი ქანქარა	84
§ 2.4 მათემატიკური ქანქარა	88
§ 2.5 ენერგიის გარდაქმნა მექანიკური რხევებისას	92
§ 2.6 რეზონანსი	97
§ 2.7 ტალღური პროცესი. ტალღის გავრცელება დრეკად გარემოში.....	101
§ 2.8 პერიოდული ტალღები	105
§ 2.9 ტალღური ზედაპირები. ინტერფერენციისა და დიფრაქციის მოვლენა	109
§ 2.10 ბგერითი ტალღები	112
§ 2.11 დოპლერის ეფექტი. აკუსტიკური რეზონანსი. ექო.....	118

§ 2.12 რხევითი კონტური	123
§ 2.13 იძულებითი ელექტრომაგნიტური რხევები. ცვლადი დენი, ცვლადი დენის გენერატორი	128
§ 2.14 ცვლადი დენის გარდაქმნა. ტრანსფორმატორი	133
§ 2.15 ელექტროენერჯიის წარმოება, გადაცემა და განაწილება	137
§ 2.16 ელექტრომაგნიტური ტალღები	140
ზოგიერთი ტიპის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების მავნე ზეგავლენისაგან თავის დაცვა	144
II თავის შემაჯამებელი ამოცანები.....	146
თავი III. გეომეტრიული ოპტიკა	149
§ 3.1 სინათლის ორგვარი ბუნება. სინათლის სიჩქარე.....	150
§ 3.2 სინათლის წრფივი გავრცელება	156
§ 3.3 სინათლის არეკვლა	162
§ 3.4 გამოსახულება ბრტყელ სარკეში	166
§ 3.5 სინათლის გარდატეხა	171
§ 3.6 სრული შინაგანი არეკვლა	177
§ 3.7 სინათლის გარდატეხა ბრტყელპარალელურ ფირფიტასა და სამკუთხა პრიზმაში	181
§ 3.8 სინათლის გარდატეხა ატმოსფეროში. მირაჟი	186
§ 3.9 ლინზები.....	189
§ 3.10 გამოსახულების აგება ლინზაში	194
§ 3.11 თხელი ლინზის ფორმულა	198
§ 3.12 თვალი. სათვალე	201
§ 3.13 ოპტიკური ხელსაწყოები.....	204
§ 3.14 ფოტოაპარატი.....	210
§ 3.15 სინათლის დისპერსია	212
§ 3.16 სინათლე და გრავიტაცია.....	214
III თავის შემაჯამებელი ამოცანები.....	217
საგნობრივი საძიებელი	220
პასუხები	222

პირობითი ნიშნები



– ცდა



– ამოხსენით ამოცანები



– გაიხსენეთ



– ერთად ამოვხსნათ ამოცანა



– დაფიქრდით



– აქტივობა

ამ ფონით აღნიშნული ტექსტი დაინტერესებულ მოსწავლეებს
დაეხმარება საკითხის ღრმად გასააზრებლად.

შესავალი

უკვე მეხუთე წელია, რაც ფიზიკის შესწავლა დაიწყო. თქვენ უკვე გაეცანით სხეულთა მოძრაობისა და წონასწორობის სახეებს, ბუნებაში მოქმედ სხვადასხვა ტიპის ძალებს, მუშაობას, ენერჯის მუდმივობის კანონს, სხეულთა აგებულებასა და მათში მიმდინარე სითბურ პროცესებს, ელექტრულ მუხტსა და დენს. ამ საკითხების შესწავლამ ალბათ დაგაფიქრათ, რომ ჩვენ გარშემო მიმდინარე მრავალი მოვლენა სწორედ ფიზიკური კანონებით აიხსნება.

ფიზიკამ, როგორც მეცნიერებამ, თავისი განვითარების ეტაპები განვლო. ფიზიკური თეორიები ექსპერიმენტზე დაყრდნობით იქმნება და დღეს ურთულესი ექსპერიმენტებით მონმდება ამ თეორიებიდან გამომდინარე დასკვნების სისწორე. ფიზიკამ რადიკალურად შეცვალა ადამიანთა წარმოდგენები სამყაროს შექმნისა და განვითარების შესახებ. მიუხედავად უდიდესი მიღწევებისა, თანამედროვე ფიზიკაში არის პრობლემები, რომელთა გადაჭრაც შეუფასებელ სარგებელს მოუტანს კაცობრიობას. ასეთებია, მაგალითად, მაღალტემპერატურული ზეგამტარობა და მართვადი თერმობირთვული სინთეზი.

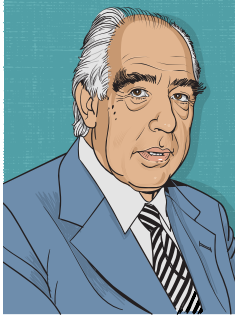


დიდი ადრონული კოლაიდერი

თანამედროვე ფიზიკა წარმოუდგენელია სხვა მეცნიერებებთან მჭიდრო კავშირის გარეშე, რამაც დასაბამი მისცა მასთან მომიჯნავე ბევრი ახალი დარგის წარმოშობას. მაგალითად, ფიზიკის და ქიმიის მიჯნაზე შეიქმნა ფიზიკური ქიმია და ელექტროქიმია. ასტრონომიულ კვლევებში ფიზიკური მეთოდების გამოყენებამ საფუძველი დაუდო ასტროფიზიკას. განსაკუთრებით აქტუალურია ფიზიკის მიღწევების გამოყენება ბიოლოგიასა და მედიცინაში. თანამედროვე სამედიცინო დიაგნოსტიკასა და მკურნალობაში გამოიყენება ურთულესი ხელსაწყოები, რომლებიც ფიზიკის უახლეს მიღწევებს ეფუძნება.



ამ სახელმძღვანელოში თქვენ მრავალ ახალ ფიზიკურ მოვლენას გაეცნობით. გაიგებთ, როგორ და სად წარმოიქმნება ელექტრული დენი, რომელსაც ყოველდღიურად ვიყენებთ, რა პრინციპზე მუშაობს ხელსაწყოები, რომელთა გარეშე თანამედროვე ყოფა წარმოუდგენელია, როგორ და რატომ აჩქარებენ დამუშავებულ ნაწილაკებს მონოპოლიტობებში, რომლებსაც



ნილს ბორი

შესწავლისადმი ინტერესი გოგონათა და ვაჟთა შორის ჩვენს ქვეყანაშიც. ამის დასტურია მათი მონაწილეობა სხვადასხვა კონფერენციებსა და ოლიმპიადებში, რომელიც მრავალი მედლითაა აღნიშნული.



ნიკოლა ტესლა

ამაჩქარებლები ჰქვია, მაგალითად, დიდ ადრონულ კოლაიდერში, როგორ მოდის ჩვენამდე ინფორმაცია კოსმოსური ხომალდებიდან, როგორ „მუშაობს“ თვალი და სხვა ოპტიკური ხელსაწყოები, რა პირობებში წარმოიქმნება ცისარტყელა და რა შემთხვევებში იქმნება ოპტიკური ილუზიები.

ბოლო წლებში საგრძნობლად იმატა ინტერესმა ინჟინერიისადმი. ეს დაკავშირებულია ამ დარგის მიღწევებთან და პერსპექტივებთან. ახალგაზრდები ქმნიან ბევრ საინტერესო მონოპოლიტობას, რომელთაც პრაქტიკული გამოყენება აქვს. შესაბამისად, მატულობს ფიზიკის

ფიზიკის, ისევე როგორც სხვა ნებისმიერი მეცნიერების, განვითარება დიდ მეცნიერ-ფიზიკოსთა შემოქმედებითა შრომამ განსაზღვრა. ფიზიკის სხვადასხვა დარგში დიდი წვლილი შეიტანეს ისააკ ნიუტონმა, მაიკლ ფარადეიმ, ჯეიმს მაქსველმა, ანდრე მარი ამპერმა, მარია სკლოდოვსკა-კიურიმ, ალბერტ აინშტაინმა, ჰენდრიკ ლორენცმა, ნილს ბორმა, ირენ ჟოლიო-კიურიმ, ერნსტ რეზერფორდმა, ნიკოლა ტესლამ, ლიზა მაიტნერმა, ენრიკო ფერმიმ, სტივენ ჰოკინგმა და სხვებმა.



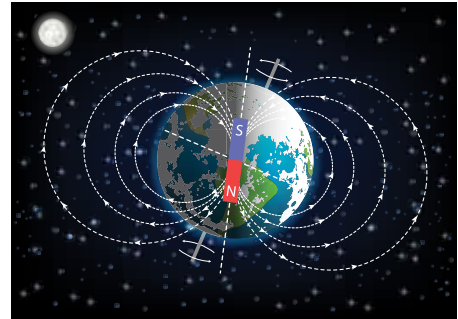
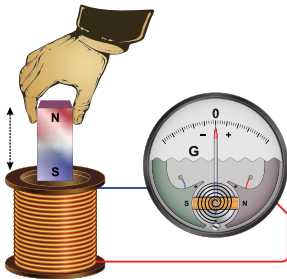
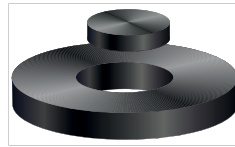
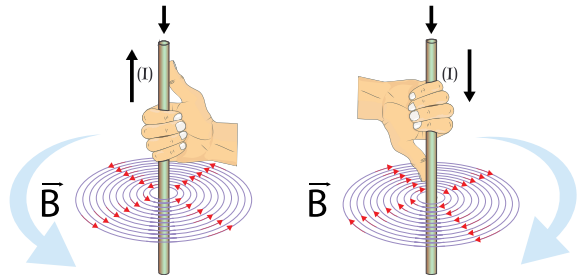
მარია სკლოდოვსკა-კიური



სტივენ ჰოკინგი

თავი I

ელექტრომაგნიტური მოვლენები



ამ თავში თქვენ გაეცნობით:

- ბუნებრივ და ხელოვნურ მაგნიტებს;
- დენიანი გამტარების ურთიერთქმედებას;
- მაგნიტურ ველსა და მის მახასიათებლებს;
- მაგნიტური ველის მოქმედებას მოძრავ მუხტებზე;
- მაგნიტური ველის მეშვეობით ელექტრული დენის აღძვრას;
- მაგნიტური ველის ენერგიას;
- ელექტრული დენის გენერატორსა და ელექტროძრავას.

§ 1.1 ბუნებრივი და ხელოვნური მაგნიტები

ალბათ ყველას გითამაშიათ მაგნიტებით. სახლში ბევრს მაცვივარზე მაგნიტური სურათებიც აქვს მიკრული. მაგნიტს მნიშვნელოვან მანძილზე შეუძლია რკინის ნაჭრების მიზიდვა. შეგიძინევიათ, კომპასის მაგნიტური ისარი ჯიუტად ცდილობს შემოტრიალდეს ისე, რომ ყოველთვის ჩრდილოეთისაკენ იყოს მიმართული. რა არის ამ მოვლენების მიზეზი?

ამ თავში გავეცნობით და შევეცდებით იმ მოვლენების ახსნას, რომლებშიც მთავარ როლს მაგნიტური ურთიერთქმედება ასრულებს.

ბუნებაში გვხვდება რკინის ზოგიერთი მადანი, რომლსაც რკინის ნაჭრების მიზიდვის უნარი აქვს (სურ. 1.1). თუ ასეთი მადნის მოგრძო ნაჭერს ძაფზე ჩამოვკიდებთ, ის დედამიწის მერიდიანის გასწვრივ დადგება. ასეთ სხეულებს **ბუნებრივ მაგნიტებს** უწოდებენ.

ბუნებრივი მაგნიტის მახლობლად მოთავსებული რკინის საგანი, თვითონაც მაგნიტდება, ანუ გაუჩნდება სხვა რკინის საგნების მიზიდვის უნარი. დამაგნიტებული საგანი მით უფრო ძლიერ მაგნიტურ თვისებებს შეიძენს, რაც უფრო ახლოს მოვათავსებთ მას მაგნიტთან. საგანი განსაკუთრებით ძლიერად დამაგნიტდება მაშინ, როცა ის მაგნიტს მიეკრობა. ეს შეიძლება მარტივი ცდით შემოწმდეს – დამაგნიტებისას, რაც უფრო შორს იყო საგანი მაგნიტიდან, მით ნაკლებ მის მსგავს საგანს შეიკავებს (სურ. 1.2).



სურ. 1.1



სურ. 1.2


თუ დამაგნიტებულ რკინის საგანს მაგნიტს მოვაშორებთ, ის მაგნიტური თვისებების მნიშვნელოვან ნაწილს დაკარგავს, მაგრამ მაინც დამაგნიტებული დარჩება, ანუ **ხელოვნურ მაგნიტად** გადაიქცევა. ასეთი სხეულის რკინის ნაქლიბში ჩადებისას, ნაქლიბი მას მიეკრობა.

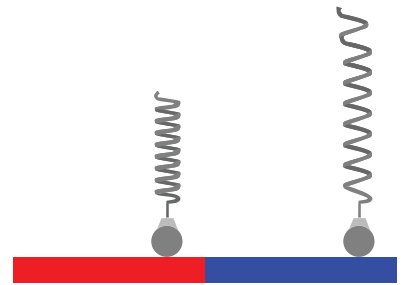
სხეულის დამაგნიტებას, როდესაც ის მაგნიტის მახლობლადაა მოთავსებული, **დროებითი დამაგნიტება** ეწოდება, ხოლო დამაგნიტებას, რომელიც სხეულს რჩება მაგნიტის მოშორების შემდეგ – **ნარჩენი დამაგნიტება**. ცდები აჩვენებს, რომ ნარჩენი დამაგნიტება ბევრად სუსტია დროებით დამაგნიტებაზე.

როგორც დროებითი, ასევე ნარჩენი დამაგნიტება რკინისა და ფოლადისათვის განსხვავებულია. მაგალითად, რბილი რკინის დროებითი დამაგნიტება ბევრად ძლიერია, ვიდრე ფოლადისა. სამაგიეროდ, ფოლადის ნარჩენი დამაგნიტება ბევრად ძლიერია, ვიდრე რბილი რკინის. ამრიგად, თუ რბილი რკინისა და ფოლადის ორ ერთნაირ ძელაკს ავიღებთ და მაგნიტის ახლოს მოვათავსებთ, რკინის ძელაკი უფრო ძლიერად დამაგნიტდება, ვიდრე ფოლადის. მაგნიტის მოშორებისას კი რკინის ძელაკი თითქმის მთლიანად განმაგნიტდება, ხოლო ფოლადისა თავისი დამაგნიტების დიდ ნაწილს შეინარჩუნებს. ამის გამო, მუდმივ ხელოვნურ მაგნიტებს სპეციალური ხარისხის ფოლადისაგან ამზადებენ. მიღებული ხელოვნური მაგნიტი ყოველთვის უფრო სუსტია, ვიდრე მაგნი-

ტი, რომლის გავლენითაც ის დამაგნიტდა. დამაგნიტებისას სხეულზე დარტყმა ან მისი დაქნევა ხელს უწყობს დამაგნიტების პროცესს, ხოლო მზა მუდმივი მაგნიტის შერყევა ან ტემპერატურის მკვეთრი ცვლილება მისი განმაგნიტების ხელშემწყობია.

გავარკვიოთ, ერთნაირია, თუ არა ბუნებრივი და ხელოვნური მაგნიტების ზედაპირის სხვადასხვა ნაწილების მაგნიტური თვისებები. ჩავატაროთ ცდა.

 ზამბარაზე დაკიდებული რკინის ბურთულა მაგნიტის რაიმე წერტილს შევახოთ და შემდეგ, ზამბარის გაჭიმვით შევეცადოთ მოვაცილოთ ის მაგნიტს. ზამბარის გაჭიმვის სიდიდე თვალნათლივ შეგვიქმნის წარმოდგენას იმ ძალაზე, რომელიც საჭიროა ბურთულისა და მაგნიტის მიზიდულობის დასაძლევად. დავინახავთ, რომ მაგნიტის კიდეებიდან ბურთულის მოსაცილებლად საკმაოდ დიდი ძალისხმევა დაგვჭირდება, ხოლო მაგნიტის შუაში ბურთულა თითქმის არ მიიზიდება (სურ. 1.3).



სურ. 1.3

მაგნიტის ზედაპირის იმ ნაწილებს, სადაც რკინის სხეულების მიზიდვა საგრძნობია, **მაგნიტის პოლუსებს** უწოდებენ, ხოლო ზედაპირის იმ ნაწილებს, სადაც მიზიდულობა არ იგრძნობა ან ძალიან სუსტია – **მაგნიტის ნეიტრალურ ზონას**.

თუ მაგნიტს რკინის ნაქლიბში ჩავდებთ და შემდეგ ამოვიღებთ, დავინახავთ, რომ ის მაგნიტის პოლუსებს მიეკრა, მის შუა ნაწილს კი – არა (სურ. 1.4).

ჩვეულებრივ, ხელოვნურ მაგნიტებს ზოლის ან ნალის ფორმას აძლევენ (სურ. 1.5). ასეთ მაგნიტებს თითქმის ყოველთვის ბოლოებში ორი პოლუსი აქვს, მათ შორის კი – ნეიტრალური ზონა. მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ თუ მაგნიტს პოლუსებს შორის გავჭრით, კვლავ ორპოლუსიან ორ მაგნიტს მივიღებთ, ანუ, მაგნიტის პოლუსების განცალკევება შეუძლებელია. შეიძლება შეიქმნას 4, 6, 8, ... პოლუსიანი მაგნიტები, რომლებიც ნეიტრალური ზონებითაა გაყოფილი, მაგრამ შეუძლებელია შეიქმნას მაგნიტი, რომელსაც პოლუსების კენტი რაოდენობა ექნება.



სურ. 1.4



სურ. 1.5

ღეროს ფორმის გრძელ და წვრილ მაგნიტს **მაგნიტურ ისარს** უწოდებენ. თუ მაგნიტურ ისარს ცენტრით ძაფზე ჩამოვკიდებთ ან რაიმეს წვეტზე მოვათავსებთ ისე, რომ მას შეეძლოს თავისუფალი ბრუნვა, მაშინ ის ყოველთვის ისე განთავსდება, რომ მისი ერთი პოლუსი მიმართული იქნება დედამიწის ჩრდილოეთ პოლუსისაკენ, მეორე კი – სამხრეთ პოლუსისაკენ (სურ. 1.6). ამის მიზეზი ისაა, რომ მაგნიტის მსგავსად, დედამიწაც მაგნიტურ თვისებებს ავლენს. მაგნიტის იმ პოლუსს, რომელიც ჩრდილოეთისკენაა მიმართული, **ჩრდილოეთ პოლუსს** უწოდებენ და აღნიშნავენ **N** ასოთი, ხოლო მეორეს – **სამხრეთ პოლუსს** და აღნიშნავენ **S** ასოთი. სწორედ პატარა მაგნიტური

ისარი გამოიყენება კომპასში, რომლის მეშვეობით დედამიწის ჩრდილოეთი და სამხრეთი პოლუსების მდებარეობას ვადგენთ.


თუ ისარს მაგნიტს მივუახლოვებთ, დავინახავთ, რომ მისი ჩრდილოეთ პოლუსი მიიზიდება მაგნიტის სამხრეთ პოლუსით და განიზიდება ჩრდილოეთ პოლუსით (და პირიქით). შედეგად, მაგნიტური ისარი თავისი ღერძის გარშემო შემოტრიალდება (სურ. 1.7). იმავე მექანიზმით იზიდავს მაგნიტი რკინის სხეულებს: მაგნიტის მიახლოებით რკინის სხეული ჯერ დამაგნიტდება, შემდეგ კი შემოტრიალდება და მაგნიტის მიერ მიიზიდება.



სურ. 1.6



სურ. 1.7

 მაგნიტური ისრით შესაძლებელია იმის დადგენა, რაიმე რკინის ნაჭერი მაგნიტია თუ არ არის დამაგნიტებული. როგორ დაადგენთ ამას?

დასკვნები:

- სხეულის დამაგნიტებას, როდესაც ის მაგნიტის მახლობლადაა მოთავსებული, დროებითი დამაგნიტება ეწოდება;
- დამაგნიტებას, რომელიც სხეულს რჩება მაგნიტის მოშორების შემდეგ, ნარჩენი დამაგნიტება ეწოდება;
- მაგნიტის ზედაპირის იმ ნაწილებს, სადაც რკინის სხეულების მიზიდვა საგრძნობია, მაგნიტის პოლუსებს უწოდებენ;
- მაგნიტის ზედაპირის იმ ნაწილებს, სადაც მიზიდულობა არ იგრძნობა ან ძალიან სუსტია, მაგნიტის ნეიტრალურ ზონას უწოდებენ;
- თავისუფალი ბრუნვის უნარის მქონე მაგნიტის იმ პოლუსს, რომელიც ჩრდილოეთისკენაა მიმართული, ჩრდილოეთ პოლუსს უწოდებენ და აღნიშნავენ N ასოთი, ხოლო მეორეს – სამხრეთ პოლუსს და აღნიშნავენ S ასოთი.

საკონტროლო კითხვები:

1. რომელ სხეულებს უწოდებენ ბუნებრივ მაგნიტებს? ხელოვნურ მაგნიტებს?
2. რომელი დამაგნიტება უფრო ძლიერია – ნარჩენი თუ დროებითი?
3. რას წარმოადგენს მაგნიტური ისარი?
4. მიიზიდავენ თუ განიზიდავენ ერთმანეთს მაგნიტების ერთსახელიანი პოლუსები?

§ 1.2 დენის მაგნიტური მოქმედება. ერსტედის ცდა

მაგნიტების ურთიერთქმედება ძალიან ჰგავს ერთმანეთისაგან გარკვეული მანძილთა დაშორებული დამუხტული სხეულების ურთიერთქმედებას: ერთნაირნიშნის მუხტის მქონე სხეულების მსგავსად, მაგნიტების ერთსახელა პოლუსები ერთმანეთს განიზიდავს, ხოლო მაგნიტების სამხრეთი და ჩრდილოეთი პოლუსები ერთმანეთს მიიზიდავს, მსგავსად სხვადასხვა ნიშნის მუხტის მქონე სხეულებისა. სწორედ ამიტომ, საკმაოდ დიდი ხნის განმავლობაში მიაჩნდათ, რომ ელექტრული და მაგნიტური მოვლენები ერთმანეთის ანალოგიურია. მხოლოდ XVI საუკუნის ბოლოს ინგლისის სამეფო კარის ექიმმა, უილიამ ჰილბერტმა დაამტკიცა, რომ ეს მართებული არ არის. მართლაც, იმისათვის, რომ სხეულებს შორის ელექტრული ურთიერთქმედებას აღიძრას, წინაწარ მათი დამუხტვაა საჭირო (მაგალითად, გახახუნებით). მაგნიტების შემთხვევაში კი, მათზე წინასწარ რაიმე მოქმედების ჩატარება საჭირო არ არის. დამუხტული სხეულებისაგან განსხვავებით, ის ჩვეულებრივ ინარჩუნებს მაგნიტურ თვისებებს; ასევე, სხეული შეიძლება დაიმუხტოს დადებითად ან უარყოფითად, მაგრამ ერთი იზოლირებული მაგნიტური პოლუსის მიღება შეუძლებელია. ჰილბერტმა, პირველმა გამოთქვა ვარაუდი, რომ დედამინა გიგანტური მაგნიტია, რის გამოც მაგნიტური ისარი შესაბამისად ორიენტირდება.



უილიამ ჰილბერტი (1540-1603)

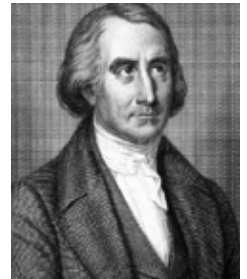


შარლ ოგუსტენ კულონი (1736-1806)

მაგნიტების ურთიერთქმედება რაოდენობრივად შეისწავლა შარლ ოგუსტენ კულონმა. ის იყენებდა იმავე გრეხით სასწორს, რომლითაც მუხტების ურთიერთქმედება შეისწავლა. კულონმა დაადგინა გრძელი მაგნიტების პოლუსების ურთიერთქმედების კანონი, რადგან მიიჩნევდა, რომ პოლუსებში კონცენტრირებული იყო „მაგნიტური მუხტები“. მაგნიტის სამხრეთ და ჩრდილოეთ პოლუსების გაყოფის შეუძლებლობა მან იმით ახსნა, რომ „მაგნიტურ მუხტებს“ ნივთიერების ერთი მოლეკულიდან მეორეში თავისუფ-

ლად გადასვლის უნარი არ აქვს. ახალი სიდიდის – „მაგნიტური მუხტის“ შემოტანით და მაგნიტური ურთიერთქმედების კანონის დაგენით, კულონმა მიიჩნია, რომ მაგნიტიზმის შესწავლის პრობლემა გადაწყვეტილია.

რეალობა ბევრად რთული აღმოჩნდა: მიუხედავად იმისა, რომ მეცნიერებმა ელექტრულ და მაგნიტურ მოვლენებს შორის განსხვავება აღიარეს, აღმოჩნდა რიგი ფაქტებისა, რომლებიც ამ მოვლენების ურთიერთკავშირს მიუთითებდა. ფრანგი ფიზიკოსი ფრასუა ჟან დომენიკ არაგო თავის ნაშრომში „ჭექა-ქუხილი“ აღწერს შემდეგ შემთხვევას: „1681 წლის ივლისში ღია ზღვაში ასეული მილით შესულ გემ „დედოფალს“ მეხი დაეცა. როცა დაღამდა, ვარსკვლავების განლაგებით დაადგინეს, რომ გემზე არსებული სამი



ფრასუა ჟან დომენიკ არაგო (1786-1853)

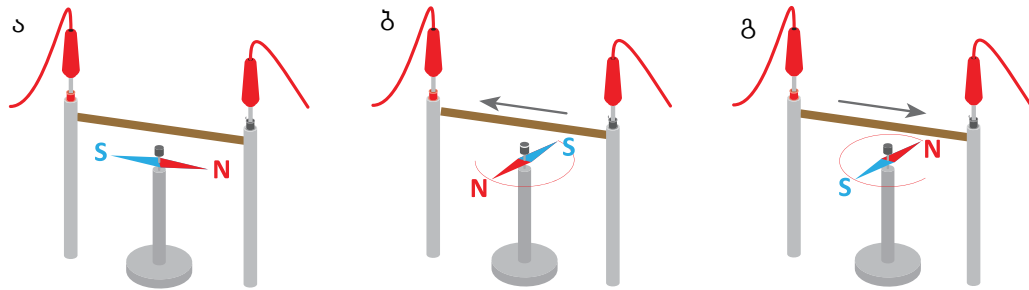


ჰანს ქრისტიან ერსტედი (1777-1851)

კომპასიდან, ორი, ჩრდილოეთის ნაცვლად, სამხრეთ მიმართულებას აჩვენებდა, მესამე კი – დასავლეთს“. არაგო ასევე აღწერს შემთხვევას, როდესაც სახლში, რომელსაც მეხი დაეცა, ფოლადის დანები, ჩანგლები და სხვა საგნები დამაგნიტდა. იმ პერიოდისთვის უკვე იცოდნენ, რომ ელვა ჰაერში გამავალ ძლიერ დენს წარმოადგენს, ამიტომ არაგოს მიერ აღწერილი ფაქტები იმაზე მიუთითებდა, რომ დენს რაღაც მაგნიტური თვისებები აქვს. თუმცა ექსპერიმენტულად დენის მაგნიტური თვისებები აღმოჩენილი და შესწავლილ იქნა მხოლოდ 1820 წელს, დანიელი ფიზიკოსის ჰანს ქრისტიან ერსტედის მიერ.

ერსტედის ცდა მდგომარეობდა შემდეგში: ლითონის უძრავი გამტარი გაჭიმული იყო მერიდიანის გასწვრივ, ანუ სამხრეთ – ჩრდილოეთის მიმართულებით. მასთან ახლოს მოათავსეს მაგნიტური ისარი. რადგან დედამიწა მაგნიტია, ისარი ასევე სამხრეთ – ჩრდილოეთის მიმართულებით ორიენტირდა, ანუ, გამტარი და ისარი ურთიერთპარალელურად განთავსდა (სურ. 1.8 ა). გამტარში დენის გატარებისას მაგნიტური ისარი შემოტრიალდა და გაჩერდა ისე, რომ გამტართან მართი კუთხე შექმნა (სურ. 1.8 ბ). დენის მიმართულების შეცვლისას ისარი 180° -ით შემოტრიალდა (სურ. 1.8 გ).

ერსტედმა ცდა სხვადასხვა ლითონისაგან დამზადებული გამტარებით ჩაატარა. ცდის შედეგი ლითონის გვარობაზე დამოკიდებული არ აღმოჩნდა. როგორც იცით, ყველა ლითონს ელექტრონული გამტარებლობა ახასიათებს. თუ ერსტედის ცდაში ლითონის გამტარს შევცვლით ელექტროლიტიანი მილით (იონური გამტარებლობა) ან მილით, რომელშიც აირადი განუხტვა მიმდინარეობს (ელექტრონულ-იონური გამტარებლობა), მაგნიტურ ისარზე ქმედება ისეთივე აღმოჩნდება, როგორც ლითონის გამტარის შემთხვევაში.



სურ. 1.8

ეს ცდები აჩვენებს, რომ დენიანი გამტარის გარემომცველ სივრცეში მოქმედებს ძალები, რომლებიც მაგნიტური ისრის მოძრაობას იწვევს. ეს ძალები ისეთივე ბუნებისაა, როგორც ძალები, რომლებიც ბუნებრივი ან ხელოვნური მაგნიტების მახლობლად მოქმედებს. მათ **მაგნიტურ ძალებს** უწოდებენ.

აღსანიშნავია, რომ ელექტრული დენის სამი მოქმედებიდან – სითბური, ქიმიური და მაგნიტური – მაგნიტური მოქმედება ყოველთვის ვლინდება. თქვენ უკვე იცით, რომ ერთი და იმავე დენის გავლისას გამტარში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა გამტარის წინააღობაზეა დამოკიდებული, ზეგამტარებში კი შესაძლებელია, დენის გავლას სითბოს გამოყოფა საერთოდ არ მოყვას. დენის ქიმიური მოქმედება ელექტროლიტებში ვლინდება, ლითონებში კი – არა. ერთადერთი მოქმედება, რომელიც ჩვენთვის ცნობილია და ელექტრულ დენს ყოველთვის თან ახლავს, მაგნიტური მოქმედებაა.

დასკვნები:

- იზოლირებული მაგნიტური პოლუსის მიღება შეუძლებელია;
- ელექტრული დენი მაგნიტურ ისარზე მაორიენტირებელ მოქმედებას ახდენს;
- ელექტრული დენის მოქმედებიდან ყოველთვის მხოლოდ მაგნიტური მოქმედება ვლინდება.

საკონტროლო კითხვები:

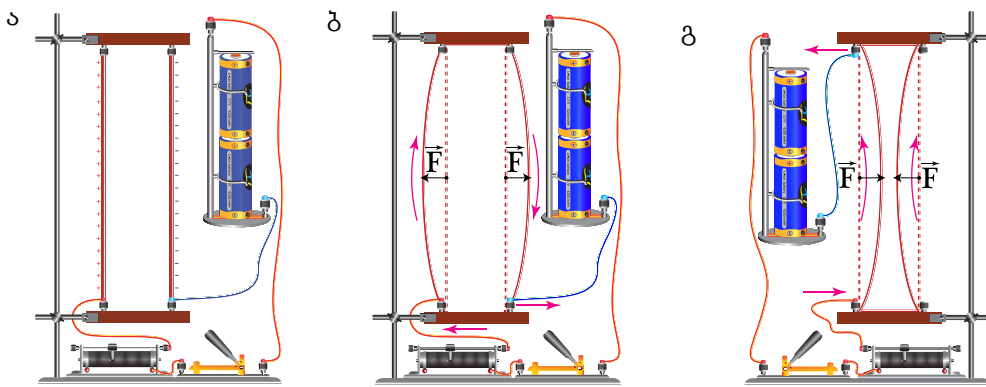
1. რა ანალოგიაა ელექტრული მუხტებისა და მაგნიტების ურთიერთქმედებებს შორის?
2. რომელი ფაქტების საფუძველზე დაადგინა არაგომ ელექტრულ და მაგნიტურ მოვლენებს შორის კავშირი?
3. როგორ ორიენტირდება მაგნიტური ისარი წრფივი დენიანი გამტარის გავლენით?
4. რომელ ძალებს უწოდებენ მაგნიტურს?

§ 1.3 მაგნიტური ველი

ერსტედის ცდიდან ცნობილია, რომ დენიანი გამტარის გარემომცველ სივრცეში მაგნიტურ ისარზე მოქმედებს მაგნიტური ძალები. იბადება კითხვა: ურთიერთქმედებენ თუ არა დენიანი გამტარები ერთმანეთთან?



ჩავატაროთ ცდა. ავილოთ ორი მოქნილი ლითონის გამტარი და ბოლოებით ერთმანეთის პარალელურად, ვერტიკალურად დავამაგროთ. გამტარები დენის წყაროს პოლუსებს მივუერთოთ, მაგრამ წრედი არ შევკრათ. დენის წყაროს მცირე ემძისა და გამტარების უმნიშვნელო ელექტროტევადობის შემთხვევაში, გამტარების მუხტი მცირე იქნება. შესაბამისად, მათ შორის შესამჩნევი მიზიდვა არ გამოვლინდება, ანუ, კულონური ურთიერთქმედება არ შეინიშნება (სურ. 1.9 ა). შევკრათ წრედი და გამტარების ბოლოები ისე მივუერთოთ დენის წყაროს, რომ მათში საპირისპირო მიმართულების დენი გადიოდეს. დავინახავთ, რომ გამტარები განიზიდება (სურ. 1.9 ბ). გამტარებში ერთი მიმართულების დენის არსებობისას კი ისინი ურთიერთმიზიდება (სურ. 1.9 გ). ცდა გვიჩვენებს, თუ დენი მხოლოდ ერთ გამტარში გადის, გამტარები არ ურთიერთქმედებს. ასევე არ გამოვლინდება ურთიერთქმედება, თუ ერთ-ერთი გამტარი წარმოადგენს ერთმანეთზე დაგრეხილ ორ მავთულს, რომლებშიც ტოლი და საპირისპირო მიმართულების დენები გადის, ანუ, ასეთი გამტარი მაგნიტური თვისებების თვალსაზრისით, ისევე იქცევა, როგორც უდენო გამტარი.



სურ. 1.9

როგორც ელექტროდინამიკიდან იცით, დამუხტული სხეულები ერთმანეთზე უშუალოდ არ მოქმედებს. მათი ურთიერთქმედება დამუხტული სხეულების გარშემო შექმნილი ელექტრული ველებით ხორციელდება. ანალოგიურად, დენიანი გამტარების ურთიერთქმედებაც, მათ გარემომცველ სივრცეში შექმნილი **მაგნიტური ველებით** ხორციელდება: ერთი დენიანი გამტარი თავის გარშემო ქმნის მაგნიტურ ველს, რომელიც მოქმედებს მეორე დენიან გამტარზე, და პირიქით. ვინაიდან ელექტრული დენი დამუხტული ნაწილაკების მოწესრიგებულ მოძრაობას წარმოადგენს, შეიძლება დავასკვნათ: **მაგნიტური ველი არის მატერიის ფორმა, რომლის საშუალებითაც ურთიერთქმედებენ მოძრავი დამუხტული ნაწილაკები.**

მაგნიტური ველის ძირითადი თვისებებია: **1. მაგნიტური ველი იქმნება ელექტრული დენით (მოძრავი მუხტებით); 2. მაგნიტური ველი ვლინდება დენზე (მოძრავ მუხტებზე) მოქმედებით.**

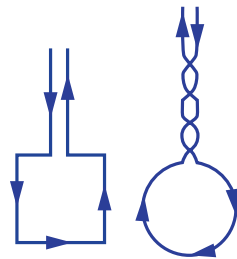
მაგნიტურ ველს აქვს გარკვეული თვისებები, რომლებიც შეიძლება ექსპერიმენტულად დადგინდეს.

როგორც მე-10 კლასის ფიზიკის კურსიდან გახსოვთ, ელექტრული ველის შესწავლისას მცირე სიდიდის ნერტილოვან მუხტს ვიყენებდით. დიდი სიდიდის მუხტი სხვა სხეულებზე მუხტების გადანაწილებას გამოიწვევდა, რაც შეცვლიდა არსებულ ელექტრულ ველს.

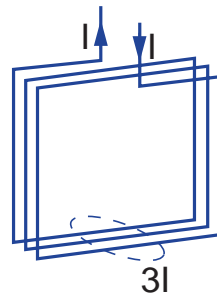
ტრულ ველს. ასევე მიზანშეწონილი არ იქნებოდა დიდი ზომის დამუხტული სხეულის აღებაც, რადგან ასეთ შემთხვევაში ვიპოვიდით იმ უბნის დაძაბულობის საშუალო მნიშვნელობას, რომელსაც ეს სხეული დაიკავებდა.

ვინაიდან მაგნიტური ველი ვლინდება დენზე მოქმედებით, ამიტომ მისი შესწავლისათვის უნდა ავიღოთ თხელი დენიანი გამტარის პატარა მონაკვეთი – დენის ელემენტი, მაგრამ მისი შექმნა შეუძლებელია, რადგან მუდმივი დენის არსებობისათვის საჭიროა წრედი შეკრული იყოს. დენის ელემენტის მაგივრად შეგვიძლია ავიღოთ მცირე ზომის დენიანი ჩაკეტილი კონტური და გავზომოთ მაგნიტური ველის ჯამური მოქმედება მთელ კონტურზე. თუ დიდი ზომის კონტურს ავიღებთ, მაშინ მაგნიტური ველი მის ცალკეულ ნაწილებზე განსხვავებულად იმოქმედებს და ჯამური მოქმედება მხოლოდ დიდ უბანზე ველის საშუალო მახასიათებელს მოგვცემს.

მაგნიტური ველის შესასწავლი კონტურის ზომები მცირე უნდა იყოს იმ მანძილებთან შედარებით, რომლებზეც მაგნიტური ველი საგრძნობლად იცვლება. ამ მიზნით შეგვიძლია გამოვიყენოთ მავთულის ნებისმიერი ფორმის პატარა ბრტყელი ჩარჩო, რომლის მიმყვანი სადენები ერთმანეთთან ახლოსაა ან გადაგრეხილია, რათა მათზე მაგნიტურმა ველმა არ იმოქმედოს და არც თავად მოახდინონ გავლენა სხვა დენიან გამტარებზე (სურ. 1.10). ჩარჩოზე მაგნიტური მოქმედების გასაძლიერებლად შესაძლებელია მისი ხვიათა რიცხვის გაზრდა (სურ. 1.11).



სურ. 1.10

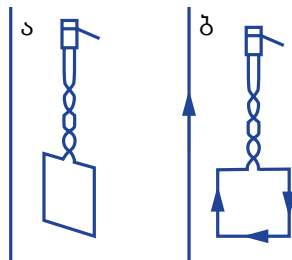


სურ. 1.11

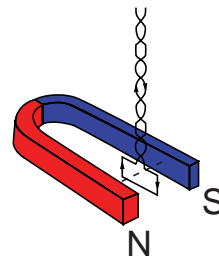


დენიან ჩარჩოზე მაგნიტური ველის მოქმედებას შეიძლება ცდით დავაკვირდეთ. მოქნილ გადაგრეხილ სადენებზე ჩამოკიდებული პატარა ჩარჩო მოვათავსოთ ვერტიკალური გამტარიდან ისეთ მანძილზე, რომელიც ჩარჩოს ზომებს აღემატება (სურ. 1.12 ა). გამტარსა და ჩარჩოში დენის გატარებისას ჩარჩო მოტრიალდება და ისე დადგება, რომ გამტარი ჩარჩოს სიბრტყეში მოექცევა (სურ. 1.12 ბ). გამტარში დენის მიმართულების შეცვლისას, ჩარჩო 180° -ით შემობრუნდება.

თუ იმავე დენიან ჩარჩოს ნალისებრი მაგნიტის პოლუსებს შორის ჩამოვკიდებთ, მასში დენის გატარებისას ჩარჩო შემოტრიალდება და მაგნიტის პოლუსების შემაერთებელი წრფის მართობულად დადგება (სურ. 1.13).



სურ.1.12

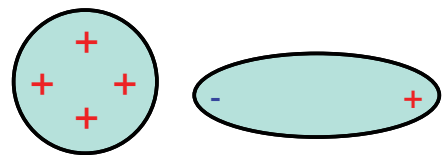


სურ. 1.13

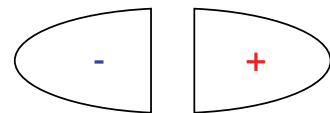
ეს ცდები გვიჩვენებს, რომ დენიანი ჩარჩო მაგნიტურ ველში ორიენტირდება. დენიან ჩარჩოზე მაორიენტირებლად დედამიწის მაგნიტური ველიც მოქმედებს. მართლაც, თუ ჩარჩოში დენს გავატარებთ, ის მობრუნდება და მისი სიბრტყე დასავლეთ-

აღმოსავლეთის მიმართულებით, ანუ მერიდიანის მართობულად განთავსდება. გავიხსენოთ, რომ დედამიწის მაგნიტურ ველში და დენიანი გამტარის მახლობლად ორიენტირდება მაგნიტური ისარიც. ბუნებრივად იზადება კითხვები: რატომ იქცევა ერთნაირად მაგნიტურ ველში დენიანი ჩარჩო და მაგნიტური ისარი? როგორ წარმოიქმნება ბუნებრივი და ხელოვნური მაგნიტების მაგნიტური ველი? რა ფიზიკური პროცესები მიმდინარეობს სხეულთა დამაგნიტებისას?

მივყვეთ ისტორიას და უფრო დეტალურად განვიხილოთ მეორე პარაგრაფში მოყვანილი კულონის მოსაზრებები მაგნიტების შესახებ. ცდების საფუძველზე კულონმა ჩამოაყალიბა მაგნიტური პოლუსების ურთიერთქმედების კანონი: ერთი მაგნიტური პოლუსი მეორე მაგნიტურ პოლუსს მიიზიდავს ან განიზიდავს ძალით, რომელიც პირდაპირპროპორციულია ამ პოლუსებში მოთავსებული „მაგნიტური მუხტების“ ნამრავლის და უკუპროპორციულია მათ შორის მანძილის კვადრატის. მიუხედავად იმისა, რომ ეს კანონი ძალიან ჰგავს წერტილოვანი მუხტების ურთიერთქმედების კანონს, კულონმა ხაზი გაუსვა ელექტრულ და მაგნიტურ მოვლენებს შორის არსებით განხვავებას. კერძოდ, ელექტროსტატიკური ინდუქციის შემდეგ დამუხტული სხეული შეგვიძლია გავყოთ და მივიღოთ დადებითად და უარყოფითად დამუხტული სხეულები, მაგრამ შეუძლებელია სხეულის გაყოფით მხოლოდ სამხრეთ ან ჩრდილოეთ პოლუსის მქონე სხეულები მივიღოთ, ანუ შეუძლებელია მივიღოთ სხეული ერთი მაგნიტური პოლუსით.



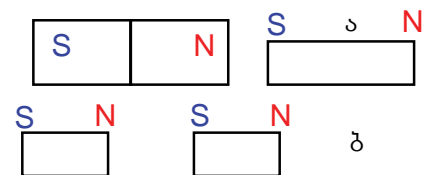
სურ. 1.14 ა



სურ. 1.14 ბ

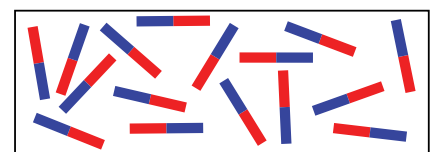
გავიხსენოთ ელექტროსტატიკური ინდუქციის ცდა: თუ დადებითად დამუხტულ სფეროს ლითონის სხეულს მივუახლოებთ, მუხტების გადანაწილების შედეგად, სფეროსთან ახლოს მყოფი სხეულის ნაწილი უარყოფითად დაიმუხტება, შორეული კი – დადებითად (სურ. 1.14 ა). ამ მდგომარეობაში სხეულის ორ ნაწილად გაყოფით დადებითად და უარყოფითად დამუხტულ ორ სხეულს მივიღებთ (სურ. 1.14 ბ).

თუ ანალოგიურ ცდას მაგნიტით ჩავატარებთ, პირველი ნაბიჯი წარმატებული იქნება – რკინის ან ფოლადის სხეულის მაგნიტთან მიტანით ის დამაგნიტდება. მაგნიტის ჩრდილოეთ პოლუსთან ახლოს მყოფი ნაწილი იქნება სამხრეთ პოლუსი, შორეული კი – ჩრდილოეთ პოლუსი (სურ. 1.15 ა). დამაგნიტებული რკინის ან ფოლადის სხეულის ორ ნაწილად გაყოფის შემდეგ ერთ-პოლუსიან მაგნიტებს კი არა, ისევ ორ ორპოლუსიან მაგნიტს მივიღებთ (სურ. 1.15 ბ).

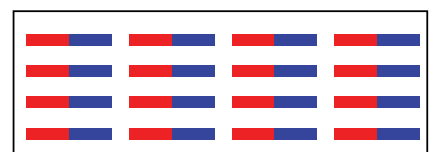


სურ. 1.15

პოლუსების განცალკევების შეუძლებლობიდან გამომდინარე, კულონმა დაასკვნა: დამაგნიტებული ნივთიერების ყოველ ნაწილაკში განუყოფლადაა დაკავშირებული „მაგნიტური მუხტის“ ორი სახე, ანუ ასეთი ნივთიერების ყოველი ატომი, მოლეკულა, ან მათი მცირე ჯგუფი პატარა ორპოლუსიან მაგნიტს წარმოადგენს. მას, ელემენტარული მაგნიტი ვუნოდოთ. თუ ამ მიდგომას ვალიარებთ, მაშინ უნდა მივიჩნიოთ, რომ ჩვეულებრივ მდგომარეობაში რკინასა ან ფოლადში უკვე არის ასეთი ელემენტარული მაგნიტები, მაგრამ ისინი ქაოტურადაა განლაგებული (სურ. 1.16 ა). ამის გამო ყველა მათგანის ქმედება ერთმანეთს ანონასწორებს და სხეული მთლიანობაში მაგნიტურ თვისებას არ ავლენს. როდესაც რკინის ან ფოლადის სხეულს მაგნიტურ ველში მოვათავსებთ, ველი აიძულებს ელემენტარულ მაგნიტებს შემობრუნდნენ და მონესრიგებულად გან-



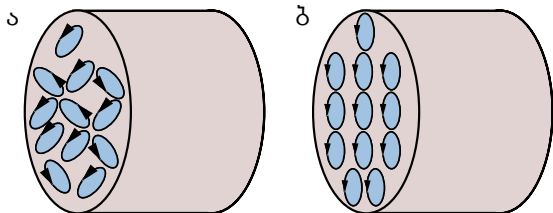
სურ. 1.16 ა



სურ. 1.16 ბ

ლაგდნენ (სურ. 1.16 ბ). მაგნიტის შიგნით მეზობლად მდებარე ელემენტარული მაგნიტების საპირისპირო პოლუსების მოქმედება ერთმანეთს აბათილებს, ამიტომ მაგნიტური პოლუსები მხოლოდ კიდეებში იქმნება.

მოგვიანებით, დენის მაგნიტურ მოქმედებაზე დაყრდნობით, ანდრე მარი ამპერმა მაგნიტური მუხტების არსებობა უარყო. მან ივარაუდა, რომ ნივთიერების შემადგენელი ნაწილაკების შიგნით არსებობს წრიული ელემენტარული დენები. როდესაც მათი ცირკულაციის (წრიული ბრუნვის) სიბრტყეები ერთმანეთის მიმართ ქაოსურადაა განლაგებული, დენების მაგნიტური მოქმედებები ერთმანეთს აკომპენსირებს და სხეული მაგნიტურ



სურ. 1.17

თვისებებს არ ავლენს (სურ. 1.17 ა). დამაგნიტებულ სხეულში კი ელემენტარული ელექტრული დენების ცირკულაციის სიბრტყეები გარკვეული წესით ისეა განლაგებული, რომ მათი მოქმედებები იკრიბება (სურ. 1.17 ბ). წრიული დენის ცირკულაციის სიბრტყის ერთი მხარე ჩრდილოეთ პოლუსს შეესაბამება, მეორე მხარე კი – სამხრეთ პოლუსს. სწორედ ამიტომ შეუძლებელია

მაგნიტის სამხრეთ და ჩრდილოეთ პოლუსების განცალკევება, ისევე როგორც სიბრტყის ერთი მხარისა მეორესაგან.

XX საუკუნეში შეიქმნა ატომის თეორია, რომლის მიხედვით ატომის ცენტრში დადებითად დამუხტული ბირთვია, მის გარშემო კი უარყოფითად დამუხტული ელექტრონები მოძრაობენ. სწორედ ელექტრონების მოძრაობა წარმოადგენს წრიულ დენს, რომელიც ცირკულირებს ატომში. სხეულის დამაგნიტებისას ამ წრიული დენების სიბრტყეები ისე განლაგდება, რომ მათ მიერ შექმნილი მაგნიტური ველები ერთმანეთს აძლიერებს. აღსანიშნავია, რომ ატომის მაგნიტურ ველს ქმნის ელექტრონების საკუთარი ღერძის გარშემო ბრუნვაც. ამ საკითხზე უფრო დანვრილებით პარ. 1.10-ში ვისაუბრებთ.


დასკვნები:

- ელექტრული დენი მის გარემომცველ სივრცეში ქმნის მაგნიტურ ველს;
- მაგნიტური ველი არის მატერიის განსაკუთრებული ფორმა, რომლის საშუალებითაც ურთიერთქმედებენ მოძრავი დამუხტული ნაწილაკები;
- მაგნიტური ველი იქმნება ელექტრული დენით (მოძრავი მუხტებით) და ვლინდება დენზე (მოძრავ მუხტებზე) მოქმედებით;
- დამაგნიტებულ სხეულში ელემენტარული ელექტრული დენების ცირკულაციის სიბრტყეები მოწესრიგებულადაა განლაგებული და მათი მაგნიტური მოქმედებები იკრიბება.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა შემთხვევაში მიიზიდება ორი პარალელური დენიანი გამტარი?
2. რატომ ვერ გამოვიყენებთ მაგნიტური ველის შესასწავლად დენის მცირე ელემენტს?
3. რატომ უნდა იყოს მცირე ზომის მაგნიტური ველის შესასწავლი ჩარჩოს ზომები?
4. წრფივ დენიან გამტარში დენის მიმართულების შეცვლა რატომ ინვესს დენიანი ჩარჩოს 180° -ით მობრუნებას (იხ. სურ. 1.12)?
5. რაში მდგომარეობს ამპერის ვარაუდი სხეულის მაგნიტური თვისების ბუნებაზე?
6. ატომის თეორიის თანახმად, რას წარმოადგენს ელემენტარული ელექტრული დენი?
7. დროთა განმავლობაში რატომ სუსტდება სხეულის ნარჩენი დამაგნიტება? (გაიხსენეთ სხეულის აგებულება, ატომებისა და მოლეკულების სითბური მოძრაობა).

§ 1.4 მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი

 გაიხსენეთ, რომ ელექტრულ ველს ახასიათებენ ვექტორული სიდიდით, რომელსაც ელექტრული ველის დაძაბულობა ეწოდება. ველის მოცემულ წერტილში ელექტრული ველის დაძაბულობა გვიჩვენებს ამ წერტილში მოთავსებულ ერთეულოვან დადებით მუხტზე მოქმედი ძალის მიმართულებასა და მოდულს.

ანალოგიურად შემოვიღოთ მაგნიტური ველის მახასიათებელი ფიზიკური სიდიდეც.

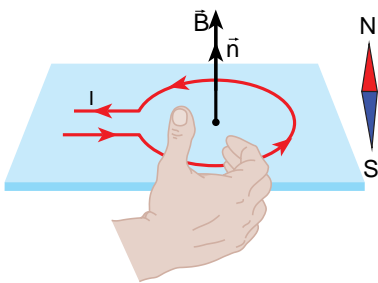
წინა პარაგრაფებიდან იცით, რომ მაგნიტურ ველში მაგნიტური ისარი და მოქნილ სადენებზე დაკიდებული მცირე ზომის დენიანი ჩარჩო ორიენტირდება – მათი მობრუნება გაგრძელდება მანამ, ვიდრე მკაცრად განსაზღვრულ მდგომარეობას არ დაიკავებს. ეს მოვლენა იმაზე მეტყველებს, რომ მაგნიტური ველის მახასიათებელ სიდიდეს მიმართულება უნდა ჰქონდეს, ანუ ვექტორული სიდიდე უნდა იყოს.

მაგნიტური ველის მახასიათებელ სიდიდეს მაგნიტური ინდუქციის ვექტორს უწოდებენ. ამ სიდიდეს \vec{B} -თი აღნიშნავენ.

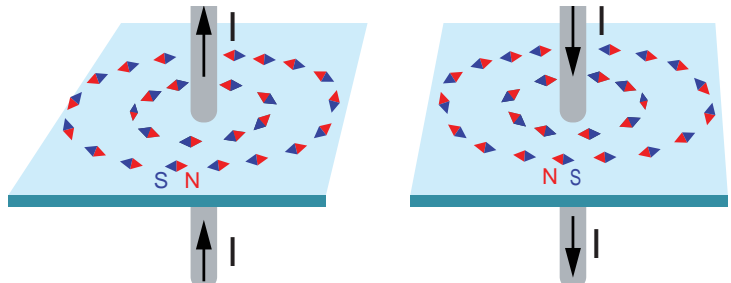
ცხადია, მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულებას ადგენენ მაგნიტურ ველში მოთავსებული მაგნიტური ისრის ან დენიანი ჩარჩოს ორიენტაციით.

მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულებად მიღებულია მაგნიტურ ველში მოთავსებული, თავისუფალი ბრუნვის შესაძლებლობის მქონე ველით ორიენტირებული მაგნიტური ისრის გასწვრივ მიმართულება S-დან N-სკენ. ეს მიმართულება ემთხვევა ორიენტირებული დენიანი ჩარჩოს სიბრტყისადმი გავლებული დადებითი ნორმალის (მართობის) მიმართულებას. დადებითი ნორმალის მიმართულებას ადგენენ მარჯვენა ხელის წესით: თუ მარჯვენა ხელის მოხრილი ოთხი თითი მიუთითებს ჩარჩოში დენის მიმართულებას, მაშინ 90° -ით გაშლილი ცერა თითი დადებითი ნორმალის მიმართულებას გვიჩვენებს (სურ. 1.18).

დენიანი ჩარჩოს ან მაგნიტური ისრის გამოყენებით შესაძლებელია მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულების დადგენა ველის ნებისმიერ წერტილში. მაგალიათ, სწორი დენიანი გამტარის მაგნიტური ველის ნებისმიერ წერტილში მაგნიტური ისარი დადგება იმ წრეწირის მხების გასწვრივ, რომლის სიბრტყე გამტარის მართობულია, ხოლო ცენტრი გამტარის ღერძზე მდებარეობს (სურ. 1.19).



სურ. 1.18



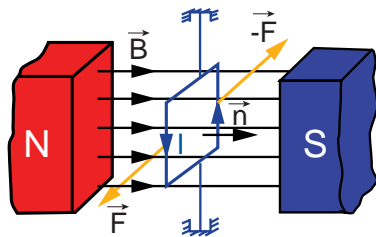
სურ. 1.19

მაგნიტური ველის მხრიდან დენიან ჩარჩოზე მაორიენტირებელი მოქმედება შეიძლება გამოყენებულ იქნას მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდულის დასადგენადაც.

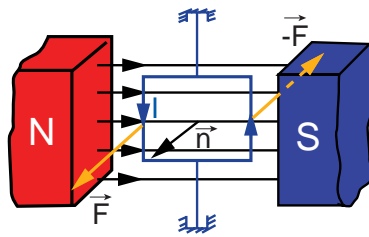
მცირე ზომის ერთი ხვისსაგან დამზადებული ჩარჩო მაგნიტურ პოლუსებს შორის, შუაში, ან ვერტიკალური დენიანი გამტარიდან მოშორებით მოვათავსოთ. ამ შემთხვევაში შეიძლება მივიჩნიოთ, რომ ჩარჩოთი შემოსაზღვრული ზედაპირის ფარგლებში მაგნიტური ველი საგრძნობლად არ იცვლება.

დენიან ჩარჩოზე მაგნიტური ველის მხრიდან მოქმედებს მაბრუნებელი ძალთა მომენტი, რომელიც დამოკიდებულია მაგნიტურ ველზე, ჩარჩოს ზომებსა და ფორმაზე, მაგნიტურ ველში მის განლაგებასა და მასში გამავალ დენის ძალაზე. მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის მოდულის დასადგენად კი აუცილებელია გავარკვიოთ, როგორ არის დამოკიდებული ეს მომენტი თვით ჩარჩოსა და მასში გამავალ დენის ძალაზე.

ცდებით დადგენილია, როდესაც ჩარჩოში დენის ძალა უცვლელია, მაგნიტური ველის მხრიდან ჩარჩოზე მოქმედი მაბრუნებელი მომენტი ინდუქციის ვექტორის მიმართ მის ორიენტაციაზეა დამოკიდებული. კერძოდ, როდესაც ჩარჩოს სიბრტყე მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მართობულია, მასზე მოქმედი ძალთა მომენტი ნულის ტოლია და ეს ძალები მხოლოდ ჭიმავს ჩარჩოს (სურ. 1.20). დენიან ჩარჩოზე მოქმედი ძალთა მომემტი მაქსიმალურია მაშინ, როდესაც მისი ნორმალური მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მართობულია (სურ. 1.21)



სურ. 1.20



სურ. 1.21

ცდებით ასევე დადგენილ იქნა, რომ **დენიან ჩარჩოზე მაგნიტური ველის მხრიდან მოქმედი ძალების მაქსიმალური მომენტი ჩარჩოს ფართობისა და მასში გამავალი დენის ძალის პროპორციულია:**

$$M_{\max} \sim IS.$$

ეს შედეგი შეიძლება გამოვიყენოთ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდულის განსაზღვრისათვის ველის იმ წერტილში, სადაც ჩარჩოა მოთავსებული. მართლაც, შეფარდება $M_{\max}/(IS)$ არ არის დამოკიდებული ჩარჩოს თვისებებზე და ამიტომ სივრცის მოცემულ წერტილში ველის მახასიათებელი სიდიდეა:

$$B = k \frac{M_{\max}}{IS},$$

რომელშიც k პროპორციულობის კოეფიციენტია.

მაგნიტური ინდუქციის ერთეული შეიძლება ისე შეირჩეს, რომ k ერთის ტოლი იყოს. SI-ში მაგნიტური ინდუქციის ერთეულად მიღებულია **1 ტესლა (1 ტლ)**, ცნობილი სერბი ფიზიკოსის ნიკოლა ტესლას პატივსაცემად. **1 ტესლა იმ მაგნიტური ველის ინდუქციაა, რომელშიც მოთავსებულ 1 მ² ფართობის მქონე ჩარჩოზე, მასში 1 ა დენის გავლისას, მაგნიტური ველის მხრიდან მოქმედებს 1 ნმ მაქსიმალური ძალთა მომენტი.**

ამ შემთხვევაში შეიძლება დავწეროთ:

$$B = \frac{M_{\max}}{IS},$$

$$\text{საიდანაც, } 1 \text{ ტლ} = 1 \frac{\text{ნ} \cdot \text{მ}}{\text{ა} \cdot \text{მ}^2} = 1 \frac{\text{ნ}}{\text{ა} \cdot \text{მ}}.$$

თუ სივრცის მოცემულ წერტილში მაგნიტურ ველს ქმნის რამდენიმე დენი (მაგნიტი), ამ წერტილში მათ მიერ შექმნილი ველების მაგნიტური ინდუქციები გეომეტრიულად იკრიბება, ანუ ელექტრული ველის მსგავსად, მაგნიტური ველისთვისაც მართებულია სუპერპოზიციის პრინციპი:

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



ნიკოლა ტესლა
(1856-1943)

დასკვნები:

- მაგნიტური ველის მახასიათებელ ფიზიკურ სიდიდეს მაგნიტური ინდუქციის ვექტორს უწოდებენ და \vec{B} -თი აღნიშნავენ;
- მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულებად მიღებულია მაგნიტურ ველში მოთავსებული თავისუფლად მბრუნავი ორიენტირებული მაგნიტური ისრის მიმართულება \vec{N} ჩრდილოეთ პოლუსისაკენ, ან ორიენტირებული დენიანი ჩარჩოს სიბრტყისადმი გავლებული დადებითი ნორმალის მიმართულება;
- მაგნიტური ინდუქციის მოდული მოცემულ წერტილში ტოლია ამ წერტილში მოთავსებულ დენიან ჩარჩოზე მაგნიტური ველის მხრიდან მოქმედი მაქსიმალური ძალთა მომენტის შეფარდებისა ჩარჩოს ფართობისა და მასში გამავალი დენის ძალის ნამრავლთან: $B = \frac{M_{\max}}{IS}$;
- 1 ტესლა იმ მაგნიტური ველის ინდუქციაა, რომელშიც მოთავსებულ 1 მ^2 ფართობის მქონე ჩარჩოზე, მასში 1 ა დენის გავლისას, მაგნიტური ველის მხრიდან მოქმედებს $1 \text{ ნ} \cdot \text{მ}$ მაქსიმალური ძალთა მომენტი.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა მოვლენიდან ჩანს, რომ მაგნიტური ინდუქცია ვექტორული სიდიდე უნდა იყოს?
2. რისი პროპორციულია დენიან ჩარჩოზე მაგნიტური ველის მხრიდან მოქმედი მაქსიმალური ძალთა მომენტი?
3. რატომ გამოდგება $\frac{M_{\max}}{IS}$ შეფარდება მაგნიტური ველის მახასიათებელ სიდიდედ?
4. რაში მდგომარეობს მაგნიტური ველების სუპერპოზიციის პრინციპი?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოთავსებულ მართკუთხედის ფორმის გამტარ ჩარჩოში დენის ძალა 5 ა -ია, მასზე მოქმედი მაქსიმალური მამბრუნებელი მომენტი კი – $0,06 \text{ ნ} \cdot \text{მ}$. იპოვეთ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდული, თუ ჩარჩოს სიგრძე 16 სმ -ია, სიგანე კი – 5 სმ .

ამოხსნა: პირველ რიგში დენიანი ჩარჩოს S ფართობი ვიპოვოთ. რადგან მართკუთხედის ფართობი მეზობელი გვერდების ნამრავლის ტოლია, გვექნება: $S=15\text{ სმ} \cdot 6\text{ სმ} = 80\text{ სმ}^2 = 8 \cdot 10^{-3}\text{ მ}^2$. მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდულის განმსაზღვრელი ფორ-

მულის თანახმად, $B = \frac{M_{\max}}{IS} = \frac{0,06\text{ ნ}\cdot\text{მ}}{5\text{ ა}\cdot 8 \cdot 10^{-3}\text{ მ}^2} = 1,5\text{ ტლ}$.


პასუხი: ერთგვაროვანი მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის მოდული 1,5 ტესლას ტოლია.



ამოხსენით ამოცანები:

1. შესაძლებელია თუ არა მუდმივი მაგნიტის განმაგნიტება?
2. გარეგნულად ერთნაირი რკინის ორი ლეროდან ერთი დამაგნიტებულია, მეორე – არა. როგორ გავარკვიოთ, რომელია დამაგნიტებული ისე, რომ სხვა საგნები არ გამოვიყენოთ?
3. შესაძლებელია თუ არა ერთპოლუსიანი მაგნიტის მიღება? პასუხი დაასაბუთეთ.
4. მაგნიტურ ისართან რკინის სხეულის მიახლოების შემდეგ ისარმა მდებარეობა შეიცვალა. მართებულია თუ არა მტკიცება, რომ ეს სხეული დამაგნიტებულია?
5. მგრძნობიარე კომპასის გამოყენებით როგორ დავადგინოთ გამტარში დენის არსებობა?
6. მიზანშეწონილია თუ არა, რომ კომპასის კორპუსი რკინისაგან დამზადდეს? პასუხი დაასაბუთეთ.
7. როგორ გამოითვლება მაგნიტური ველის მხრიდან ჩარჩოზე მოქმედი ძალების მაქსიმალური მახრუნებელი მომენტი? დაწერეთ შესაბამისი ფორმულა და დაახასიათეთ მასში შემავალი სიდიდეები.
8. 0,02 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოათავსეს $S=15\text{ სმ}^2$ ფართობის მქონე მავთულის ჩარჩო. რა მაქსიმალური მახრუნებელი მომენტი იმოქმედებს ჩარჩოზე მაგნიტური ველის მხრიდან, თუ მასში 2 ა დენს გავატარებთ?
9. 0,25 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოათავსეს მართკუთხედის ფორმის მავთულის ჩარჩო, რომლის გვერდების ზომებია 5 სმ და 8 სმ. იპოვეთ ჩარჩოში გამავალი დენის ძალა, თუ მაგნიტური ველის მხრიდან მასზე მოქმედი ძალების მაქსიმალური მომენტი 0,01 ნ·მ-ია.
10. 1 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოათავსებულია მართკუთხა ჩარჩო, რომელიც 300 ხვიისაგან შედგება. იპოვეთ ჩარჩოს ფართობი, თუ მასში 1 ა დენის გავლისას მაგნიტური ველის მხრიდან მოქმედი ძალების მაქსიმალური მომენტი 0,26 ნ·მ-ია.

§ 1.5 მაგნიტური ინდუქციის წირები

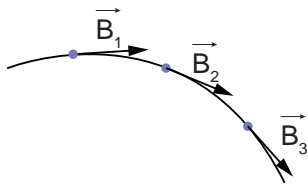
 ელექტრული ველის სივრცეში განაწილების თვალსაჩინოდ წარმოსადგენად შემოვიღეთ ელექტრული ველის დაძაბულობის წირები (ძალწირები) – წარმოსახვითი წირები, რომელთა ნებისმიერ წერტილში ელექტრული ველის დაძაბულობის ვექტორი ამ წერტილში გავლებული მხების გასწვრივაა მიმართული. ამასთან, დაძაბულობის წირები გამოდიან დადებითი მუხტიდან.

ანალოგიურად, მაგნიტური ველის სივრცეში განაწილების თვალსაჩინოდ წარმოსადგენად მაგნიტური ინდუქციის წირებს აგებენ.

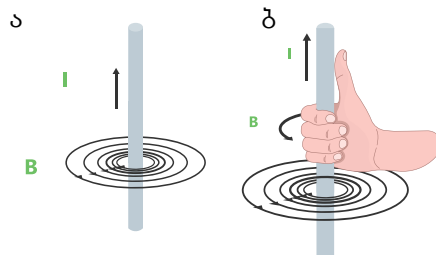
მაგნიტური ინდუქციის წირები წარმოსახვითი წირებია, რომელთა ნებისმიერ წერტილში მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორი ამ წერტილში გავლებული მხების გასწვრივაა მიმართული (სურ. 1.23).

ჯერ ავაგოთ წრფივი დენიანი გამტარის მაგნიტური ინდუქციის წირები. წინა პარაგრაფში დენიანი ჩარჩოსა და მაგნიტური ისრების გამოყენებით ჩატარებული ცდებიდან გამომდინარეობს, რომ დენიანი გამტარების მაგნიტური ინდუქციის წირები გამტარის მართობულ სიბრტყეში მდებარე კონცენტრული წრეწირებია, რომელთა ცენტრები გამტარზე მდებარეობს (სურ. 1.24 ა). ელექტრული დაძაბულობის წირების მსგავსად, **მაგნიტური ინდუქციის წირებს ისე ავლებენ, რომ მათი სიხშირე მოცემულ ადგილზე \vec{B} ვექტორის მოდულს ახასიათებს.** სურ. 1.24 ა-ზე კონცენტრული წრეწირების სიხშირე მატულობს ცენტრთან. ეს ნიშნავს, რომ მაგნიტური ინდუქციის მოდული გამტართან მეტია, ვიდრე მისგან მოშორებით.

მაგნიტური ინდუქციის წირების მიმართულების დადგენა შესაძლებელია მარჯვენა ხელის წესით: **თუ მარჯვენა ხელის 90° -ით გაშლილი ცერა თითი წრფივ გამტარში დენის მიმართულებას მიუთითებს, მაშინ მოხრილი ოთხი თითი გამტარის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველის წირების მიმართულებას გვიჩვენებს (სურ. 1.24 ბ).**



სურ. 1.23

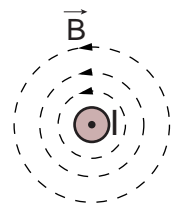


სურ. 1.24

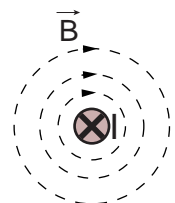
ხშირად ნახაზზე წრფივი გამტარის კვეთას გამოსახვენ. სურ. 1.25 ა-სა და 1.25 ბ-ზე ნაჩვენებია წრფივი დენიანი გამტარი მაგნიტური ინდუქციის წირებით. პირველ სურათზე დენი მიმართულია ნახაზის სიბრტყიდან ჩვენკენ, მეორე სურათზე კი – ჩვენგან ნახაზის სიბრტყისკენ.

ცდებით დადგენილია, რომ დენიანი კოჭა (სოლენოიდი) წარმოქმნის მაგნიტურ ველს, რომლის ინდუქციის წირების სურათი, გამოსახულია სურ. 1.26 ა-ზე. დენიანი კოჭა ქმნის ისეთივე მაგნიტურ ველს, როგორსაც ზოლოვანი მაგნიტი. სურათზე მოცემულ შემთხვევაში სოლენოიდის დენის წყაროს უარყოფით პოლუსთან შეერთებული ბოლო იქნება ჩრდილოეთ პოლუსი, ხოლო დადებითთან შეერთებული – სამხრეთ პოლუსი.

ძალწირების მიმართულება აქაც მარჯვენა ხელის წესით დგინდება: **თუ მარჯვენა ხელის მოხრილი ოთხი თითი კოჭაში დენის მიმართულებას მიუთითებს, მაშინ 90° -ით გაშლილი ცერა თითი კოჭაში მაგნიტური ველის წირების მიმართულებას გვიჩვენებს (სურ. 1.26 ბ).**



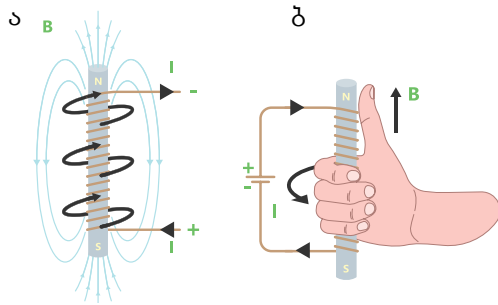
სურ. 1.25 ა



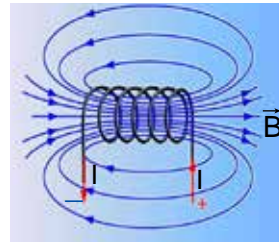
სურ. 1.25 ბ

როდესაც სოლენოიდის სიგრძე გაცილებით დიდია მის დიამეტრზე, მაშინ სოლენოიდის შიგნით ინდუქციის წირები ერთმანეთის პარალელური და თანაბრი სიხშირისაა, ე.ი. ყველა წერტილში მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი ერთნაირია. ასეთ ველს **ერთგვაროვანი მაგნიტური ველი** ეწოდება (სურ. 1.27, სოლენოიდი ნაჩვენებია კვეთაში).

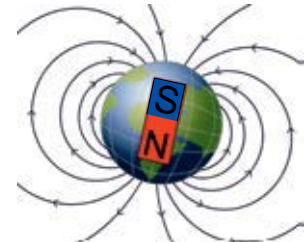
სურ. 1.28-ზე ნაჩვენებია დედამიწის მაგნიტური ველის წირები, რომლებიც სოლენოიდის წირების ანალოგიურია.



სურ. 1.26



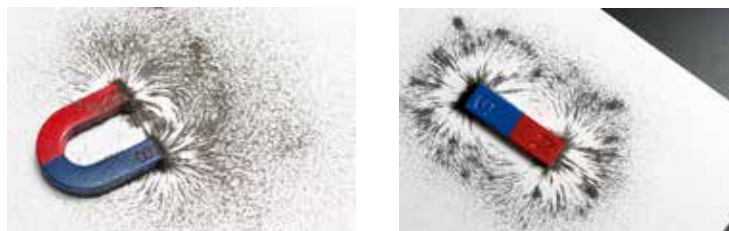
სურ. 1.27



სურ. 1.28

დედამიწის მაგნიტური ჩრდილოეთ პოლუსი გეოგრაფიულ სამხრეთ პოლუსთან ახლოს მდებარეობს, მაგნიტური სამხრეთ პოლუსი კი – გეოგრაფიულ ჩრდილოეთ პოლუსთან. ამ უზარმაზარი მაგნიტის ღერძი მის ბრუნვის ღერძთან $11,5^\circ$ -იან კუთხეს ადგენს. პერიოდულად მაგნიტური პოლუსების პოლარობა იცვლება. უკანასკნელად ასეთ ცვლილებას დაახლოებით 780 000 წლის წინ ჰქონდა ადგილი.

მაგნიტური წირების სურათი შეიძლება ხილული გავხადოთ, თუ გამოვიყენებთ რკინის ნაქლიბს*. მაგნიტურ ველში მოთავსებული ნაქლიბის თითოეული ნაწილაკი დამაგნიტდება და ისე იქცევა, როგორც პატარა მაგნიტური ისარი. შედეგად, ნაქლიბი მაგნიტური წირების გასწვრივ განლაგდება. სურ. 1.29-ზე ნაქლიბის გამოყენებით ხილული წირების მიღების რამდენიმე შემთხვევა გამოსახული.



სურ. 1.29

მაგნიტური ინდუქციის წირების მნიშვნელოვანი თვისება ისაა, რომ მათ არ აქვს არც დასაწყისი, არც ბოლო. ისინი ყოველთვის შეკრული წირებია, განსხვავებით ელექტროსტატიკური ველის წირებისაგან, რომლებიც იწყება დადებით მუხტსა და მთავრდება უარყოფითზე.

ველს, რომლის ძალწირები შეკრულია, **გრიგალურ ველს** უწოდებენ. **მაგნიტური ველი გრიგალურია**. მომავალში სხვა გრიგალურ ველსაც გაეცნობით.

მაგნიტური ინდუქციის წირების შეკრულობა მაგნიტური ველის ფუნდამენტური თვისებაა.

* რკინის ნაქლიბის გამოყენებისას უსაფრთხოების მიზნით აუცილებლად გაიკეთეთ ნიღაბი.

დავალება: მოიძიეთ ინფორმაცია დედამიწის მაგნიტური ველის შესახებ.
 რა ქმნის დედამიწის მაგნიტურ ველს?
 რისგან იცავს დედამიწას მისი მაგნიტური ველი?
 რას წარმოადგენს მაგნიტური ქარიშხლები?
 როგორ ეხმატება დედამიწის მაგნიტური ველი ფრინველებსა და ცხოველებს ორიენტირებაში?

დასკვნები:

- მაგნიტური ინდუქციის წირები წარმოსახვითი წირებია, რომელთა ნებისმიერ წერტილში მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორი ამ წერტილში გავლებული მხების გასწვრივაა მიმართული;
- მაგნიტური ინდუქციის წირებს ისე ავლებენ, რომ მათი სიხშირე მოცემულ ადგილზე \vec{B} ვექტორის მოდულს ახასიათებს – იქ, სადაც \vec{B} ვექტორის მოდული მეტია, ძალწირების სიხშირეც უფრო დიდია;
- თუ მარჯვენა ხელის 90° -ით გაშლილი ცერა თითი წრფივ გამტარში დენის მიმართულებას მიუთითებს, მაშინ მოხრილი ოთხი თითი გამტარის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველის წირების მიმართულებას გვიჩვენებს;
- თუ მარჯვენა ხელის მოხრილი ოთხი თითი კოჭაში დენის მიმართულებას მიუთითებს, მაშინ 90° -ით გაშლილი ცერა თითი კოჭაში მაგნიტური ველის წირების მიმართულებას გვიჩვენებს;
- მაგნიტური ველი გრიგალურია.

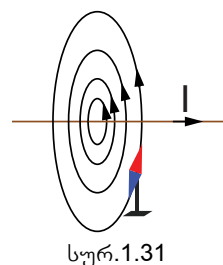
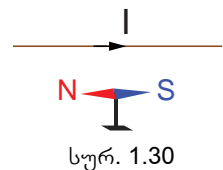
საკონტროლო კითხვები:

1. რას წარმოადგენს წრფივი დენიანი გამტარის მაგნიტური ინდუქციის წირები?
2. რა შემთხვევაში იქნება დენიანი სოლენოიდის შიგნით მაგნიტური ველი ერთგვაროვანი?
3. ემთხვევა თუ არა დასახელებით, დედამიწის გეოგრაფიული და მაგნიტური პოლუსები ერთმანეთს?
4. რისი შედეგია, რომ მაგნიტური ველის ძალწირები შეკრულია?

ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

განსაზღვრეთ, როგორ ორიენტირდება დენიანი გამტარის მახლობლად მოთავსებული მაგნიტური ისარი (სურ. 1.30).

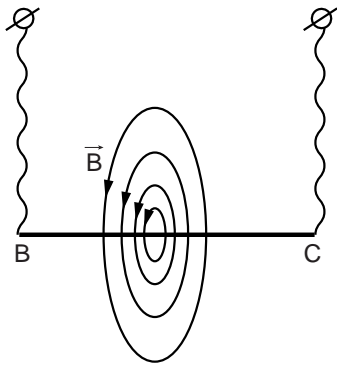
ამოხსნა: ჯერ დენიანი გამტარის გარშემო შექმნილი წრიული ინდუქციის წირების მიმართულება დავადგინოთ: გამტარი მარჯვენა ხელის ოთხ მოხრილ თითს შორის ისე მოვაქციოთ, რომ გაშლილი ცერა თითი დენის მიმართულებას ემთხვეოდეს. ამ შემთხვევაში ოთხი მოხრილი თითი მაგნიტური ინდუქციის წირების მიმართულებას გვიჩვენებს. მაგნიტური ისარი ისე უნდა ორიენტირდეს, რომ ის მაგნიტური ინდუქციის წირების მხების გასწვრივ დადგეს და მის ღერძზე, სამხრეთიდან ჩრდილოეთისაკენ გავლებული მიმართულება წირების მიმართულებას დაემთხვეს. ამის გამო, მაგნიტური ისარი ორიენტირდება ისე, როგორც სურ. 1.31-ზეა გამოსახული.



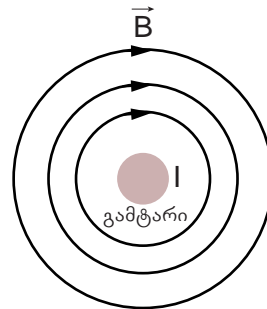


ამოსხენით ამოცანები:

- როგორ ველს ეწოდება გრიგალური?
- როგორ მაგნიტურ ველს ეწოდება ერთგვაროვანი?
- მაგნიტური ინდუქციის წირებით როგორ დავადგინოთ, სად უფრო ძლიერია მაგნიტური ველი და სად შედარებით სუსტი?
- რაში მდგომარეობს მაგნიტური ველების სუპერპოზიციის პრინციპი?
- სურ. 1.32-ის მიხედვით დაადგინეთ დენის მიმართულება BC გამტარში.
- განსაზღვრეთ დენის მიმართულება სურ. 1.33-ზე გამოსახულ გამტარში.

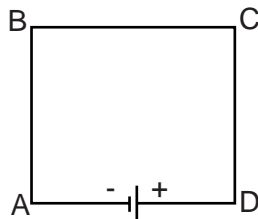


სურ. 1.32

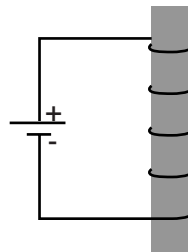


სურ. 1.33

- გამოსახეთ დენიანი გამტარის AB, BC და CD უბნების მიერ შექმნილი მაგნიტური ინდუქციის წირები სურ. 1.34-ის მიხედვით.
- სურ. 1.35-ზე დენიან კოჭაში რკინის ღეროა მოთავსებული. დაადგინეთ ღეროს მაგნიტური პოლუსები.



სურ. 1.34

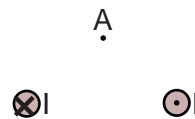


სურ. 1.35

- განსაზღვრეთ სურ. 1.36-ზე გამოსახული ნრფივი დენიანი გამტარის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის მიმართულება A წერტილში.



სურ. 1.36




სურ. 1.37

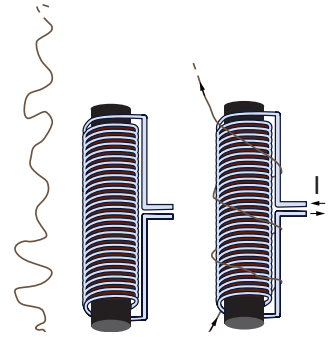
- სურ. 1.37-ზე გამოსახულია ორი ნრფივი, პარალელური დენიანი გამტარი, რომლებშიც გამავალი დენის ძალა ერთნაირია. განსაზღვრეთ მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის მიმართულება თითოეული გამტარიდან ტოლი მანძილით დაშორებულ A წერტილში.

§ 1.6 მაგნიტური ველის მოქმედება დენიან გამტარზე. ამპერის ძალა

რა ძალა აიძულებს ელექტროძრავის ღერძს, რომ იბრუნოს? რატომ გადაიხრება ელექტროგამზომი ხელსაწყო ისარი მასში დენის გავლისას? როგორ რეკავს ელექტროზარი? შევისწავლოთ ძალა, რომელიც ამ და სხვა მოვლენების მიზეზია.

როგორც წინა პარაგრაფებიდან იცით, ერთგვაროვანი მაგნიტური ველი დენიან ჩარჩოზე მხოლოდ მაორიენტირებლად მოქმედებს. ეს ნიშნავს, რომ ჩარჩოს სხვადასხვა ნაწილზე მოდებული ძალების ჯამი ნულის ტოლია, მაგრამ ნულისგან განსხვავებულია ამ ძალთა ჯამური მომენტი. როგორ გამოვთვალოთ მაგნიტური ველის მხრიდან დენიან გამტარზე მოქმედი ძალა და რა თვისებები აქვს მას?

 ჩავატაროთ ცდა. ვერტიკალურად განთავსებული სოლენოიდის მახლობლად დავიკიდოთ მოქნილი გამტარი (სურ. 1.38). თუ ორივე მათგანში დენს გავატარებთ, გამტარი სოლენოიდს დაეხვევა (სურ. 1.39). ამის მიზეზი, სოლენოიდში დენის გატარებისას მაგნიტური ველის აღძვრაა. სოლენოიდის ერთი ბოლო ჩრდილოეთ პოლუსად გადაიქცევა და მასთან მყოფი გამტარი ერთი მიმართულებით ამოძრავდება, მეორე ბოლო კი – სამხრეთ პოლუსად და მასთან მყოფი გამტარი საპირისპირო მიმართულებით ამოძრავდება. თუ გამტარში ან სოლენოიდში დენის მიმართულებას შევცვლით, გამტარი სოლენოიდს შემოეხსნება და საპირისპირო მიმართულებით დაეხვევა.



სურ. 1.38

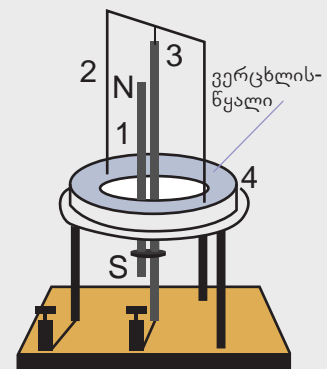
სურ. 1.39

ცდა გვიჩვენებს, მაგნიტური ველის მხრიდან დენიან გამტარზე მოქმედი ძალა არ არის კონსერვატიული, ანუ ჩაკეტილ ტრაექტორიაზე მის მიერ შესრულებული მუშაობა ნულისგან განსხვავებულია.

ამის დამადასტურებელი ცდა პირველად მაიკლ ფარადეიმ ჩაატარა. ფარადეის ერთ-ერთი დანადგარი სურ. 1.40-ზე არის გამოსახული. მუდმივი მაგნიტის (1) გარშემო ბრუნავს Π -ს ფორმის მავთულის ჩარჩო (2). ჩარჩოს შუა ნაწილი დაკავშირებულია წვეტთან, რომელიც ჩაშვებულია ვერცხლისწყლით სავსე ლითონის პატარა ჭურჭელში (3). ჩარჩოს ბოლოები ჩაშვებულია ვერცხლისწყლით სავსე ლითონის რგოლოვან ჭურჭელში (4). თუ ჭურჭელ (3)-ს და ჭურჭელ (4)-ს დენის წყაროს პოლუსებს მივუერთებთ, ჩარჩოში დენი გაივლის და ის დაიწყებს ბრუნვას მაგნიტურ ველში. ე.ი. ჩაკეტილ წრიულ გზაზე შესრულდება მუშაობა.

ახლა განვსაზღვროთ ძალა, რომლითაც მაგნიტური ველი დენიან გამტარზე მოქმედებს. ამისათვის კი საჭიროა დავადგინოთ კანონი დენის ცალკეულ ელემენტზე მოქმედი ძალისათვის. მხოლოდ ასეთ კანონს შეიძლება ჰქონდეს ზოგადი მნიშვნელობა, რადგან შეკრულ კონტურზე მოქმედი ძალა კონტურის ფორმაზეა დამოკიდებული, ასეთი ფორმების რაოდენობა კი ძალიან ბევრია.

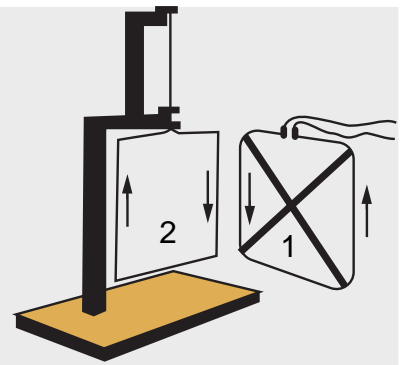
კანონი შეიძლება დადგინდეს მხოლოდ ცდით, მაგრამ როგორც ადრე აღვნიშნეთ, მუდმივი დენი ყოველთვის ჩაკეტილია, ამიტომ დენის ელემენტის შექმნა და, შესაბამისად, მასზე ცდის ჩატარება შეუძლებელია. ასეთ შემთხვევაში რჩება ერთი გზა – დენის ელემენტზე მოქმედი ძალისათვის შევარჩიოთ კანონი, რომელიც ნებისმიერი ჩაკეტილი წრედისათვის მოგვცემს ცდასთან შეთანხმებულ შედეგს.



სურ. 1.40

ეს ამოცანა გადაჭრა ამპერმა. მან დაადგინა დენების ურთიერთქმედების კანონი, რითაც გადაწყვიტა მაგნიტური ურთიერთქმედების ახსნის პრობლემა.

ამპერის ერთ-ერთი ცდისათვის შექმნილი ხელსაწყო სურ. 1.41-ზეა გამოსახული. ჩარჩო (1) დამაგრებულია უძრავად, ჩარჩო (2)-ზე კი გამოყენებულია გრეხილი სასწორის პრინციპი. დენიან გამტარებს შორის ურთიერთქმედების ძალის გასაზომად ასეთი ხელსაწყოებით ამპერმა დაადგინა, რომ ერთი მიმართულების პარალელური დენები ერთმანეთს მიიზიდავს, საპირისპირო მიმართულებისა კი – განიზიდავს.



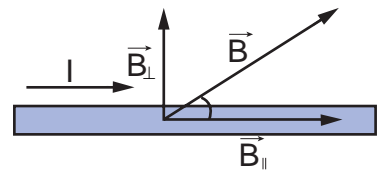
სურ. 1.41

ურთიერთმართობული მიმართულების დენები ერთმანეთზე არ მოქმედებს. ამასთან, დენიან გამტარზე მოქმედი ძალა პირდაპირპროპორციულია მასში გამავალი დენის ძალისა ($F \sim I$) და გამტარის სიგრძის ($F \sim l$).

ამპერმა დაადგინა დენიანი გამტარების ორ ელემენტს შორის ურთიერთქმედების კანონი. აღსანიშნავია, რომ ამპერი მანძილზე ქმედების თეორიას მომხრე იყო და არ იყენებდა ველის ცნებას. მის მიერ დადგენილი კანონი საკმაოდ რთულია, მაგრამ შეიძლება გამოვყოთ ორი შედარებით მარტივი კანონი: დენის ელემენტით შექმნილი მაგნიტური ინდუქციისა და მაგნიტური ველის მხრიდან სხვა დენის ელემენტზე მოქმედი ძალისა. ამპერის ღვანლის აღსანიშნავად, კანონს, რომელიც მაგნიტური ველის მხრიდან დენიან გამტარზე მოქმედ ძალას აღწერს, **ამპერის კანონს** უწოდებენ.

ცდებით დადგინდა, რომ ეს ძალა ასევე პირდაპირპროპორციულია მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდულის და დამოკიდებულია ინდუქციის ვექტორსა და გამტარში დენის მიმართულებას შორის კუთხეზე.

ვთქვათ, მაგნიტური ინდუქციის \vec{B} ვექტორი დენის მიმართულებასთან რაიმე α კუთხეს ქმნის. დავშალოთ \vec{B} ვექტორი ორ ისეთ მდგენელად, რომელთაგან ერთი გამტარის გასწვრივ იქნება მიმართული (\vec{B}_{\parallel}), მეორე კი – მის მართობულად (\vec{B}_{\perp}) (სურ. 1.42). დენის გასწვრივ მიმართული მდგენელი გამტარზე არ მოქმედებს, ამიტომ მოქმედებს მხოლოდ მისი მართობული მდგენელი, რომლის მოდული ტოლია:



სურ. 1.42

$$B_{\perp} = B \sin \alpha.$$

თუ წინა შედეგებსაც გავითვალისწინებთ, მივიღებთ:

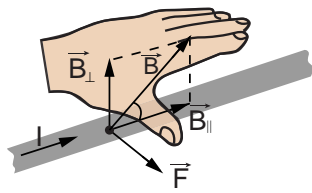
$$F \sim B I l \sin \alpha.$$

მაგნიტური ინდუქციის განზომილება ისეა შერჩეული, რომ პროპორციულობის კოეფიციენტი ერთის ტოლია, ამიტომ ამპერის ძალის მოდული ასეთი სახით ჩაიწერება:

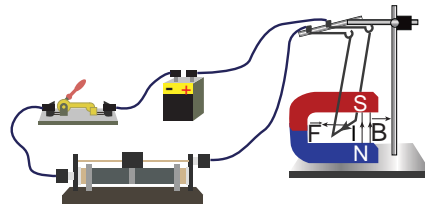
$$F_s = B I l \sin \alpha$$

ამპერის ძალის მიმართულების დასადგენად გამოიყენება მარცხენა ხელის წესი:

თუ მარცხენა ხელს ისე დავიჭერთ, რომ მაგნიტური ინდუქციის \vec{B} ვექტორის გამტარისადმი მართობული მდგენელი ხელის გულში შედიოდეს, ოთხი გაშლილი თითი კი დენის მიმართულებას გვიჩვენებდეს, მაშინ 90° -ით გაშლილი ცერა თითი ამპერის ძალის მიმართულებას გვიჩვენებს (სურ. 1.43).



სურ. 1.43



სურ. 1.44

ამპერის კანონი შეიძლება თვისობრივად შემოწმდეს სურ. 1.44-ზე გამოსახული და-
ნადგარით. ამ დანადგარით შეგვიძლია ვცვალოთ დენის ძალა გამტარში, კიდევ ერთი
მაგნიტის დამატებით, გავზარდოთ გამტარის იმ ნაწილის სიგრძე, რომელიც მაგნი-
ტურ ველშია მოთავსებული, გამტარის დახრის კუთხე, სხვადასხვა მაგნიტის გამო-
ყენებით ვცვალოთ მაგნიტური ველის ინდუქცია. თითოეულ შემთხვევაში შეიძლება
ძალის გამოთვლა და შემდეგ გაზომილთან შედარება.

დასკვნები:

- მაგნიტური ველის მხრიდან დენიან გამტარზე მოქმედ ძალას, ამპერის ძალას უწოდებენ;
- ამპერის ძალის მოდული გამოითვლება ფორმულით: $F_s = BIl \sin \alpha$;
- თუ მარცხენა ხელს ისე დავიჭერთ, რომ მაგნიტური ინდუქციის \vec{B} ვექტორის გამტარისადმი მართობული მდგენელი ხელის გულში შედიოდეს, ოთხი გაშლილი თითი კი დენის მიმართულებას გვიჩვენებდეს, მაშინ 90° -ით გაშლილი ცერა თითი ამპერის ძალის მიმართულებას გვიჩვენებს.

საკონტროლო კითხვები:

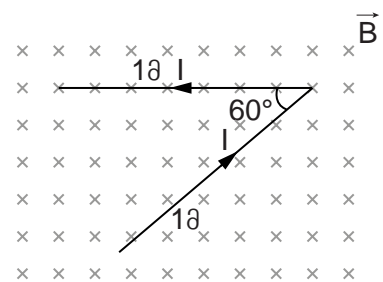
1. რა განსხვავებაა მაგნიტური ველის მხრიდან დენიან გამტარზე მოქმედ ძალასა და კულონურ ძალას შორის?
2. როგორ უნდა მოვათავსოთ დენიანი გამტარი მაგნიტურ ველში, რომ მასზე მოქმედი ამპერის ძალის მოდული მაქსიმალური იყოს? ნულის ტოლი იყოს?



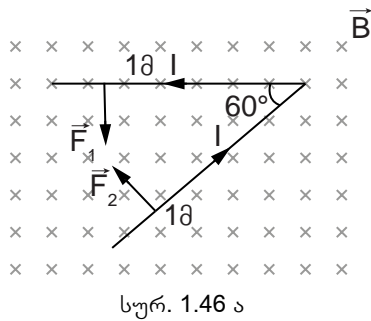
ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

2 მ სიგრძის გამტარი ღერო, რომელიც შუაში 60° -იანი კუთხითაა მოხრილი, მო-
თავსებულია $0,4$ ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ისე, როგორც სურ.
1.45-ზეა ნაჩვენები. გამოთვალეთ ღეროზე მოქმედი ამ-
პერის ძალის მოდული, თუ დენის ძალა მასში $1,5$ ა-ია.

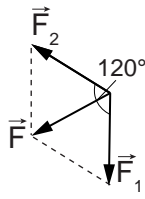
ამოხსნა: ჯერ გამოვთვალოთ გამტარის ცალკეულ, 1 მეტრიან ნაწილზე მოქმედი ამპერის ძალის მოდული: $F_s = BIl \sin \alpha$, $F_s = 0,6$ ნ. ეს ძალები ვექტორულად, პარალელელოგრამის წესით შევკრიბოთ (სურ. 1.45 ბ). ნახაზიდან ადვილად დავადგენთ, რომ ამპერის ძალებს შორის კუთხე 120° -ია, ამიტომ ძალებზე აგებული პარალელელოგრამი ისეთი რომბი იქნება, რომლის დიაგონალი გვერდის ტოლია. ეს ნიშნავს, რომ დენიან გამტარზე



სურ. 1.45



სურ. 1.46 ა



სურ. 1.46 ბ

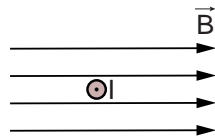
მაგნიტური ველის მხრიდან მოქმედი ჯამური ამპერის ძალის მოდული $F=0,6$ ნ-ია. პასუხი: ღეროზე მოქმედი ამპერის ძალის მოდული $0,6$ ნ-ის ტოლია.



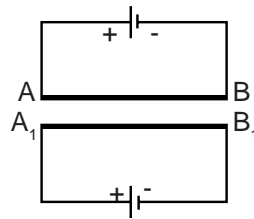
ამოხსენით ამოცანები:

1. განსაზღვრეთ მაგნიტურ ველში მოთავსებულ დენიან გამტარზე მოქმედი ძალის მიმართულება (სურ. 1.47).
2. სურ. 1.48-ის მიხედვით დაადგინეთ,

მიიზიდავენ თუ განიზიდავენ AB და A_1B_1 გამტარები ერთმანეთს?



სურ. 1.47



სურ. 1.48

3. თუ რბილ ზამბარაში დენს გავატარებთ, ის შეიკუმშება. ახსენით, რატომ?
4. იმოქმედებს თუ არა წრფივ დენიან გამტარზე ამპერის ძალა, თუ მას ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირების პარალელურად მოვათავსებთ? პასუხი დაასაბუთეთ.
5. როგორ შეიცვლება მაგნიტურ ველში მოთავსებულ დენიან გამტარზე მოქმედი ამპერის ძალის მოდული, თუ მასში გამავალი დენის ძალის მნიშვნელობასა და გამტარის სიგრძეს გავანახევრებთ?
6. $0,2$ ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში 2 მ სიგრძის წრფივი დენიანი გამტარი ინდუქციის წირების მართობულადაა მოთავსებული. განსაზღვრეთ გამტარში გამავალი დენის ძალა, თუ გამტარზე მოქმედი ამპერის ძალის მოდული $0,4$ ნ-ია.
7. $0,05$ ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში წრფივი დენიანი გამტარი ინდუქციის წირების მართობულადაა მოთავსებული. რა სიგრძისაა გამტარი, თუ მასში $0,6$ ა დენის გავლისას ამპერის ძალის მოდული $0,12$ ნ-ია?
8. ერთგვაროვან მაგნიტური ველში 180 სმ სიგრძის წრფივი დენიანი გამტარი ისეა მოთავსებული, რომ დენისა და ინდუქციის ვექტორს შორის კუთხე 30° -ია. იპოვეთ მაგნიტური ველის ინდუქციის მოდული, თუ გამტარში $1,25$ ა დენის გავლისას მასზე $0,45$ ნ ამპერის ძალა მოქმედებს.
9. $0,03$ ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირების მართობულად მოთავსებულია 75 სმ სიგრძის წრფივი გამტარი, რომელშიც 5 ა დენი გადის. რა მუშაობას შეასრულებს ამპერის ძალა მისი მიმართულებით გამტარის 20 სმ მანძილზე გადაადგილებისას?
10. $0,48$ ტლ ინდუქციის ჰორიზონტალურად მიმართულ ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში, მაგნიტური ინდუქციის წირების მართობულად მოთავსებული ორ ძაფზე დაკიდებული ჰორიზონტალური გამტარი, რომლის სიგრძე და მასა, შესაბამისად, 3 მ და 240 გ-ია. გამოთვალეთ თითოეული ძაფის დაჭიმულობის ძალა, თუ გამტარში გამავალი დენის ძალა $1,5$ ა-ია. გამტართან მიმყვანი სადენების მოქმედება ძაფებზე უგულვებელყავით.

§ 1.7 წრფივი დენიანი გამტარების ურთიერთქმედება

პარაგრაფ 1.3-ში ჩატარებული ცდებიდან იცით, რომ ორი პარალელური დენიანი გამტარი ერთმანეთთან ურთიერთქმედებს: ერთი მიმართულების დენების შემთხვევაში გამტარები მიიზიდება, სხვადასხვა მიმართულების დენების შემთხვევაში კი – განიზიდება (სურ. 1.49). მიღებული ცოდნის გამოყენებით შევეცადოთ ეს მოვლენა თეორიულადაც ავხსნათ.

ჯერ განვსაზღვროთ \vec{F}_{21} ძალა, რომლითაც პირველი გამტარი მეორეზე მოქმედებს. იმ ადგილას, სადაც მეორე გამტარია, პირველ გამტარში გამავალი დენი ქმნის \vec{B}_1 ინდუქციის მაგნიტურ ველს. მარჯვენა ხელის წესის გამოყენებით ადვილად დავადგენთ, რომ \vec{B}_1 ვექტორი პერიზონტალურ სიბრტყეში მდებარეობს, მეორე დენიანი გამტარის მართობულია და ჩვენგან სურათისკენაა მიმართული (სურ. 1.50 ა). შესაბამისად, მეორე გამტარის Δl სიგრძის მონაკვეთზე მოქმედი ამპერის ძალა ტოლი იქნება:

$$F_{21} = I_2 \Delta l B_1 \sin 90^\circ = I_2 \Delta l B_1.$$

მარცხენა ხელის წესის თანახმად, ეს ძალაც პერიზონტალურ სიბრტყეში მდებარეობს და მარცხნივ, პირველი გამტარისკენაა მიმართული, როდესაც გამტარებში ერთი მიმართულების დენებია. თუ მეორე გამტარში დენის მიმართულება საპირისპიროთი შეიცვლება, მაშინ \vec{F}_{21} ძალა მარჯვნივ, პირველი გამტარიდან იქნება მიმართული.

ანალოგიურად, მეორე გამტარში გამავალი დენი იქ, სადაც პირველი გამტარია, \vec{B}_2 ინდუქციის მაგნიტურ ველს ქმნის. ეს ვექტორიც პერიზონტალურ სიბრტყეში მდებარეობს, პირველი დენიანი გამტარის მართობულია და მიმართულია სურათიდან ჩვენკენ, როდესაც გამტარებში ერთი მიმართულების დენი გადის. თუ მეორე გამტარში დენის მიმართულებას შევცვლით, ეს ვექტორი მიმართული იქნება ჩვენგან სურათისაკენ (სურ. 1.50 ბ). მეორე გამტარის Δl მონაკვეთზე მოქმედი ამპერის ძალა ტოლი იქნება:

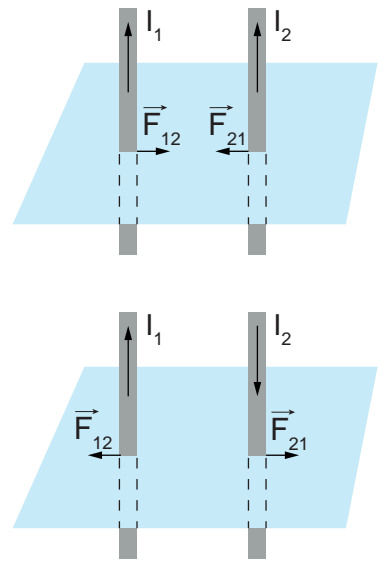
$$F_{12} = I_1 \Delta l B_2 \sin 90^\circ = I_1 \Delta l B_2.$$

მარცხენა ხელის წესის თანახმად, ეს ძალაც პერიზონტალურ სიბრტყეში მდებარეობს და მიმართულია მარჯვნივ, მეორე გამტარისაკენ, როდესაც გამტარებში ერთი მიმართულების დენები გადის. თუ მეორე გამტარში დენის მიმართულება საპირისპიროთი შეიცვლება, მაშინ \vec{F}_{12} ძალა მარცხნივ, მეორე გამტარიდან იქნება მიმართული.

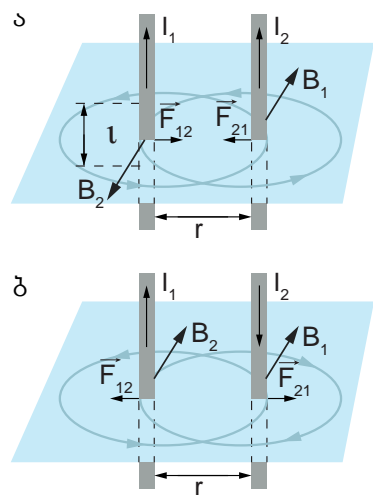
ახლა შევეცადოთ განვსაზღვროთ ამ ძალთა მოდულები. ნიუტონის მესამე კანონის თანახმად, $F_{21} = F_{12}$, ანუ,

$$I_2 \Delta l B_1 = I_1 \Delta l B_2. \quad (1)$$

ამ ტოლობიდან ჩანს, რომ პირველი გამტარის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველის ინდუქცია პროპორციულია მასში გამავალი დენის ძალის $B_1 \sim I_1$. ანალოგიურად,



სურ. 1.49



სურ. 1.50

$B_2 \sim I_2$. შესაბამისად, დენიანი გამტარების ურთიერთქმედების ძალა გამტარებში გამავალი დენის ძალების ნამრავლის პროპორციულია:

$$F_{12} = F_{21} \sim I_1 I_2$$

გარდა ამისა, ამპერის ცდებმა აჩვენა, რომ ეს ძალები უკუპროპორციულია გამტარებს შორის r მანძილის და გამტარების ყოველ Δl სიგრძის მონაკვეთზე გამოითვლება ფორმულით:

$$F_{12} = F_{21} = k_m \frac{I_1 I_2}{r} \Delta l, \quad (2)$$

რომელშიც k_m პროპორციულობის კოეფიციენტია. ცდებით დადგენილია k_m კოეფიციენტის მნიშვნელობა – $k_m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ ნ/ა}^2$.

სწორედ (2) ტოლობიდან არის განსაზღვრული SI-ს ერთ-ერთი ძირითადი ერთეული ამპერი (1ა).

1 ამპერი არის მუდმივი დენის ძალა, რომელიც გადის ვაკუუმში მოთავსებულ, ერთმანეთისაგან 1 მეტრით დაშორებულ ორ უსასრულოდ გრძელ, პარალელურ, მცირე განივკვეთის მქონე გამტარში და სიგრძის ყოველ 1 მ-ზე $2 \cdot 10^{-7}$ ნ-ის ტოლი ძალით ურთიერთქმედებას იწვევს.

ერთის მხრივ, $I_2 \Delta l B_1 = F_{21}$, მეორეს მხრივ, $F_{21} = k_m \frac{I_1 I_2}{r} \Delta l$, ამიტომ

$$I_2 \Delta l B_1 = k_m \frac{I_1 I_2}{r} \Delta l, \text{ საიდანაც}$$

$$B_1 = k_m \frac{I_1}{r}.$$

ანალოგიურად მივიღებთ, რომ

$$B_2 = k_m \frac{I_2}{r}.$$

ამრიგად, უსასრულოდ გრძელი და წვრილი დენიანი გამტარის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველის ინდუქციის მოდული მისგან r მანძილზე გამოითვლება ფორმულით:

$$B = k_m \frac{I}{r}.$$

დასკვნები:

- r მანძილით დაშორებული წვრილი, უსასრულოდ გრძელი, პარალელური დენიანი გამტარებიდან ერთ-ერთის Δl სიგრძის მონაკვეთზე მეორე გამტარი მოქმედებს მაგნიტური ძალით, რომელიც გამოითვლება ფორმულით: $F_{12} = F_{21} = k_m \frac{I_1 I_2}{r} \Delta l$;
- უსასრულოდ გრძელი და წვრილი დენიანი გამტარის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველის ინდუქციის მოდული მისგან r მანძილზე გამოითვლება ფორმულით: $B = k_m \frac{I}{r}$.

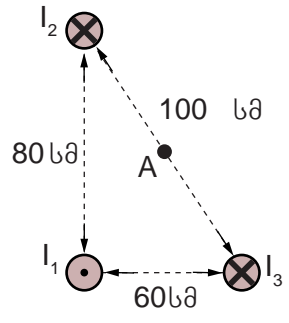
საკონტროლო კითხვები:

1. რა მექანიზმით ხორციელდება დენიანი გამტარების ურთიერთქმედება?
2. როგორ იცვლება მაგნიტური ველის ინდუქციის მოდული წრფივი დენიანი გამტარიდან დაშორების მიხედვით?



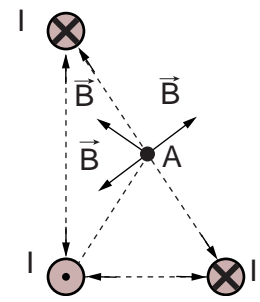
ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

ერთმანეთისგან 60 სმ, 80 სმ და 100 სმ მანძილით დაშორებული სამი წვრილი, უსასრულოდ გრძელი, პარალელური დენიანი გამტარი ვაკუუმშია მოთავსებული. დენის ძალა სამივე გამტარში ერთნაირია და 0,2 ა-ის ტოლია. განსაზღვრეთ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდული A წერტილში, რომელიც II და III გამტარების შემაერთებელი მონაკვეთის შუაწერტილია (სურ. 1.51)



სურ. 1.51

ამოხსნა: A წერტილში ინდუქციის ვექტორის საპოვნელად საჭიროა ამ წერტილში თითოეული გამტარის მიერ შექმნილი მაგნიტური ინდუქცია ვექტორულად შევკრიბოთ. ადვილი დასადგენია, რომ გამტარების ერთმანეთის მოპირდაპირე მონაკვეთები მართკუთხა სამკუთხედის წვეროებზე მდებარეობს, ხოლო A წერტილი ამ სამკუთხედის ჰიპოტენუზის შუა წერტილია. მათემატიკის კურსიდან იცით, რომ ეს წერტილი სამკუთხედის სამივე წვეროდან ერთნაირი, ჰიპოტენუზის ნახევრის ტოლი მანძილითაა დაშორებული. სურ. 1.52 ზე გამოსახული მეორე და მესამე გამტარების მიერ A წერტილში შექმნილი მაგნიტური ინდუქციის ვექტორები მოპირდაპირე ვექტორებია, რომლებიც ერთმანეთს აკომპენსირებს. შედეგად, A წერტილში მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი პირველი გამტარის მიერ შექმნილი მაგნიტური ინდუქციის ტოლია. ამრიგად, $B = k_m \frac{I}{r}$, რომელშიც $k_m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ ნ/ა}^2$, $I = 2 \text{ ა}$ და $r = 50 \text{ სმ} = 0,5 \text{ მ}$. ამ სიდიდეების ფორმულაში ჩასმით მივიღებთ: $B = 8 \cdot 10^{-7} \text{ ტლ}$.



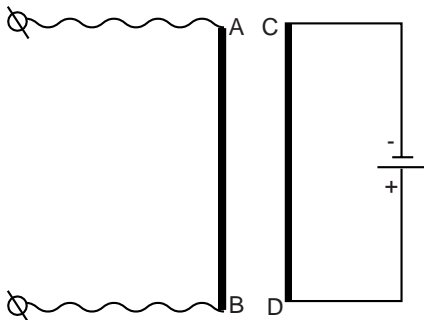
სურ. 1.52

პასუხი: მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდული A წერტილში $8 \cdot 10^{-7}$ ტესლას ტოლია.

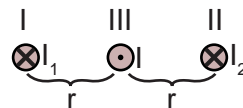


ამოხსენით ამოცანები:

- რა მიმართულებით უნდა გავატაროთ დენი AB გამტარში, რომ მან დენიანი CD გამტარი მიიზიდოს (სურ. 1.53)?
- პირველ გამტარში გამავალი დენის ძალა უფრო მეტია, ვიდრე – მეორეში. განსაზღვრეთ მათ შორის მოთავსებულ და თითოეულისაგან ტოლი მანძილით დაშორებულ მესამე დენიან გამტარზე მოქმედი მაგნიტური ძალის მიმართულება (სურ. 1.54).



სურ. 1.53



სურ. 1.54

3. როგორ შეიცვლება წვრილ, უსასრულოდ გრძელ, პარალელურ დენიან გამტარებს შორის ურთიერთქმედების ძალა, თუ მათ შორის მანძილს გავაორმაგებთ?

4. როგორ შეიცვლება წვრილ, უსასრულოდ გრძელ, პარალელურ დენიან გამტარებს შორის ურთიერთქმედების ძალა, თუ თითოეულ გამტარში გამავალი დენის ძალას 2-ჯერ გავზრდით?

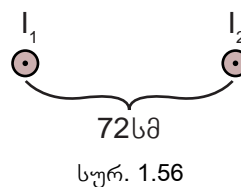
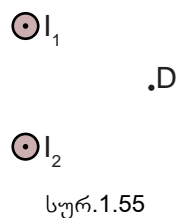
5. გამოთვალეთ ვაკუუმში მოთავსებული, წვრილი, უსასრულოდ გრძელი, პარალელური დენიანი გამტარების 1,5 მეტრიან მოპირდაპირე მონაკვეთებს შორის ურთიერთქმედების ძალა, თუ თითოეულ გამტარში გამავალი დენის ძალა 1,6 ა-ია, გამტარებს შორის მანძილი კი – 40 სმ.

6. ვაკუუმში მოთავსებული წვრილი, უსასრულოდ გრძელი, პარალელური დენიანი გამტარების ერთმანეთის მოპირდაპირე 1 მეტრიანი სიგრძის მონაკვეთები $3 \cdot 10^{-7}$ ნ ძალით ურთიერთქმედებს. იპოვეთ პირველ გამტარში გამავალი დენის ძალა, თუ მეორე გამტარში 2,2 ა დენი გადის, გამტარებს შორის მანძილი კი – 110 სმ-ია.

7. გამოთვალეთ უსასრულოდ გრძელი და წვრილი დენიანი გამტარის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველის ინდუქციის მოდული მისგან 50 სმ მანძილზე, თუ გამტარში 3,5 ა დენის გადის.


8. გამოთვალეთ უსასრულოდ გრძელ და წვრილ დენიან გამტარში გამავალი დენის ძალა, თუ მის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველის ინდუქციის მოდული გამტარიდან 75 სმ მანძილზე $4,5 \cdot 10^{-7}$ ტესლაა.

9. სურ. 1.55-ზე გამოსახულია ვაკუუმში მოთავსებული, ერთმანეთისგან 20 სმ მანძილით დაშორებული ორი წვრილი, უსასრულოდ გრძელი, პარალელური დენიანი გამტარი, რომლებშიც გამავალი დენის ძალები, შესაბამისად, $I_1=2$ ა და $I_2=4$ ა-ია. იპოვეთ მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის მოდული თითოეული გამტარიდან 20 სმ მანძილით დაშორებულ D წერტილში.



10. სურ 1.56-ზე გამოსახულია ვაკუუმში მოთავსებული, ერთმანეთისგან 72 სმ მანძილით დაშორებული ორი წვრილი, უსასრულოდ გრძელი, პარალელური დენიანი გამტარი, რომლებშიც გამავალი დენის ძალები შესაბამისად, $I_1=1$ ა და $I_2=5$ ა-ია. პირველი გამტარიდან რა მანძილზე იქნება მოთავსებული წერტილი, რომელშიც მაგნიტური ველის ინდუქციის მოდული 0-ის ტოლია?

§ 1.8 მაგნიტური ველის მოქმედება მოძრავ მუხტზე. ლორენცის ძალა


 მე-10 კლასის ფიზიკის კურსიდან იცით, რომ ელექტრული დენი დამუხტული ნაწილაკების მოწესრიგებული მიმართული მოძრაობაა. სწორედ ამიტომ, დენიან გამტარზე მაგნიტური ველის მოქმედება შედეგია მაგნიტური ველის მოქმედებისა გამტარში მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკებზე. ჩვენი მიზანია, განვსაზღვროთ ძალა, რომლითაც მაგნიტური ველი ერთ მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკზე მოქმედებს.



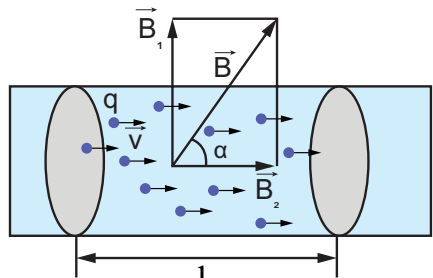
ჰენდრიკ ლორენცი
1853-1928

ძალას, რომლითაც მაგნიტური ველი მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკზე მოქმედებს, **ლორენცის ძალას** უწოდებენ, ცნობილი ნიდერლანდელი ფიზიკოსის, ჰენდრიკ ლორენცის პატივსაცემად. ლორენცის ძალის მოდულის საპოვნელად, ამპერის კანონი გამოვიყენოთ.

განვიხილოთ წრფივი დენიანი გამტარის მონაკვეთი (სურ. 1.57). გამტარის მონაკვეთის l სიგრძე და განივკვეთის S ფართობი იმდენად მცირე ავიღოთ, რომ ამ მონაკვეთის ფარგლებში შეგვეძლოს მაგნიტური ველი ერთგვაროვნად მივიჩნიოთ.

 როგორც გახსოვთ, გამტარში გამავალი I დენის ძალა დამოკიდებულია მოწესრიგებულად მოძრავი ნაწილაკის q მუხტზე, ამ ნაწილაკთა n კონცენტრაციაზე, მიმართული მოძრაობის v სიჩქარეზე, გამტარის განივკვეთის S ფართობზე და გამოისახება ფორმულით:

$$I = qnvS \quad (1)$$



სურ. 1.57

მეორეს მხრივ, მაგნიტური ველის მხრიდან დენიანი გამტარის არჩეულ მონაკვეთზე მოქმედი ამპერის ძალის მოდული ტოლია:

$$F_s = BIl \sin \alpha \quad (2)$$

თუ ამ ფორმულაში დენის ძალის (1) გამოსახულებას ჩავსვამთ, მივიღებთ:

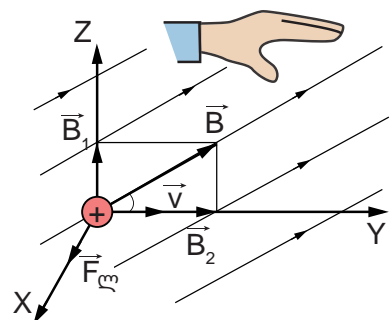
$$F_s = |q|nvSlB \sin \alpha.$$

ნამრავლი $N = nSl$ არჩეულ მოცულობაში თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკების რაოდენობაა. ცხადია, თითოეულ დამუხტულ ნაწილაკზე მაგნიტური ველის მხრიდან მოქმედი ლორენცის ძალის მოდული ტოლი იქნება:

$$F_{\text{ლ}} = \frac{F_s}{N} = |q|vB \sin \alpha,$$

რომელშიც α მაგნიტური ინდუქციის ვექტორსა და ნაწილაკის სიჩქარეს შორის კუთხეა.

ლორენცის ძალის მიმართულების დასადგენად უნდა გამოვიყენოთ მარცხენა ხელის წესი: **თუ მარცხენა ხელს ისე დავიჭერთ, რომ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი ხელის გულში შედიოდეს, ოთხი თითი მიმართული იყოს დადებითი მუხტის მოძრაობის მიმართულებით (უარყოფითი მუხტის მოძრაობის საწინააღმდეგოდ), მაშინ 90°-ით გადახრილი ცერა თითი მუხტზე მოქმედი ძალის მიმართულებას გვიჩვენებს (სურ. 1.58).**



სურ. 1.58

თუ q მუხტზე ერთდროულად მოქმედებს ელექტრული და მაგნიტური ველი, მაშინ მასზე მოქმედი ჯამური ძალა ტოლი იქნება:

$$\vec{F} = \vec{F}_{ელ} + \vec{F}_{ლ},$$

რომელშიც $\vec{F}_{ელ} = q\vec{E}$.

რადგან ლორენცის ძალა ნაწილაკის სიჩქარის მართობულია, ამიტომ ის მუშაობას არ ასრულებს. კინეტიკური ენერჯიის შესახებ თეორემის თანახმად, ლორენცის ძალა არ ცვლის ნაწილაკის კინეტიკურ ენერჯიას და, შესაბამისად, სიჩქარის მოდულს. ლორენცის ძალის მოქმედებით იცვლება მხოლოდ ნაწილაკის სიჩქარის მიმართულება.

დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობას ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში დანვრილებით შემდეგ პარაგრაფში განვიხილავთ.

დასკვნები:

- ძალას, რომლითაც მაგნიტური ველი მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკზე მოქმედებს, ლორენცის ძალას უწოდებენ;
- ლორენცის ძალის მოდული გამოითვლება ფორმულით: $F_{ლ} = |q|vB \sin\alpha$;
- თუ მარცხენა ხელს ისე დავიჭერთ, რომ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი ხელის გულში შედიოდეს, ოთხი თითი მიმართული იყოს დადებითი მუხტის მოძრაობის მიმართულებით (უარყოფითი მუხტის მოძრაობის საწინააღმდეგოდ), მაშინ 90° -ით გადახრილი ცერა თითი მუხტზე მოქმედი ძალის მიმართულებას გვიჩვენებს.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა შემთხვევაში იმოქმედებს ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოძრავ მუხტზე მაქსიმალური მნიშვნელობის ლორენცის ძალა?
2. რა შემთხვევაში არ იმოქმედებს ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოძრავ მუხტზე ლორენცის ძალა?
3. ერთმანეთის მიმართ როგორ უნდა მოძრაობდნენ სხვადასხვანაირი დამუხტული ნაწილაკები, რომ მათზე ერთი და იმავე მიმართულების ლორენცის ძალამ იმოქმედოს?



ერთად ამოხსნათ ამოცანა

რამდენი ელექტრონი აკლია დამუხტულ ნაწილაკს, რომელიც $0,5$ ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირებისადმი 30° -იანი კუთხით, 200 კმ/წმ სიჩქარით მოძრაობს და მასზე მოქმედი ლორენცის ძალის მოდული 5 ნნ-ის ტოლია?

ამოხსნა: ლორენცის ძალის ფორმულის გამოყენებით ვიპოვოთ ამ ნაწილაკის მუხტი: $F_{ლ} = Bvq\sin\alpha$, საიდანაც $q = \frac{F}{Bv\sin\alpha} = 2,5 \cdot 10^{-14}$ კ. როგორც იცით, ნებისმიერი დამუხტული სხეულის მუხტი ელემენტარული, $1,6 \cdot 10^{-19}$ კ მუხტის ჯერადია: $q = Ne$. შესაბამისად, რომ ვიპოვოთ რამდენი ელექტრონი აკლია ამ ნაწილაკს, გამოვიყენოთ ფორმულა: $N = \frac{q}{e} = 156250$.

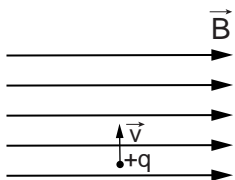
პასუხი: დამუხტულ ნაწილაკს 156250 ელექტრონი აკლია.



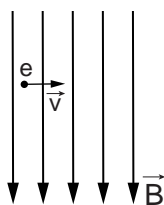
ამოხსენით ამოცანები:

1. იპოვეთ ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოძრავ დადებით მუხტზე მოქმედი ლორენცის ძალის მიმართულება (სურ. 1.59)
2. სურ. 1.60-ის მიხედვით დაადგინეთ მოზრავ ელექტრონზე მოქმედი ლორენცის ძალის მიმართულება.

3. სურ. 1.61-ზე გამოსახულია ნრფივი დენიანი გამტარი და მის მართობულად მოძრავი პროტონი. დაადგინეთ, მოცემულ მომენტში პროტონზე მოქმედებს თუ არა ლორენცის ძალა. პასუხი დაასაბუთეთ.



სურ. 1.59



სურ. 1.60



სურ. 1.61

4. ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირების მართობულად შეიჭრა ორი დამუხტული ნაწილაკი. პირველი ნაწილაკის მუხტი და სიჩქარის მოდული, შესაბამისად, 4-ჯერ და 2-ჯერ მეტია, ვიდრე მეორისა. რამდენჯერ მეტი ლორენცის ძალა მოქმედებს პირველ ნაწილაკზე, ვიდრე მეორეზე?

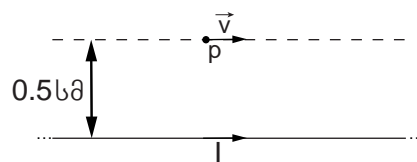
5. ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ერთი და იმავე სიჩქარის მოდულით, ინდუქციის წირებისადმი მართობულად შეიჭრა პროტონი და α ნაწილაკი. მიიჩნიეთ, რომ თითოეულ მათგანზე მხოლოდ ლორენცის ძალა მოქმედებს და იპოვეთ მათი აჩქარებების მოდულების ფარდობა.

6. 0,1 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირებისადმი 30° -იანი კუთხით და 2 კმ/წმ სიჩქარით შეიჭრა ელექტრონი. განსაზღვრეთ ელექტრონზე მოქმედი ლორენცის ძალის მოდული.

7. 0,2 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირებისადმი 45° -იანი კუთხით და $1,5 \cdot 10^4$ მ/წმ სიჩქარით შეიჭრა დადებითად დამუხტული ნაწილაკი. განსაზღვრეთ ნაწილაკის მუხტი, თუ მასზე მოქმედი ლორენცის ძალის მოდული $9 \cdot 10^{-8}$ ნ-ია.

8. \vec{B} ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში წირებისადმი მართობულად შეიჭრა E კინეტიკური ენერჯის მქონე ნაწილაკი. იპოვეთ მანიალაკზე მოქმედი ლორენცის ძალის მოდული, თუ მისი მასა და მუხტი, შესაბამისად, m-ისა და q-ს ტოლია.

9. სურ. 1.62-ზე გამოსახულია უსასრულოდ გრძელი ნრფივი დენიანი გამტარი, რომელშიც 2 ა დენი გადის. იპოვეთ გამტარის პარალელურად, მისგან 0,5 მ-ის დაშორებით 1,5 კმ/წმ სიჩქარით მოძრავ პროტონზე მოქმედი ლორენცის ძალის მოდული და მიმართულება.



სურ. 1.62

10. თავდაპირველად უძრავი, $U=200$ ვ პოტენციალთა სხვაობით აჩქარებული ელექტრონი ინდუქციის წირებისადმი 60° -იანი კუთხით მიმართული სიჩქარით შეიჭრა $B=1$ ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ვერში. იპოვეთ ელექტრონზე მოქმედი ლორენცის ძალის მოდული.



<http://tiny.cc/nk87vz>



<http://tiny.cc/qk87vz>



<http://tiny.cc/rk87vz>



<http://tiny.cc/wk87vz>



<http://tiny.cc/4l87vz>



<http://tiny.cc/9l87vz>

§ 1.9 დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობა ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში

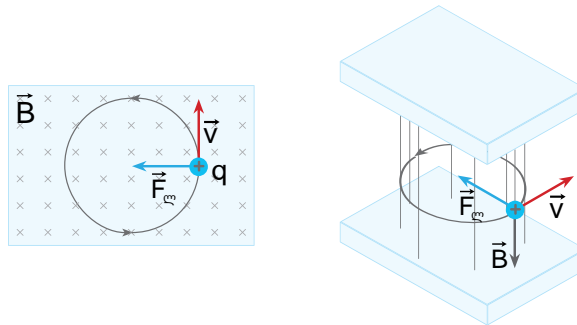
ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში დამუხტული ნაწილაკის მოძრაობის ტრაექტორია დამოკიდებულია ნაწილაკის სიჩქარესა და მაგნიტური ინდუქციის ვექტორს შორის α კუთხეზე. ჯერ განვიხილოთ ორი კერძო შემთხვევა.

დამუხტული ნაწილაკი შედის მაგნიტურ ველში მაგნიტური ინდუქციის წირების პარალელურად: $\vec{v} \parallel \vec{B}$.

ამ შემთხვევაში $\alpha = 0^\circ$, $\sin\alpha = 0$ და $F_{\text{ლ}} = 0$. ვინაიდან ლორენცის ძალა ნაწილაკზე არ მოქმედებს, ის ინერციით გააგრძელებს თანაბარ მოძრაობას მაგნიტური ინდუქციის წირების გასწვრივ.

დამუხტული ნაწილაკი შედის მაგნიტურ ველში მაგნიტური ინდუქციის წირების მართობულად: $\vec{v} \perp \vec{B}$.

ამ შემთხვევაში $\alpha = 90^\circ$, $\sin\alpha = 1$ და $F_{\text{ლ}} = |q|vB$. რადგანაც ლორენცის ძალა სიჩქარის მართობულია, ამიტომ ის ნაწილაკის სიჩქარის მოდულს არ ცვლის, მაგრამ ცვლის სიჩქარის მიმართულებას. ლორენცის ძალა m მასის დამუხტულ ნაწილაკს მუდმივ ცენტრისკენულ აჩქარებას ანიჭებს და აიძულებს წრეწირზე იმოძრაოს (სურ. 1.63). ვიპოვოთ ამ წრეწირის რადიუსი.



სურ. 1.63

ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად, $F_{\text{ლ}} = ma_{\text{ც}}$, როგორც იცით, $a_{\text{ც}} = \frac{v^2}{R}$, ამიტომ,

$$m \frac{v^2}{R} = |q|vB.$$

აქედან გამომდინარეობს, რომ იმ წრეწირის რადიუსი, რომელზეც ნაწილაკი იმოძრაეობს, ტოლია:

$$R = \frac{mv}{|q|B}.$$

დამუხტული ნაწილაკი, რომელიც ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მაგნიტური ინდუქციის წირების მართობულად შედის, მოძრაობს წრეწირზე ამ წირების მართობულ სიბრტყეში.

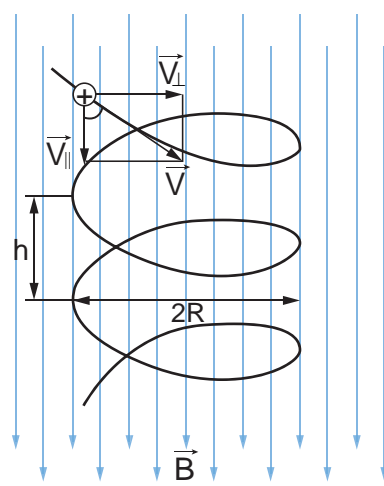
დამუხტული ნაწილაკის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში წრეწირზე ბრუნვის პერიოდი მის სიჩქარეზე დამოკიდებული არ არის. მართლაც,

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{|q|B}.$$

თუ მაგნიტურ ველში უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკი შეიჭრება, მაშინ ის დადებითად დამუხტული ნაწილაკის საპირისპიროდ დაინწყებს ბრუნვას. ეს ფაქტი ძალიან მნიშვნელოვანია, რადგანაც საშუალებას იძლევა, მაგნიტურ ველში გატარებით დამუხტულ ნაწილაკთა ნაკადში ერთმანეთისაგან განვაცალკევოთ სხვადასხვა ნიშნის მუხტის მქონე ნაწილაკები.

ახლა განვიხილოთ ზოგადი შემთხვევა – **დამუხტული ნაწილაკი** შედის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ისე, რომ მისი სიჩქარე მაგნიტური ინდუქციის წირებთან α კუთხეს ქმნის.

დავშალოთ დამუხტული ნაწილაკის \vec{v} სიჩქარე ორ მდგენელად: ინდუქციის წირების გასწვრივ მიმართულ \vec{v}_{\parallel} და მათ მართობულ \vec{v}_{\perp} ვექტორად (სურ. 1.64). \vec{v}_{\parallel} ვექტორის გასწვრივ ნაწილაკზე ძალა არ მოქმედებს და ამიტომ, ამ მიმართულებით ნაწილაკი $v_{\parallel} = v \cos \alpha$ სიჩქარით თანაბრად მოძრაობს. \vec{v}_{\perp} ვექტორი კი მხოლოდ მიმართულებას იცვლის, რადგან დამუხტულ ნაწილაკზე მოქმედი ლორენცის ძალა მოდულით მუდმივია და მართობულია \vec{v}_{\perp} მდგენელის. ამ ძალის მოდული ტოლია: $F_{\perp} = |q|v_{\perp}B = |q|vB \sin \alpha$. მისი მოქმედება დამუხტულ ნაწილაკს მხოლოდ ინდუქციის ვექტორის მართობულ სიბრტყეში წრეწირზე მოძრაობას აიძულებს.



სურ. 1.64

ამ ორი ერთმანეთისაგან დამოუკიდებელი მოძრაობის ჯამური ტრაექტორია იქნება ხრახნნირი, რომლის შემობრუნების რადიუსი იქნება

$$R = \frac{mv_{\perp}}{|q|B} = \frac{mv \sin \alpha}{|q|B}.$$

დამუხტული ნაწილაკის ხრახნნირზე ერთი შემობრუნებისას ინდუქციის წირების გასწვრივ შესრულებულ გადაადგილების მოდულს, ხრახნნირის ბიჯი ეწოდება. ბიჯის გამოსახულებისათვის მივიღებთ:

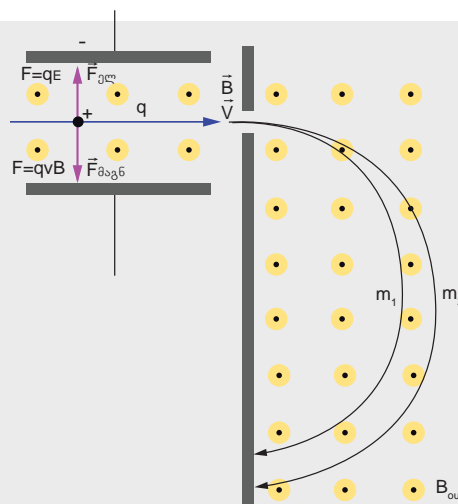
$$h = v_{\parallel} T = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{|q|B}.$$

ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში დამუხტული ნაწილაკების ბრუნვა ფიზიკაში ფართოდ გამოიყენება. მაგალითად, დამუხტული ნაწილაკების მასის დასადგენად იყენებენ ხელსაწყოს, რომელსაც **მას-სპექტროგრაფი** ეწოდება. დამუხტული ნაწილაკების მასის დადგენით შესაძლებელია ნივთიერებათა კლასიფიკაცია. მას-სპექტროგრაფის მუშაობის პრინციპი ეფუძნება იმ ფაქტს, რომ ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში დამუხტული ნაწილაკი მოძრაობს წრეწირზე, რომლის რადიუსი მისი მასის პროპორციულია. თუ გავზომავთ ამ წრეწირის რადიუსს, ნაწილაკის მასას განვსაზღვრავთ ფორმულით:

$$m = \frac{|q|B}{v} R.$$

როგორც ვხედავთ, ნაწილაკის მასის განსაზღვრისათვის მისი q მუხტისა და მაგნიტური ველის B ინდუქციის გარდა, უნდა ვიცოდეთ v სიჩქარეც, რომლითაც ნაწილაკი შეიჭრება მაგნიტურ ველში. ნაწილაკების წყარო სხვადასხვა სიჩქარის მქონე ნაწილაკებს გამოასხივებს, მაგრამ ამჩქარებელი ბატარეის წრედში ისინი გადიან სიჩქარის ფილტრს, რომელიც მხოლოდ გარკვეული სიჩქარის მქონე ნაწილაკებს ატარებს.

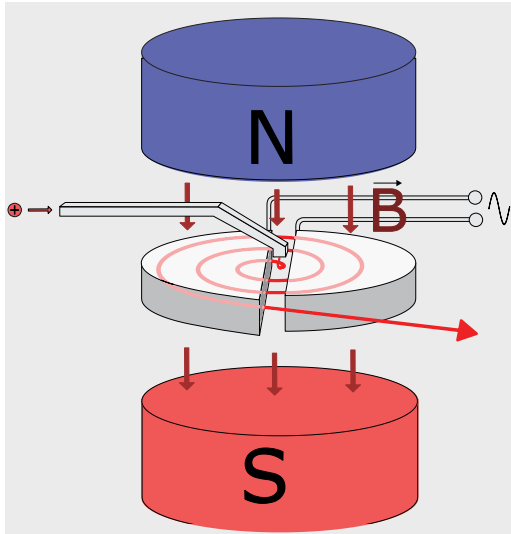
სურ. 1.65-ზე უმარტივესი მას-სპექტროგრაფის პრინციპული სქემაა ნაჩვენები. ტუმბოს საშუალებით ხელსაწყოს კამერაში შექმნილია ვაკუუმი. ვაკუუმური კამერა მოთავსებულია ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში (მისი ინდუქციის



სურ. 1.65

ვექტორი სურათის მართობულია). ელექტრული ველით აჩქარებული დამუხტული ნაწილაკები, მაგნიტურ ველში შემოხაზავენ რკალს და ხვდებიან ფოტოფირფიტაზე, რომელზეც კვალს ტოვებენ. კვალი საშუალებას იძლევა დიდი სიზუსტით გაიზომოს ტრაექტორიის რადიუსი და, შესაბამისად, განისაზღვროს ნაწილაკის მასა.

კიდევ ერთი ხელსაწყო, რომელშიც ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობის თავისებურება გამოიყენება, არის **ციკლოტრონი** – დამუხტული ნაწილაკების ციკლური ამაჩქარებელი. მისი მუშაობის პრინციპი ეფუძნება იმ ფაქტს, რომ ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში დამუხტული ნაწილაკების ბრუნვის პერიოდი სიჩქარეზე დამოკიდებული არ არის.



სურ. 1.66

ციკლოტრონი მონყობილია შემდეგნაირად: ვაკუუმურ კამერაში მოთავსებულია ორი ელექტროდი, რომლებსაც შუაზე გაჭრილი სახურავიანი ღრუ ცილინდრის ფორმა აქვს (სურ. 1.66). მათ დუანტებს უწოდებენ. დუანტებს ძლიერი მაგნიტის პოლუსებს შორის ათავსებენ და ცვლად პოტენციალთა სხვაობას მოსდებენ. კამერის ცენტრში, დუანტებს შორის განათავსებენ დამუხტული ნაწილაკების წყაროს.

როდესაც დუანტებს შორის პოტენციალთა სხვაობაა, ელექტრული ველი დუანტებს შორის ღარში აჩქარებს დამუხტულ ნაწილაკებს. ნაწილაკები შეფრინდებიან დუანტის შიდა ნაწილში, სადაც უკვე ელექტრული ველი არ არის. ლორენცის ძალის მოქმედებით დამუხტული ნაწილაკები წრენირზე მოძრაობას იწყებენ და ნახევარი ბრუნის გავლის შემდეგ

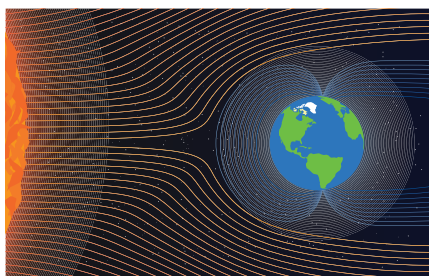
კვლავ აღმოჩნდებიან დუანტებს შორის ღარში. აქ მათ უნდა დახვდეთ საპირისპირო პოტენციალთა სხვაობა (ელექტრული ველის მიმართულება უნდა იყოს შეცვლილი). ის ნაწილაკები, რომლებიც მოძრაობდნენ შესაბამისი სიჩქარით და მოუსწრეს შეცვლილ პოტენციალთა სხვაობას, კვლავ აჩქარდებიან და მოძრაობას უკვე მეტი რადიუსის რკალზე გააგრძელებენ. რადგან ნახევარბრუნის შესრულების $t = \frac{\pi m}{qB}$ დრო სიჩქარეზე

დამოკიდებული არ არის, ამიტომ ნაწილაკები ღარში აღმოჩნდებიან ისევე იმ მომენტში, როდესაც პოტენციალთა სხვაობა კვლავ შეცვლილი იქნება, ისინი კვლავ აჩქარდებიან და ა. შ. დამუხტული ნაწილაკები ციკლოტრონის შიგნით მრავალხვიან სპირალს შემოხაზავენ და 10-20 მილიონ ევ ენერგიამდე აჩქარდებიან.

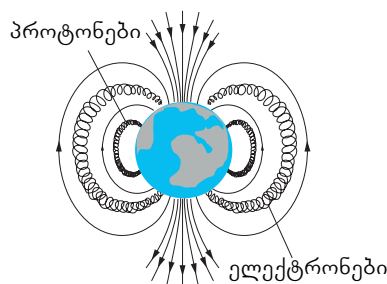
ციკლოტრონები და სხვა უფრო მძლავრი ამაჩქარებლები ფართოდ გამოიყენება ფიზიკურ კვლევებსა (ბირთვული ფიზიკა, ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკა და სხვა) და მედიცინაში.

მზიდან (კოსმოსური სივრციდან) დედამიწისაკენ ძალიან დიდი სიჩქარით მოძრაობენ დამუხტული ნაწილაკები. დედამიწის მაგნიტური ველი მოქმედებს როგორც დამცავი სარტყელი – ცვლის დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობის ტრაექტორიას და ამით დედამიწის ზედაპირს მასზე მაღალი ენერგიის ნაწილაკების მოხვედრისაგან იცავს. მაღალი სიჩქარის მქონე ნაწილაკებს დედამიწის მაგნიტური ველი ძირითადად გაფანტავს (სურ. 1.67). შედარებით დაბალი ენერგიის მქონე ნაწილაკები ხვდებიან „მაგნიტურ ხაფანგებში“, რომლებსაც ქმნის დედამიწის მაგნიტური ველის ძალნიერბი. ეს ნაწილაკები იწყებენ პოლუსებს შორის ხრახნირებზე მოძრაობას და ამ მანძილს დაახლოებით 1 წმ-ში გადიან. პოლუსებთან დამუხრუჭების, აგრეთვე ატმოსფეროს სხვა მოლეკულებთან დაჯახების გამო იქმნება ელექტრომაგნიტური გამოსხივება (რადიაცია), რომელიც ხშირად ჩრდილოეთის ციალის სახით დაიმზირება.

„მაგნიტური ხაფანგები“ ქმნიან დედამიწის რადიაციულ სარტყელებს – იმ არეებს ატმოსფეროში, სადაც დამუხტული ნაწილაკების კონცენტრაციის მატება შეინიშნება.



სურ. 1.67



სურ. 1.68

განასხვავებენ შიდა რადიაციულ სარტყელს (2400÷6000 კმ სიმაღლეზე), რომელიც ძირითადად პროტონებისაგან შედგება და გარე რადიაციულ სარტყელს (12000÷20000 კმ სიმაღლეზე), რომელიც ძირითადად ელექტრონებისაგან შედგება (სურ. 1.68).

დასკვნები:

- როდესაც დამუხტული ნაწილაკი შედის მაგნიტურ ველში მაგნიტური ინდუქციის წირების პარალელურად, ის ინერციით გააგრძელებს მოძრაობას მუდმივი სიჩქარით;
- როდესაც დამუხტული ნაწილაკი შედის მაგნიტურ ველში მაგნიტური ინდუქციის წირების მართობულად, ის მოძრაობს წრეწირზე, რომლის რადიუსია

$$R = \frac{mv}{|q|B}, \text{ ბრუნვის პერიოდი კი } - T = \frac{2\pi m}{|q|B};$$

- როდესაც დამუხტული ნაწილაკი შედის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირებისადმი α კუთხით, ის იმოძრაებს ხრახნწირზე, რომლის რადიუსია

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{|q|B}, \text{ ხოლო ბიჯი } - h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{|q|B}.$$

საკონტროლო კითხვები:

1. რა უდევს საფუძვლად მას-სპექტროგრაფისა და ციკლოტრონის მუშაობის პრინციპს?
2. როგორ გამოთვლიან დამუხტული ნაწილაკის მასას მას-სპექტროგრაფიის გამოყენებით?
3. ციკლოტრონის რა ნაწილში აჩქარდებიან დამუხტული ნაწილაკები?
4. როგორ ტრაექტორიაზე მოძრაობენ დამუხტული ნაწილაკები ციკლოტრონში?
5. როგორ იცავს დედამიწას მისი მაგნიტური ველი კოსმოსური ნაწილაკებისაგან?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

დამუხტული ნაწილაკი იწყებს მოძრაობას \vec{E} დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში და t დროის შემდეგ შედის \vec{B} ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირების მართობულად. ამ მონაცემებით გამოსახეთ ნაწილაკის მიერ მაგნიტურ ველში შემოწერილი რკალის სიმრუდის რადიუსი. ნაწილაკზე მოქმედ სიმძიმის ძალას ნუ გაითვალისწინებთ.

ამოხსნა: \vec{E} დაძაბულობის ელექტრულ ველში m მასისა q მუხტის მქონე ნაწილაკი იმოძრაავებს აჩქარებით, რომელიც შეიძლება ვიპოვოთ ნიუტონის მეორე კანონის გამოყენებით: $a = \frac{F_{ელ}}{m} = \frac{Eq}{m}$. ვინაიდან ნაწილაკის საწყისი სიჩქარე ნულის ტოლია, t დროის შემდეგ მისი სიჩქარის მოდული იქნება: $v = at = \frac{Eq}{m}t$. სწორედ ამ სიჩქარით შეიჭრება ნაწილაკი \vec{B} ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში წირებისადმი მართი კუთხით. როგორც იცით, ამ შემთხვევაში ნაწილაკის მიერ შემოწერილი წრეწირის რადიუსი გამოითვლება ფორმულით: $R = \frac{mv}{Bq}$. თუ მასში ნაწილაკის სიჩქარის გამოსახულებას ჩავსვამთ, მივიღებთ: $R = \frac{Et}{B}$.

პასუხი: ნაწილაკის მიერ მაგნიტურ ველში შემოწერილი წრეწირის რადიუსი $R = \frac{Et}{B}$ -ის ტოლია.



ამოხსენით ამოცანები:

1. იცვლება თუ არა დამუხტული ნაწილაკის კინეტიკური ენერგია მაგნიტურ ველში მოძრაობისას? პასუხი დაასაბუთეთ.

2. ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირების მართობულად შეიჭრა ორი ერთნაირი დამუხტული ნაწილაკი. იპოვეთ მათ მიერ შემოწერილი წრეწირების რადიუსების ფარდობა, თუ პირველი ნაწილაკის სიჩქარის მოდული 2-ჯერ მეტია მეორისაზე.

3. ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირების მართობულად შეიჭრა პროტონი და ელექტრონი. იპოვეთ მათი მოძრაობის ტრაექტორიის სიმრუდის რადიუსების ფარდობა, თუ ელექტრონის სიჩქარის მოდული 10-ჯერ მეტია პროტონისაზე. მიიჩნიეთ, რომ პროტონის მასა ელექტრონის მასას 2000-ჯერ აღემატება.

4. ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირების მართობულად შეიჭრა ტოლი კინეტიკური ენერგიის მქონე პროტონი და α ნაწილაკი. განსაზღვრეთ პროტონის შემოწერილი წრეწირის რადიუსი, თუ α ნაწილაკის შემოწერილი წრეწირის რადიუსი R -ის ტოლია. მითითება: α ნაწილაკი ჰელიუმის ატომის ბირთვია.

5. 1 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირების მართობულად 5 მ/წმ სიჩქარით შეიჭრა 0,2 მგ მასისა და 4 მკვ მუხტის მქონე ნაწილაკი. განსაზღვრეთ ნაწილაკის მოძრაობის ტრაექტორიის სიმრუდის რადიუსი.

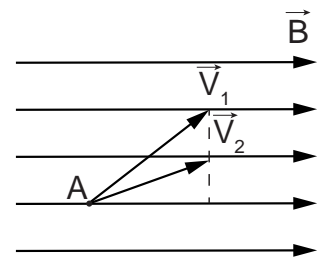
6. 0,5 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირებისადმი 30° -იანი კუთხითა და 20 სმ/წმ სიჩქარით შეიჭრა 1 მგ მასისა და 10 მკვ მუხტის მქონე ნაწილაკი. განსაზღვრეთ ნაწილაკის მიერ შემოწერილი წრეწირის რადიუსი.

7. 2 მგ მასისა და 20 მკვ მუხტის მქონე ნაწილაკი შეიჭრა $0,4$ ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირებისადმი 45° -იანი კუთხით. იპოვეთ ნაწილაკის მიერ 4,71 ნმ-ის განმავლობაში მაგნიტურ ველში შესრულებული სრულ ბრუნთა რაოდენობა.

8. 0,4 მგ მასისა და 5 მკვ მუხტის მქონე ნაწილაკი 10 მ/წმ სიჩქარით შეიჭრა ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირებისადმი 60° -იანი კუთხით. იპოვეთ ნაწილაკის ხრახნირული ტრაექტორიის ბიჯი, თუ მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის მოდული 0,75 ტესლაა.

9. 200 ევ კინეტიკური ენერგიის მქონე ელექტრონი შეიჭრა 1,6 ტესლა ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირებისადმი 60° კუთხით. იპოვეთ ელექტრონის ხრახნირზე მოძრაობის ბრუნვის პერიოდი და ხრახნირის ბიჯი.


10. ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში A წერტილიდან შეიჭრა ორი ერთნაირი დამუხტული ნაწილაკი, რომელთა სიჩქარის ვექტორები გამოსახულია სურ. 1.69-ზე. შეადარეთ მათი ხრახნირული ტრაექტორიის რადიუსები და ბიჯები ერთმანეთს.

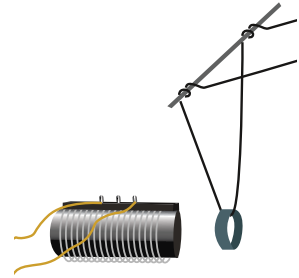


სურ. 1.69

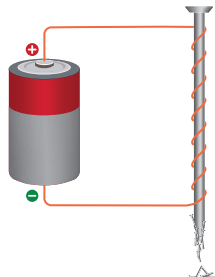
§ 1.10 ნივთიერების მაგნიტური თვისებები

წინა პარაგრაფებიდან უკვე იცით, რომ მაგნიტურ ველს ქმნის როგორც ელექტრული დენი, ასევე მუდმივი მაგნიტი. მაგნიტურ ველში მოთავსებისას ყველა ნივთიერება მაგნიტდება, ანუ თვითონ ქმნის მაგნიტურ ველს, მაგრამ მუდმივი მაგნიტის დამზადება ყველა ნივთიერებისაგან შესაძლებელი არ არის. მაგნიტური ველის ინდუქცია რაიმე გარემოში განსხვავდება იმავე ველის ინდუქციისაგან ვაკუუმში. ეს ნიშნავს, რომ მაგნიტური ურთიერთქმედება დამოკიდებულია გარემოს თვისებებზე.

 ჩავატაროთ ცდა: დიდი კოჭას მახლობლად მოქნილ მავთულებზე პატარა კოჭა დავკიდოთ (სურ. 1.70). თუ ორივე კოჭაში დენს გავატარებთ, შევამჩნევთ, რომ პატარა კოჭა ვერტიკალური მდგომარეობიდან გადაიხრება. თუ დიდ კოჭაში რკინის გულარს შევიტანთ პატარა კოჭას გადახრა შესამჩნევად გაიზრდება. ამპერის ძალის ზრდა იმაზე მიუთითებს, რომ გულარის შეტანით დიდი კოჭას მაგნიტური ველის ინდუქცია გაიზარდა. ამ დასკვნის მართებულობაში დავრწმუნდებით, თუ გამტარს რკინის ლურსმანს დავახვევთ და მასში დენს გავატარებთ, ლურსმანი პატარა რკინის სხეულების მიზიდვას დაიწყებს (სურ. 1.71). სწორედ ამ პრინციპზე მუშაობს დიდ ელექტრომაგნიტები, რომლებიც ბევრ საწარმოში გამოიყენება (სურ. 1.72)



სურ. 1.70



სურ. 1.71



სურ. 1.72

ნივთიერებებს, რომლებიც საგრძნობლად აძლიერებენ მაგნიტურ ველს, ფერომაგნეტიკებს უწოდებენ. გარდა რკინისა, ფერომაგნეტიკებს მიეკუთვნება კობალტი, ნიკელი და ზოგიერთი შენადნობი.

ფიზიკურ სიდიდეს, რომელიც გვიჩვენებს, თუ რამდენჯერ განსხვავდება ნივთიერებაში მაგნიტური ინდუქციის \vec{B} ვექტორის მოდული, ვაკუუმში იმავე წყაროს მიერ შექმნილი მაგნიტური ინდუქციის \vec{B}_0 ვექტორის მოდულისაგან, ნივთიერების მაგნიტური შეღწევადობა ეწოდება. ამ სიდიდეს μ ასოთი აღნიშნავენ:

$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

ფერომაგნეტიკებისათვის მაგნიტური შეღწევადობის მნიშვნელობა მერყეობს რამდენიმე ათეულიდან რამდენიმე ათასეულამდე. ასევე უნდა აღინიშნოს, რომ ფერომაგნეტიკების მაგნიტური შეღწევადობა მუდმივი არ არის – ის დამოკიდებულია იმ ველის

ბინდუქციაზე, რომელმაც დამაგნიტება გამოიწვია. გარდა ამისა, ფერომაგნეტიკის დამაგნიტება ნივთიერების წინა დამაგნიტებაზეა დამოკიდებული. ამ მოვლენას **ჰისტერეზისი** ეწოდება („ჰისტერეზისი“ დაგვიანებას ნიშნავს).

თუ პარაგრაფის დასაწყისში აღწერილ ცდაში დიდ კოჭაში რკინის გულარის ნაცვლად სპილენძის, ალუმინის, ფაიფურის ან ხის გულარებს შევიტანთ, პატარა კოჭას გადახრა თითქმის არ შეიცვლება. ზუსტი ხელსაწყოების გამოყენებით შეგვიძლია დავადგინოთ, რომ ყველა ნივთიერება მეტ-ნაკლებად მაგნიტდება. არაფერომაგნეტიკური ნივთიერებები იყოფა ორ ჯგუფად: პარამაგნეტიკებად და დიამაგნეტიკებად.

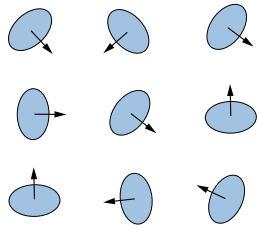
პარამაგნეტიკებს იმ ნივთიერებებს უწოდებენ, რომლებიც სუსტად მაგნიტდებიან გარე მაგნიტური ველის ინდუქციის მიმართულებით. მაგალითად, ყველაზე ძლიერი პარამაგნეტიკების – თხევადი ფანგბადის და პლატინის მაგნიტური შეღწევადობა, შესაბამისად, 1,0034 და 1,00036-ია.

დიამაგნეტიკებს კი იმ ნივთიერებებს უწოდებენ, რომლებიც სუსტად მაგნიტდებიან გარე მაგნიტური ველის ინდუქციის საწინააღმდეგო მიმართულებით, ანუ ისინი გარე მაგნიტურ ველს ასუსტებენ. დიამაგნეტიკებია ვერცხლი, ტყვია, კვარცი, აირების უმეტესობა და სხვა. ყველაზე ძლიერი დიამაგნეტიკის, ბისმუტის მაგნიტური შეღწევადობაა 0,999824.

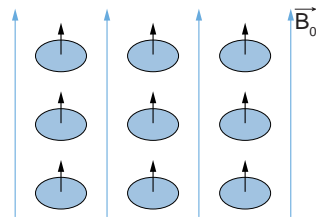
როგორ შეიძლება ავხსნათ ნივთიერებების მაგნიტური თვისებები? რატომ მაგნიტდება და განმაგნიტდება სხეულები? სიმარტივისათვის მივიჩნიოთ, რომ ატომებში ელექტრონები წრიულ ორბიტაზე მოძრაობენ და, შესაბამისად, წრიულ ელექტრულ დენებს ქმნიან. თითოეული ელექტრონის ბრუნვა (წრიული დენი) წარმოქმნის მაგნიტურ ველს, რომელსაც **ორბიტალურს** უწოდებენ. გარდა ამისა, ყოველი ელექტრონი „ბრუნავს“ საკუთარი ღერძის გარშემო, ანუ ქმნის საკუთარ მაგნიტურ ველს, რომელსაც **სპინურს** უწოდებენ (spin – ბრუნვა).

დიამაგნეტიკების ატომებში ელექტრონების მაგნიტური ველები ერთმანეთს აკომპენსირებს, ანუ ამ ნივთიერებებში ატომებს საკუთარი მაგნიტური ველი არ აქვთ. გარე მაგნიტურ ველში მოთავსებისას კი ელექტრონების მოძრაობა ისე იცვლება, რომ მის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველი გარე ველის საწინააღმდეგოდ არის მიმართული. ამ მიზეზით, დიამაგნეტიზმი ახასიათებს ყველა ნივთიერებას.

სხვა ნივთიერებების ატომებში ელექტრონების მაგნიტური ველები ერთმანეთს ბოლომდე არ აკომპენსირებს. შესაბამისად, ატომი შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ, როგორც პატარა მაგნიტი. როდესაც გარე მაგნიტური ველი არ გვაქვს, ყველა ეს პატარა „მაგნიტი“ თავისუფლადაა ორიენტირებული და მათი ჯამური მაგნიტური ინდუქცია ნულის ტოლია (სურ. 1.75). ასეთი ნივთიერებას გარე მაგნიტურ ველში თუ მოვათავსებთ, ყველა პატარა „მაგნიტი“ ორიენტირდება როგორც მაგნიტური ისარი. კერძოდ, ატომების ორბიტალური მაგნიტური ველების ინდუქციის ვექტორები გარე მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის მიმართულებით ორიენტირდებიან. შედეგად, გარე მაგნიტური ველი ძლიერდება (სურ. 1.76). ასეთი ნივთიერებები პარამაგნეტიკებია. აღსანიშნავია, რომ ატომების მაგნიტური ველების მთლიანი ორიენტაცია შესაძლებელია მხოლოდ აბსოლუტური ნულის მახლობელ ტემპერატურაზე.



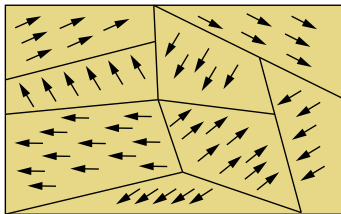
სურ. 1.75



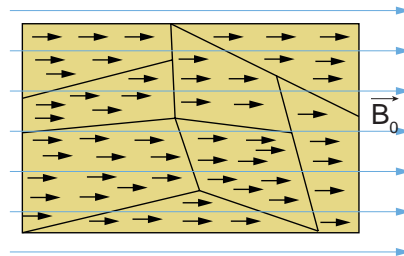
სურ. 1.76

ატომში ყველა ელექტრონს საკუთარი სპინური მაგნიტური ველი აქვს. თითქმის ყველა ნივთიერების ატომებში ელექტრონების სპინები წყვილებად ანტიპარალელურია და, შესაბამისად, მათი სპინური მაგნიტური ველები კომპენსირებულია. მხოლოდ ზოგიერთი ნივთიერების, მაგალითად, რკინის კრისტალებში იქმნება ელექტრონების სპინების პარალელურობის და, შესაბამისად, სპინური მაგნიტური ველების შეკრების პირობები. ასეთი კრისტალების შიგნით წარმოიქმნება 10^{-4} - 10^{-2} სმ ზომის დამაგნიტებული უბნები. ეს ნივთიერებები ფერომაგნეტიკებია. თავისთავად დამაგნიტებულ უბნებს **დომენებს** უწოდებენ (სურ. 1.77).

სხვადასხვა დომენებში მაგნიტური ინდუქციის ვექტორებს განსხვავებული მიმართულება აქვს, ამიტომ დიდ კრისტალში მათი ველები ერთმანეთს აკომპენსირებს. ფერომაგნეტიკის გარე მაგნიტურ ველში შეტანისას, გაიზრდება იმ დომენების რაოდენობა, რომელთა მაგნიტური ინდუქციის ვექტორებს ერთი მიმართულება ექნება. როდესაც გარე ველის ინდუქცია გარკვეულ $B_0 \geq B_{0s}$ მნიშვნელობას მიაღწევს, ერთი მიმართულებით დომენების მაქსიმალური რაოდენობა იქნება ორიენტირებული და ფერომაგნეტიკში მაგნიტური ველის ინდუქცია აღარ გაიზრდება – დამყარდება მაგნიტური ნაჯერობა (სურ. 1.78). მაგნიტური ველიდან ფერომაგნეტიკის გამოტანის შემდეგ დომენთა დიდი ნაწილი ერთნაირ ორიენტაციას და, შესაბამისად, ნარჩენ დამაგნიტებას ინარჩუნებს.



სურ. 1.77



სურ. 1.78

დომენთა მონესრიგებული ორიენტაცია შეიძლება დარღვეულ იქნას კრისტალში ატომების სითბური რხევის ენერჯის ხარჯზე. რაც უფრო მაღალია ტემპერატურა, მით უფრო ჩქარა ირღვევა წესრიგი დომენთა ორიენტაციაში.

ტემპერატურას, რომლის ზევით ნივთიერება კარგავს თავის ფერომაგნეტიკურ თვისებებს და პარამაგნეტიკად გადაიქცევა, კიურის ტემპერატურა ეწოდება.

რკინისათვის კიურის ტემპერატურაა 770°C , ნიკელისათვის – 356°C , ხოლო კობალტისათვის – 1130°C .

ფერომაგნეტიკმა თავისი თვისებები შეიძლება მექანიკური ზემოქმედებით, მაგალითად, ძლიერი დაქნევითაც დაკარგოს.

დასკვნები:

- ნივთიერებებს, რომლებიც საგრძნობლად აძლიერებენ მაგნიტურ ველს, ფერომაგნეტიკებს უწოდებენ;
- ფიზიკურ სიდიდეს, რომელიც გვიჩვენებს, თუ რამდენჯერ განსხვავდება ნივთიერებაში მაგნიტური ინდუქციის \vec{B} ვექტორის მოდული ვაკუუმში მაგნიტური ინდუქციის \vec{B}_0 ვექტორის მოდულისაგან, ნივთიერების მაგნიტური შეღწევადობა ეწოდება: $\mu = \frac{B}{B_0}$;
- ნივთიერებებს, რომლებიც სუსტად მაგნიტდებიან გარე მაგნიტური ველის ინდუქციის მიმართულებით, პარამაგნეტიკებს უწოდებენ;
- ნივთიერებებს, რომლებიც სუსტად მაგნიტდებიან გარე მაგნიტური ველის ინდუქციის საწინააღმდეგო მიმართულებით, დიამაგნეტიკებს უწოდებენ;
- ტემპერატურას, რომლის ზევით ნივთიერება კარგავს თავის ფერომაგნეტიკურ თვისებებს და პარამაგნეტიკად გადაიქცევა, კიურის ტემპერატურა ეწოდება.

საკონტროლო კითხვები:

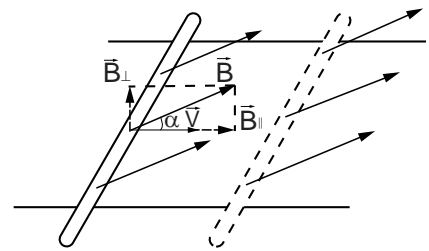
1. რა მოვლენაა ჰისტერეზისი?
2. რა ქმნის ატომის ორბიტალურ მაგნიტურ ველს? სპინურს?
3. რას უწოდებენ დომენს?

§ 1.11 ელექტრომამოძრავებელი ძალის აღძვრა მაგნიტურ ველში მოძრავ გამტარში

თქვენ უკვე იცით, რომ ელექტროსტატიკურ ველს უძრავი ელექტრული მუხტი ქმნის, მაგნიტურ ველს კი – დენი, ანუ მოძრავი მუხტი. უძრავი მუხტები თავის გარემომცველ სივრცეში ქმნიან ელექტროსტატიკურ ველს, რომელიც მოქმედებს სხვა მუხტებზე. შედეგად, მუხტებს შორის კულონური ურთიერთქმედების ძალა წარმოიქმნება. მოძრავი მუხტები (ელექტრული დენები) კი თავის გარშემო ქმნიან მაგნიტურ ველს, რომელიც მოქმედებს სხვა დენებზე (მოძრავ მუხტებზე). ელექტრული ველი მოქმედებს როგორც უძრავ, ასევე მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკებზე. მისგან განსხვავებით, მაგნიტური ველი მხოლოდ მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკებზე მოქმედებს.

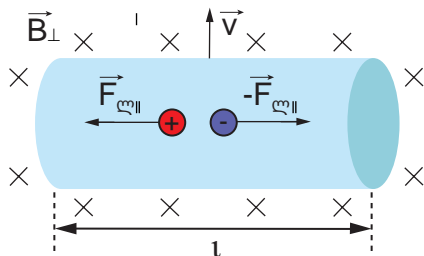
ელექტრული დენის აღმძვრელი ელექტრული ველის ცვლილება, წარმოქმნის მაგნიტურ ველს. ბუნებრივად იბადება კითხვა: შეუძლია მაგნიტურ ველს ისე გადაანაწილოს მუხტები, რომ ელექტრული ველი აღძვრას?

ვთქვათ, გამტარი \vec{V} სიჩქარით მოძრაობს მაგნიტურ ველში, რომლის ინდუქციის ვექტორი გამტარის მართობულია და სიჩქარის ვექტორთან α კუთხეს ადგენს (სურ. 1.79). გამტართან ერთად გადაადგილდებიან მასში არსებული დადებითად და უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკები. მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორი დავშალოთ ორ მდგენელად: გამტარის სიჩქარის გასწვრივ და მის მართობულ მდგენელად. სიჩქარის გასწვრივ მიმართული მდგენელი მუხტებზე არ იმოქმედებს, ხოლო მართობული B_{\perp} მდგენელი იმოქმედებს ლორენცის ძალით.

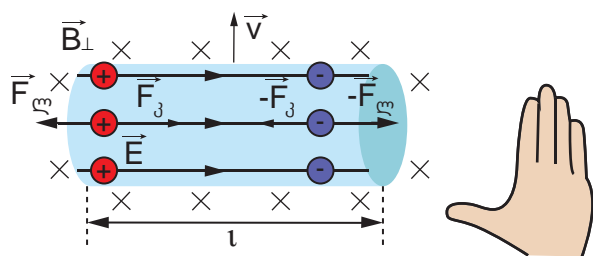


სურ. 1.79

მარცხენა ხელის წესის თანახმად, დადებით და უარყოფით მუხტებზე მოქმედი ლორენცის ძალების გამტარის გასწვრივ მდგენელს (\vec{F}_{\parallel} და $-\vec{F}_{\parallel}$) ურთიერთსაინანაღმდეგო მიმართულება აქვს (სურ. 1.80 ა). ამ ძალების მოქმედებით ლითონის გამტარში თავისუფალი ელექტრონები მისი ერთი ბოლოსაკენ წაინაცვლებენ, რის გამოც გამტარის მეორე ბოლოსთან დადებითი მუხტის სიჭარბე შეიქმნება (სურ. 1.80 ბ).



სურ. 1.80 ა



სურ. 1.80 ბ

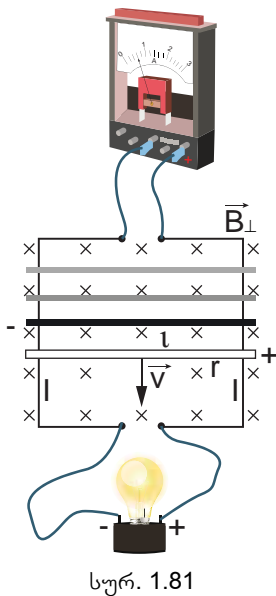
მუხტების ასეთ განცალკევებას მათ შორის მოქმედი კულონური მიზიდვის ძალა ეწინააღმდეგება. გამტარში აღძვრული ელექტრული ველის \vec{E} დაძაბულობა დადებითად დამუხტული ბოლოდან უარყოფითად დამუხტული ბოლოსკენაა მიმართული. მუხტების შემდგომი განცალკევება მაშინ შეწყდება, როდესაც კულონური ძალა მოდულით ლორენცის ძალას გაუტოლდება:

$$F_{\perp} = F_{\parallel}$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $F_{\perp} = qE$, $F_{\parallel} = qvB_{\perp}$ და $B_{\perp} = B \sin \alpha$, მივიღებთ:

$$E = vB \sin \alpha.$$

ელექტრული ველის ამ დაძაბულობას, გამტარის ბოლოებს შორის გარკვეული პოტენციალთა სხვაობა შეესაბამება. U სიგრძის გამტარისათვის ეს პოტენციალთა სხვაობა ტოლი იქნება:



$$U = El = vBl\sin\alpha.$$

თუ ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ნათურასთან შეერთებულ ორ პარალელურ გამტარს მოვათავსებთ და მათზე ლითონის ღეროს ერთი მიმართულებით თანაბრად ვასრიალებთ, მივიღებთ მუდმივი დენის უმარტივეს გენერატორს – მუდმივი დენის წყაროს (სურ. 1.81). მასში გარე ძალას, რომელიც გამტარში დამუხტულ ნაწილაკებს განაცალკევებს, ლორენცის ძალა წარმოადგენს. ამ დენის წყაროს ემძ ტოლი იქნება:

$$\varepsilon = vBl\sin\alpha.$$

ამ გამტარებთან მიერთებული ვოლტმეტრი საგრძნობ პოტენციალთა სხვაობას მხოლოდ ძლიერი მაგნიტური ველის შემთხვევაში აჩვენებს. ფორმულიდან ჩანს, რომ აღძრული ემძ გამტარის სიჩქარის პროპორციულია და მოცემულ პირობებში მაქსიმალურ მნიშვნელობას მაშინ იღებს, როდესაც გამტარის სიჩქარე მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მართობულია.

ომის კანონი სრული წრედისათვის, ამ შემთხვევაში შემდეგ სახეს მიიღებს:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} = \frac{vBl\sin\alpha}{R + r},$$

რომელშიც I ნათურაში გამავალი დენის ძალაა, R ნათურას წინააღობაა, ხოლო r – ლითონის ღეროსა და მიმყვანი სადენების წინააღობა.

ამრიგად, **მაგნიტურ ველს შეუძლია გამტარში მუხტები ისე გადაანაწილოს, რომ ელექტრული ველი აღიძრას.**

დასკვნები:

- მაგნიტურ ველში მოძრავ გამტარში, დადებითი და უარყოფითი მუხტები ლორენცის ძალის მოქმედებით განცალკევდებიან;
- მაგნიტური ველის მოქმედებით დადებითი და უარყოფითი მუხტების განცალკევება გამტარში, ელექტრულ ველს აღძრავს.

საკონტროლო კითხვები:

1. რატომ განაცალკევებს მაგნიტურ ველში მოძრავ გამტარში ლორენცის ძალა დადებით და უარყოფით მუხტებს?
2. როგორ უნდა ავამოძრავოთ გამტარი მაგნიტურ ველში, რომ მასში ემძ არ აღიძვრას?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

თვითმფრინავი მიფრინავს ჰორიზონტალურად 1080 კმ/სთ მუდმივი სიჩქარით დედამიწის მაგნიტურ ველში, რომლის მაგნიტური ველის ინდუქციის ვერტიკალური მდგენელი $3 \cdot 10^{-5}$ ტესლას ტოლია. ტვითმფრინავის ფრთების განაპირა წერტილებს შორის მანძილი 12 მ-ია. განსაზღვრეთ ამ წერტილებს შორის აღძრული პოტენციალთა სხვაობა. მიიჩნიეთ, რომ ფრთების კიდურა ნაპირებს შორის ელექტრული ველი ერთგვაროვანია და იპოვეთ მისი მნიშვნელობა.

ამოხსნა: თვითმფრინავის კორპუსი გამტარია, რომელიც დედამიწის მაგნიტურ ველში მოძრაობს, ამიტომ ფრთების განაპირა წერტილებს შორის პოტენციალთა

სხვაობის დასადგენად ვისარგებლოთ ფორმულით: $U=Bvl\sin\alpha$. ნამრავლი $B\sin\alpha$ სწორედ დედამიწის მაგნიტური ინდუქციის ვერტიკალური მდგენელია, ამიტომ გვქვია: $U = 3 \cdot 10^{-5} \cdot 90 \cdot 12 = 0,0324$ (ვ). ელექტრული ველის დაძაბულობა კი ვიპოვოთ ფორმულით:

$$E = \frac{U}{l} = 0,0027 \text{ ვ/მ.}$$



ამოხსენით ამოცანები:

1. განცალკევდება თუ არა გამტარში დადებითი და უარყოფითი მუხტები ერთმანეთისაგან, როდესაც მას მაგნიტური ინდუქციის წირების გასწვრივ ვამოძრავებთ? პასუხი დაასაბუთეთ.

2. სურ. 1.82-ზე გამოსახულია ერთგვაროვანი მაგნიტური ველი, რომელიც ნახაზის სიბრტყის მართობულია და სიბრტყიდან ჩვენკენაა მიმართული. მასში AC გამტარს ვამოძრავებთ ისე, როგორც სურათზეა ნაჩვენები. დაადგინეთ გამტარის ბოლოებზე დაგროვილი მუხტის ნიშნები.

3. როგორ უნდა ვამოძრაოთ გამტარი ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში, რომ მის ბოლოებს შორის მუდმივი პოტენციალთა სხვაობა გვქონდეს? პასუხი დაასაბუთეთ.

4. $B=0,03$ ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მისი წირების მართობულად $v=10$ მ/წმ სიჩქარით მოძრაობს გამტარი ღერო. იპოვეთ ღეროში აღძრული ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული.

5. რა სიჩქარით უნდა იმოძრაოს გამტარმა $B=0,4$ ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში წირებისადმი 30° -იანი კუთხით, რომ მასში 2 ვ/მ დაძაბულობის ელექტრული ველი შეიქმნას?

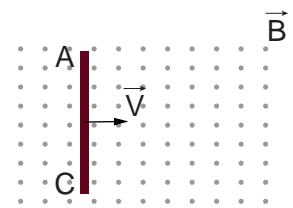
6. 1 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში, ინდუქციის წირების მართობულად, მუდმივი 5 მ/წმ სიჩქარით მოძრაობს 1 მ სიგრძის გამტარი (სურ. 1.83). იპოვეთ გამტარის ბოლოებს შორის აღძრული პოტენციალთა სხვაობა.

7. თვითმფრინავი 540 კმ/სთ სიჩქარით ჰორიზონტალურად მიფრინავს. განსაზღვრეთ დედამიწის მაგნიტური ველის ინდუქციის ვერტიკალური მდგენელი ამ ადგილზე, თუ ფრთების ბოლოებს შორის აღძრული პოტენციალთა სხვაობა 0,05 ვ-ია, ფრთების კიდურა წერტილებს შორის მანძილი კი – 10 მ.

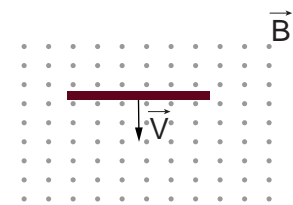
8. 0,25 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში, მოდულით 4 მ/წმ სიჩქარით მოძრაობს 75 სმ სიგრძის მქონე გამტარი. იპოვეთ კუთხე გამტარის სიჩქარესა და ინდუქციის ვექტორს შორის, თუ გამტარში აღძრული ემ ძალა 0,24 ვ-ის ტოლია.

9. B ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში, წირებისადმი α კუთხით და მოდულით v სიჩქარით მოძრაობს l სიგრძის გამტარი ღერო. იპოვეთ გარე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობა გამტარში q მუხტის გადანაწილებაზე.

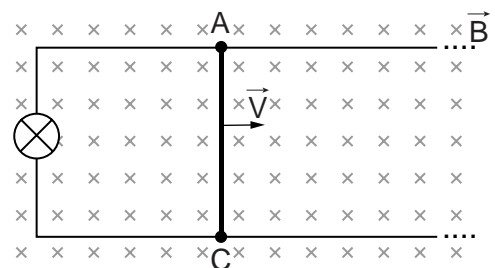
10. $r=0,5$ ომი წინალობისა და $l=1,2$ მ სიგრძის AC გამტარი, რომელიც $R=2$ ომი წინალობის ნათურასთანაა მიერთებული, მოთავსებულია $B=0,18$ ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში. მაგნიტური ინდუქციის წირები სურათის სიბრტყის მართობულია (სურ. 1.84). გამოთვალეთ დენის ძალა ნათურაში, როდესაც გამტარს ავამოძრავებთ ინდუქციის წირების მართობულად, მუდმივი $v=6$ მ/წმ სიჩქარით.



სურ. 1.82



სურ. 1.83




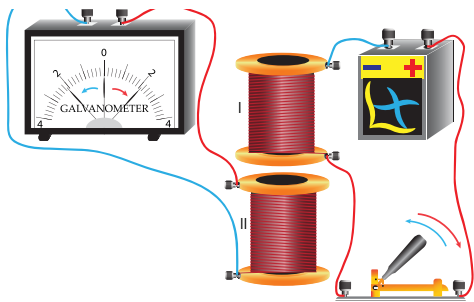
სურ. 1.84

§ 1.12 ელექტრომაგნიტური ინდუქცია

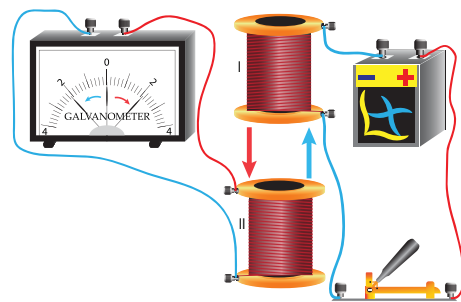
წინა პარაგრაფში ვნახეთ, რომ მაგნიტურმა ველმა მოძრავ გამტარში ელექტრული ველი აღძრა და ავხსენით კიდეც ამის მიზეზი. ისმის კითხვა: ზოგადად რა პირობებში წარმოქმნის მაგნიტური ველი ელექტრულ ველს?

1831 წელს გამოჩენილმა ინგლისელმა ფიზიკოსმა მაიკლ ფარადეიმ, ცდების შედეგებზე დაყრდნობით, დაამყარა კავშირი მაგნიტურ და ელექტრულ ველებს შორის. ამ ცდებში მიმდინარე ფიზიკურ მოვლენებს მან **ელექტრომაგნიტური ინდუქცია** უწოდა.

 ჩავატაროთ ცდები, რომლებიც ფარადეის მიერ ჩატარებული ცდების მსგავსია. ავიღოთ სპილენძის მავთულისაგან დახვეული ორი კოჭა. ერთი მათგანი შევავერთოთ დენის წყაროსთან, მეორე კი – გალვანომეტრთან და განვათავსოთ პირველი კოჭას ქვევით ისე, რომ პირველი კოჭას მაგნიტური ველის ძალნირებმა მეორე კოჭას ხვეულები განსჭვალოს. ამ შემთხვევაში კოჭას გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის ნირები მასში დენს არ წარმოქმნის. გამოვრთოთ პირველი კოჭა დენის წყაროდან. ცდა გვიჩვენებს, რომ ამ დროს მეორე კოჭაში დროის მცირე შუალედში ელექტრული დენი გაივლის – გალვანომეტრის ისარი მცირე ხნით გადაიხრება (სურ. 1.85, ცისფერი ისარი). თუ ჩამრთველით პირველი კოჭას წრედს კვლავ შევკრავთ, დავინახავთ, რომ მეორე კოჭაში ისევ გაივლის ხანმოკლე დენი, რომელსაც პირველ შემთხვევაში აღძრული დენის საპირისპირო მიმართულება ექნება (სურ. 1.85, წითელი ისარი).

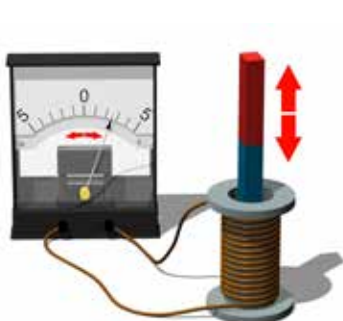


სურ. 1.85

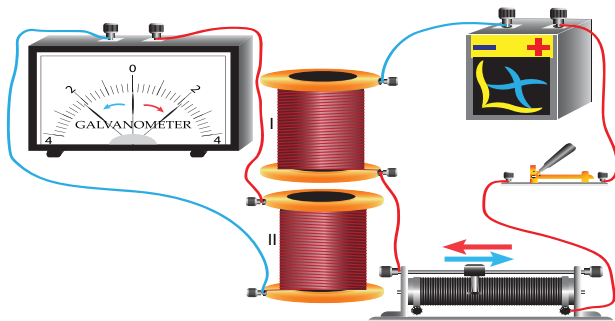


სურ. 1.86

პირველი კოჭა დენის წყაროდან არ გამოვრთოთ და მეორის მიმართ ავამოძრავოთ. პირველი კოჭას ყოველი გადაადგილებისას გალვანომეტრი მეორე კოჭაში დენის წარმოქმნას დააფიქსირებს. კერძოდ, კოჭების მიახლოებისას ერთი მიმართულების დენი აღიძვრება (სურ. 1.86, წითელი ისარი), დაშორებისას კი – მისი საწინააღმდეგო მიმართულების (სურ. 1.86, ცისფერი ისარი). მეორე კოჭაში დენი მაშინაც აღიძვრება, როდესაც მის მიმართ მუდმივ მაგნიტს ავამოძრავებთ (სურ. 1.87). ამასთან, აღძრული დენის ძალა მით მეტია, რაც მეტია მაგნიტის მოძრაობის სიჩქარე კოჭას მიმართ.



სურ. 1.87



სურ. 1.88

თუ პირველ კოჭასთან მიმდევრობით ჩავრთავთ რეოსტატს და ცოცხას გადაადგილებით მასში დენის ძალას შევცვლით, გალვანომეტრი მეორე კოჭაში ელექტრული დენის წარმოქმნას ისევ დააფიქსირებს (სურ. 1.88). პირველ კოჭაში გამავალი დენის ძალის ცვლილება, მის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველის ცვლილებას ნიშნავს.

ოთხივე განხილულ ცდაში, გალვანომეტრთან მიერთებულ კოჭაში დენი მხოლოდ მაშინ აღიძვრება, როდესაც ის ცვლად მაგნიტურ ველშია მოთავსებული.

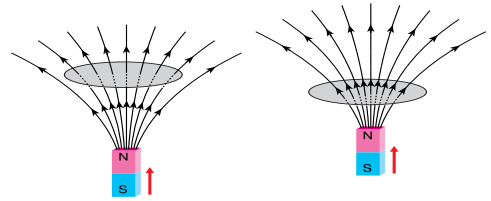
მაგნიტური ველით წარმოქმნილ დენს ფარადეიმ **ინდუქციური დენი** უწოდა.

თუ პირველ კოჭას 90° -ით მოვაბრუნებთ, მასში დენის ჩართვა-გამორთვისას, მეორე კოჭაში დენი არ აღიძვრება. ასევე არ აღიძვრება დენი კოჭაში, თუ მუდმივ მაგნიტს მის თავზე ჰორიზონტალურ სიბრტყეში ვამოძრავებთ. ამ შემთხვევებში კოჭას ხვეიბს მაგნიტური ინდუქციის წირები არ განსჭვალავს.

სურ. 1.89-დან ჩანს, რომ მაგნიტის კონტურთან (ხვიასთან) მიახლოებისას, მისი ხვიის გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის წირების რიცხვი იზრდება, დაშორებისას კი – მცირდება.

ჩატარებული ცდების ანალიზით, ფარადეიმ დაადგინა:

ჩაკეტილ გამტარ კონტურში ინდუქციური დენი მაშინ წარმოიქმნება, როდესაც იცვლება ამ კონტურით შემოსაზღვრული ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის წირების რიცხვი. ამასთან, რაც უფრო სწრაფია ეს ცვლილება, მით მეტია წარმოქმნილი ინდუქციური დენის ძალა.



სურ. 1.89

დასკვნები:

- მაგნიტური ველით წარმოქმნილ დენს ინდუქციური დენი ეწოდება;
- ჩაკეტილ გამტარ კონტურში ინდუქციური დენი მაშინ წარმოიქმნება, როდესაც იცვლება ამ კონტურით შემოსაზღვრული ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის წირების რიცხვი. ამასთან, რაც უფრო სწრაფია ეს ცვლილება, მით მეტია წარმოქმნილი ინდუქციური დენის ძალა.

საკონტროლო კითხვები:

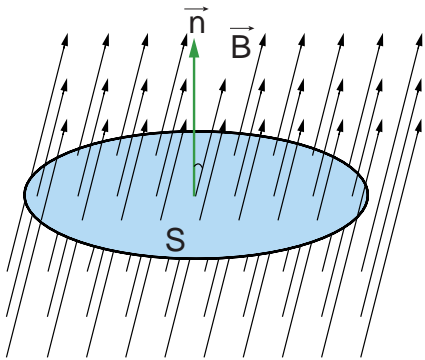
1. აღიძვრება თუ არა მეორე კოჭაში დენი, თუ დენის წყაროსთან მიერთებული კოჭა მის მიმართ არ მოძრაობს?
2. როგორ უნდა ვამოძრავოთ მუდმივი მაგნიტი კოჭას მიმართ, რომ მასში დენი არ აღიძვრას?
3. აღიძვრება თუ არა დენი კოჭაში, თუ მას უძრავ მაგნიტს დავუახლოვებთ?



<http://tiny.cc/mm87vz>

§ 1.13 მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი

როგორც წინა პარაგრაფში დავასკვნით, ჩაკეტილ გამტარ კონტურში ინდუქციური დენი მაშინ წარმოიქმნება, როდესაც იცვლება ამ კონტურით შემოსაზღვრული ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის წირების რიცხვი. ისმის კითხვა: რა სიდიდით შეიძლება დავახასიათოთ რაიმე ფართობში გამავალი მაგნიტური ინდუქციის ძალწირების რაოდენობა? ცხადია, ამ რაოდენობას მხოლოდ მაგნიტური ინდუქციის \vec{B} ვექტორით ვერ დავადგენთ, რადგან ის მაგნიტური ველის მოქმედებას მხოლოდ მის ერთ მოცემულ ნერტილში ახასიათებს. ამიტომ, ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენის ზუსტი რაოდენობრივი აღწერისათვის საჭიროა ისეთი ფიზიკური სიდიდის შემოტანა, რომელიც დამოკიდებული იქნება \vec{B} ვექტორის მნიშვნელობაზე ბრტყელი ჩაკეტილი კონტურით შემოსაზღვრულ მთელ ზედაპირზე. ამ სიდიდეს **მაგნიტური ინდუქციის ნაკადს** უწოდებენ.



სურ. 1.90

ვთქვათ, ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოთავსებულია ბრტყელი ჩაკეტილი კონტური, რომელიც რაიმე S ფართობის მქონე ზედაპირს შემოსაზღვრავს (სურ. 1.90). დავუშვათ, მაგნიტური ინდუქციის \vec{B} ვექტორი ზედაპირის \vec{n} ნორმალთან α კუთხეს ადგენს. ზედაპირის \vec{n} ნორმალი არის მისი მართობული ერთეულოვანი ვექტორი, რომლის მიმართულება ემთხვევა მარჯვენა ხელის გაშლილი ცერა თითის მიმართულებას, როდესაც ოთხი მოხრილი თითი კონტურის არჩეულ შემოვლის მიმართულებას მიუთითებს.

S ფართობის ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის ნაკადი (მაგნიტური ნაკადი) ეწოდება სიდიდეს, რომელიც ტოლია მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდულის, S ფართობისა და \vec{B} და \vec{n} ვექტორებს შორის არსებული α კუთხის კოსინუსის ნამრავლის.

მაგნიტურ ნაკადს Φ ასოთი აღნიშნავენ. განმარტების თანახმად,

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $B_n = B \cos \alpha$ ნამრავლი მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის გეგმილია კონტურის სიბრტყის \vec{n} ნორმალზე, მაგნიტური ნაკადის ფორმულა ასეც ჩაიწერება:

$$\Phi = B_n S.$$

თვალსაჩინოებისათვის შეთანხმდნენ, რომ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორისადმი მართობულ ერთეულ ფართობში გავლებული ძალწირების რაოდენობა მაგნიტური ინდუქციის მოდულის პროპორციულია. ამ შემთხვევაში, მაგნიტური ნაკადი ვიზუალურად აღიქმება, როგორც S ფართობის გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის წირების რაოდენობის პროპორციული სიდიდე.



ვილჰელმ ედუარდ ვებერი 1804-1891

Φ სიდიდეს „მაგნიტური ნაკადი“ წყლის ნაკადის ანალოგიით დაარქვეს. როგორც იცით, ის მით მეტია, რაც მეტია მილის განივკვეთის ფართობი და მასში დინების სიჩქარე. ანალოგიურად მაგნიტური ნაკადი მით მეტია, რაც მეტია S და B_n .

S ფართობის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი მაქსიმალურია მაშინ, როდესაც α კუთხე 0° -ის ტოლია. ამ შემთხვევაში კონტურით შემოსაზღვრული ფართობი მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მართობულია. თუ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი კონტურით შემოსაზღვრული ფართობის პარალელურია ($\alpha = 90^\circ$), მაშინ მისი გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი ნულის ტოლია.

SI-ში მაგნიტური ინდუქციის ნაკადის ერთეულია **1 ვებერი**, ცნობილი გერმანელი ფიზიკოსის ვილჰელმ ვებერის პატივსაცემად.

1 ვებერი არის მაგნიტური ნაკადი, რომელსაც ქმნის 1 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვანი მაგნიტური ველი, ინდუქციის ვექტორის მართობულ 1 მ^2 ფართობში.

დასკვნები:

- S ფართობის ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის ნაკადი (მაგნიტური ნაკადი) ეწოდება სიდიდეს, რომელიც ტოლია მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდულის, S ფართობისა და \vec{B} და \vec{n} ვექტორებს შორის არსებული α კუთხის კოსინუსის ნამრავლის;
- მაგნიტური ინდუქციის ვექტორისადმი მართობულ ერთეულ ფართობში გავლებული ძალნირების რაოდენობა მაგნიტური ინდუქციის მოდულის პროპორციულია;
- 1 ვებერი არის მაგნიტური ნაკადი, რომელსაც ქმნის 1 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვანი მაგნიტური ველი, ინდუქციის ვექტორის მართობულ 1 მ^2 ფართობში.

საკონტროლო კითხვები:

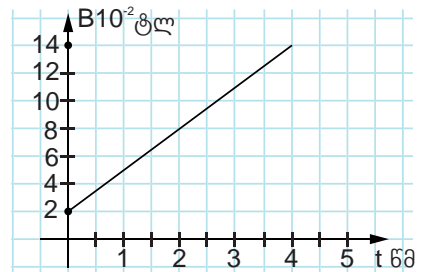
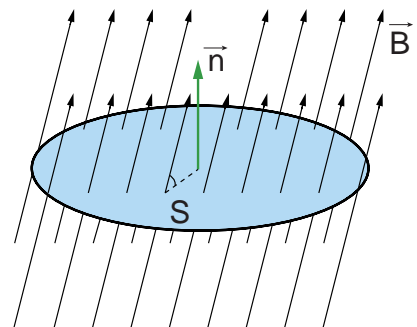
1. რა სიდიდეებზეა დამოკიდებული ფართობის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი?
2. რა შემთხვევაშია ფართობის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი მაქსიმალური? ნულის ტოლი?
3. როგორ დავადგინოთ ვიზუალურად, რომელ კონტურს გამსჭვალავს უფრო მეტი ნაკადი?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

20 სმ რადიუსის წრიული ფორმის ჩარჩო ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ისეა მოთავსებული, რომ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი ჩარჩოს სიბრტყესთან 30° -იან კუთხეს ქმნის. დანერეთ ჩარჩოს გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის დროზე დამოკიდებულების $\Phi(t)$ ფორმულა, თუ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდული დროის მიხედვით ისე იცვლება, როგორც სურ. 1.91-ზე გამოსახულ გრაფიკზეა ნაჩვენები.

ამოხსნა: გარაფიკის მიხედვით ჯერ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდულის დროზე დამოკიდებულების გამოსახულება შევადგინოთ. გრაფიკიდან ჩანს, რომ ეს დამოკიდებულება წრფივია. ამასთან, როდესაც $t=0$, მაშინ $B_0=0,02$ ტლ და როდესაც $t=4$ წმ, მაშინ $B=0,14$ ტლ. ამ მონაცემებზე დაყრდნობით მივიღებთ: $B=0,02+0,03t$. მაგნიტური ნაკადისათვის გამოვიყენოთ ფორმულა $\Phi=BScos\alpha$, რომელშიც S ჩარჩოს ზედაპირის ფართობია, B მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდული, ხოლო α კუთხეა ზედაპირის ნორმალსა და ინდუქციის ვექტორს შორის, რომელიც 60° -ის ტოლია. ჩარჩოს ზედაპირის ფართობია $S=\pi r^2=1256 \text{ სმ}^2=0,1256 \text{ მ}^2$. ამ სიდიდეების მაგნიტური ნაკადის ფორმულაში ჩასმით მივიღებთ: $\Phi=(0,02+0,03t)\cdot 0,1256\cdot 0,5$ ვბ, ანუ $\Phi=1,256\cdot 10^{-3}+1,884\cdot 10^{-3}t$.



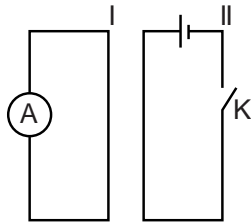
სურ. 1.91

პასუხი: ჩარჩოს გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი დროის მიხედვით იცვლება კანონით:
 $\Phi = 1,256 \cdot 10^{-3} + 1,884 \cdot 10^{-3}t$.

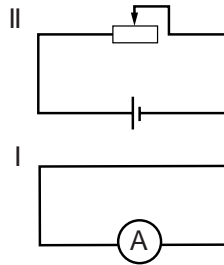


ამოხსენით ამოცანები:

1. აღიძვრება თუ არა ინდუქციური დენი პირველ კონტურში მაშინ, როდესაც მეორე კონტურის **K** ჩამრთველს ჩაერთავთ (სურ. 1.92)? პასუხი დაასაბუთეთ.
2. აღიძვრება თუ არა ინდუქციური დენი პირველ კონტურში მაშინ, როდესაც მეორე კონტურში რეოსტატის ცოცციას ავამოძრავებთ (სურ. 1.93)? პასუხი დაასაბუთეთ.



სურ. 1.92

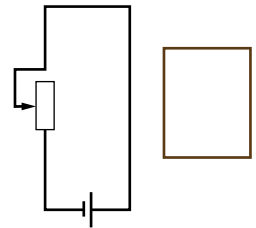


სურ. 1.93

3. აღიძვრება თუ არა გამტარ ჩარჩოში ინდუქციური დენი მაშინ, როდესაც ჩარჩო ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში გადატანით მოძრაობას ასრულებს? პასუხი დაასაბუთეთ.

4. როგორ შეიცვლება ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მბრუნავ გამტარ ჩარჩოში აღძრული ინდუქციური დენის ძალა, თუ ჩარჩოს ბრუნვის სიხშირეს გავზრდით? პასუხი დაასაბუთეთ.

5. როგორ შეიცვლება ჩარჩოს გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი გამტარში დენის გაზრდისას (სურ. 1.94)? დენიანი გამტარი ჩარჩოს სიბრტყეში მდებარეობს. პასუხი დაასაბუთეთ.



სურ. 1.94

6. გამოთვალეთ 20 სმ^2 ფართობის ბრტყელი კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი, თუ ინდუქციის ვექტორი კონტურის სიბრტყის მართობულია და მისი მოდული $0,55 \text{ ტესლა}$.

7. მართკუთხედის ფორმის გამტარი ჩარჩო, რომლის გვერდების ზომებია 12 სმ და 15 სმ , მოთავსებულია ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ისე, რომ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი ჩარჩოს სიბრტყესთან 30° -იან კუთხეს ქმნის. გამოთვალეთ ჩარჩოს გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი, თუ ინდუქციის ვექტორის მოდული $0,025 \text{ ტესლა}$.

8. გამოთვალეთ $r=10 \text{ სმ}$ რადიუსის წრიული გამტარი რგოლის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი, თუ $B=2,8 \cdot 10^{-2} \text{ ტლ}$ ინდუქციის ერთგვაროვანი მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორი რგოლის სიბრტყის ნორმალთან 45° -იან კუთხეს ადგენს.

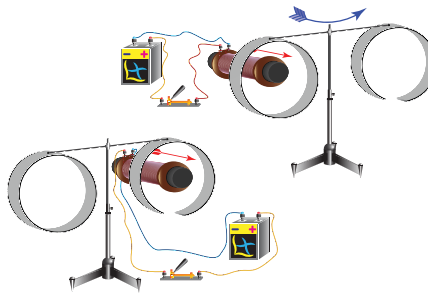
9. კვადრატის ფორმის გამტარი ჩარჩო, რომლის გვერდი 16 სმ -ია, მოთავსებულია $2 \cdot 10^{-3} \text{ ტლ}$ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ისე, რომ ინდუქციის ვექტორი ჩარჩოს სიბრტყის ნორმალთან 15° -იან კუთხეს ქმნის. რამდენით შეიცვლება ჩარჩოს გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი, თუ ჩარჩოს მაგნიტური ველიდან გამოვიტანთ?

10. წრიული ფორმის გამტარი ჩარჩო, რომლის რადიუსი 20 სმ -ია, მოთავსებულია ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ისე, რომ ინდუქციის ვექტორი ჩარჩოს სიბრტყესთან 73° -იან კუთხეს ქმნის. დაწერეთ ჩარჩოს გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის დროზე დამოკიდებულების ფორმულა, თუ მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის მოდული დროის მიხედვით $B=0,1+0,05t$ კანონით იცვლება. ფორმულაში შემავალი ყველა სიდიდეები **SI** ერთეულებშია მოცემული.

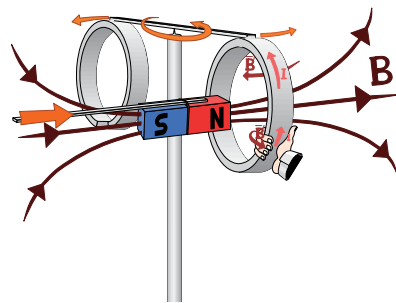
§ 1.14 ინდუქციური დენის მიმართულება. ლენცის წესი

ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენაზე დაკვირვებით, ჩვენ დავადგინეთ ჩაკეტილ გამტარ კონტურში ინდუქციური დენის აღძვრის პირობები. ისმის კითხვა: რა მიმართულება აქვს ინდუქციურ დენს?

ჩავატაროთ ცდა. ღეროს ბოლოებზე, რომელსაც ვერტიკალური ღერძის გარშემო თავისუფლად ბრუნვა შეუძლია, დავამაგროთ ორი გამტარი რგოლი (მაგალითად, ალუმინისაგან დამზადებული). ერთი რგოლი იყოს მთლიანი, მეორე კი – გაჭრილი (სურ. 1.95). თუ მაგნიტს ან ელექტრომაგნიტს მთლიან რგოლს მივუახლოებთ, დავინახავთ, რომ ის მაგნიტისგან განიზიდება და ღერო შემოტრიალდება. თუ მაგნიტს რგოლს დავაშორებთ, პირიქით – რგოლი მაგნიტისაკენ მიიზიდება. გაჭრილ რგოლთან მაგნიტის მიტანისას ან დაშორებისას, მათ შორის ურთიერთქმედებას ვერ შევამჩნევთ. ამის მიზეზი ისაა, რომ ჭრილი ხელს უშლის რგოლში ინდუქციური დენის წარმოქმნას. მაგნიტის მიერ რგოლის მიზიდვა ან განიზიდვა, მასში აღძრული ინდუქციური დენის მიმართულებაზე დამოკიდებულია. დენიანი რგოლი ორპულისიანი მაგნიტის მსგავსად იქცევა, ამიტომ განიზიდვა ნიშნავს, რომ რგოლისაკენ მიმართული მაგნიტის პოლუსი და მაგნიტისაკენ მიმართული რგოლის პოლუსი ერთსახეაა. შესაბამისად, მაგნიტის ინდუქციის ვექტორი და ინდუქციური დენის მიერ შექმნილი მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი საპირისპირო მიმართულებისაა (სურ. 1.96). მაგნიტისა და რგოლის მიზიდვა მათი დაშორებისას კი ნიშნავს, რომ ორივე მანიტური ინდუქციის ვექტორს ერთი მიმართულება აქვს. ინდუქციური დენის მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულების განსაზღვრის შემდეგ კი, მარჯვენა ხელის წესის გამოყენებით, უკვე ინდუქციური დენის მიმართულების დადგენასაც შევძლებთ. ინდუქციური დენის მიმართულების დადგენის წესი სურ. 1.96-ზეა ნაჩვენები.



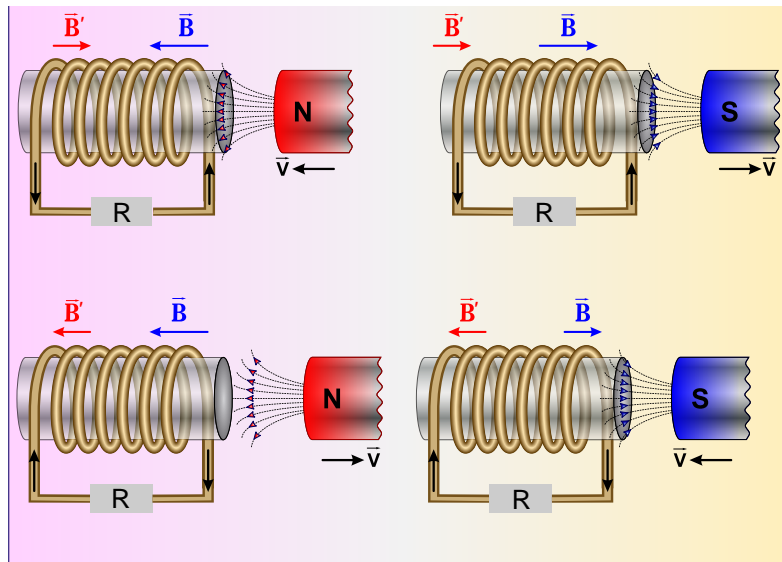
სურ. 1.95



სურ. 1.96

მაგნიტისა და კოჭას ურთიერთქმედება მათი დაახლოებისას ან დაშორებისას, შეიძლება ავხსნათ ენერგიის მუდმივობის კანონის გამოყენებითაც. მართლაც, მაგნიტის კოჭასთან მიახლოებისას, მასში აღძრული ინდუქციური დენის მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორი მაგნიტის ველის ინდუქციის ვექტორის საწინააღმდეგოდ არის მიმართული და მაგნიტი მუხრუჭდება. პირიქით რომ ყოფილიყო, ანუ კოჭას და მაგნიტს ერთმანეთი მიეზიდა, მაგნიტი თავისთავად, მზარდი სიჩქარით გააგრძელებდა კოჭასთან მიახლოებას. ეს კი კოჭას გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის უფრო სწრაფ ზრდას გამოიწვევდა, რაც თავის მხრივ გაზრდიდა ინდუქციურ დენს და, შესაბამისად, მაგნიტისა და კოჭას ერთმანეთის მიზიდვის ძალას. ამრიგად, გარე ძალების მუშაობის შესრულების გარეშე მივიღებდით მაგნიტის კინეტიკური ენერგიისა და კოჭაში დენის ძალის ზრდას, რაც ენერგიის მუდმივობის კანონს ეწინააღმდეგება.

გავიხსენოთ, რომ მაგნიტის კოჭასთან მიახლოებისას, კოჭას გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი იზრდება (სურ. 1.97 ა, დ), დაშორებისას კი – მცირდება (სურ. 1.97 ბ, გ). პირველ შემთხვევაში მაგნიტისა (\vec{B}) და აღძრული ინდუქციური დენის მაგნიტური ველის ინდუქციის (\vec{B}') ვექტორებს საპირისპირო მიმართულება აქვს, მეორე შემთხვევაში კი – ერთნაირი.



სურ. 1.97

ამრიგად, შეიძლება დავასკვნათ, რომ შეკრული გამტარი კონტურის (კოჭას) გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ზრდისას ($\Delta\Phi > 0$) კონტურში (კოჭაში) აღძრულ ინდუქციურ დენს ისეთი მიმართულება აქვს, რომ მის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველი ნაკადის ზრდას ეწინააღმდეგება. როდესაც შეკრული გამტარი კონტურის (კოჭას) გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი მცირდება ($\Delta\Phi < 0$), მაშინ ინდუქციური დენი ქმნის ისეთი მიმართულების მაგნიტურ ინდუქციას, რომელიც კონტურის (კოჭას) გამჭოლ მაგნიტურ ნაკადს აძლიერებს და ამით მის შემცირებას ეწინააღმდეგება.



ჰენრიხ ფრიდრიხ ემილ ლენცი (1804-1865)

ინდუქციური დენის მიმართულების პოვნის ზოგადი წესი ცნობილმა ფიზიკოსმა ემილ ლენცმა დაადგინა და ამიტომ **ლენცის წესის** სახელს ატარებს:

ჩაკეტილ კონტურში აღძრულ ინდუქციურ დენს ისეთი მიმართულება აქვს, რომ მის მიერ შექმნილი, კონტურით შემოსაზღვრული ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი ეწინააღმდეგება იმ მაგნიტური ნაკადის ცვლილებას, რომელმაც ეს ინდუქციური დენი აღძრა.



<http://tiny.cc/jm87vz>

დასკვნები:

- ჩაკეტილ კონტურში აღძრულ ინდუქციურ დენს ისეთი მიმართულება აქვს, რომ მის მიერ შექმნილი, კონტურით შემოსაზღვრული ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი ეწინააღმდეგება იმ მაგნიტური ნაკადის ცვლილებას, რომელმაც ეს ინდუქციური დენი აღძრა.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა შემთხვევაში მიიზიდავს მაგნიტს გამტარი რგოლი?
2. რატომ არ ურთიერთქმედებს მაგნიტი გაჭრილ რგოლთან?
3. რა მოხდებოდა, მაგნიტს და კოჭას დაშორებისას ერთმანეთი რომ განეზიდათ?

§ 1.15 ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი

როგორც იცით, შეკრულ გამტარ კონტურში ინდუქციური დენი მაშინ აღიძვრება, როდესაც კონტურით შემოსაზღვრული ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი იცვლება.



მე-10 კლასის ფიზიკის კურსიდან თქვენთვის ცნობილია, რომ წრედში ელექტრული დენის არსებობისთვის საჭიროა, თავისუფალ დამუხტულ ნაწილაკებზე გარეშე ძალებმა იმოქმედოს. ფიზიკურ სიდიდეს, რომელიც რიცხობრივად ჩაკეტილი კონტურის გასწვრივ ერთეული დადებითი მუხტის გადაადგილებაზე გარეშე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობის ტოლია, დენის წყაროს ელექტრომამოძრავებელი ძალა (ემძ) ვუწოდეთ.

გარეშე ძალები ასევე ჩნდება შეკრულ გამტარ კონტურში, როდესაც კონტურით შემოსაზღვრული ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი იცვლება. ამ ძალების მოქმედებას ახასიათებენ **ინდუქციის ემძ**-ით, რომელსაც \mathcal{E}_i სიმბოლოთი აღნიშნავენ.

თუ ომის კანონს სრული წრედისათვის შეკრული კონტურისათვის გამოვიყენებთ, შეგვიძლია დავწეროთ:

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$$

რომელშიც I_i კონტურში ინდუქციური დენის ძალაა, ხოლო R – მისი წინაღობა.

როგორც §1.12-ში ჩატარებულმა ცდებმა გვიჩვენა, კონტურში ინდუქციური დენის ძალა და, შესაბამისად, ინდუქციის ემ ძალაც დამოკიდებულია იმაზე, სწრაფად თუ ნელა ვცვლით მაგნიტურ ნაკადს. კერძოდ, რაც უფრო ნელა იცვლება მაგნიტური ნაკადი, მით უფრო მცირე ინდუქციის ემძ აღიძვრება კონტურში. შესაბამისად, წრედის მოცემული წინააღობის შემთხვევაში, მით მცირე იქნება ინდუქციური დენის ძალაც.

თუ დროის t_1 მომენტში შეკრული გამტარი კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის მნიშვნელობა იყო Φ_1 , ხოლო t_2 მომენტისთვის – Φ_2 , მაშინ $\Delta t = t_2 - t_1$ დროის შუალედში მაგნიტური ნაკადის ცვლილება ტოლი იქნება: $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$. შეფარდება $\Delta\Phi/\Delta t$ არის მაგნიტური ნაკადის ცვლილება დროის ერთეულში, ანუ მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სიჩქარე. სხვადასხვა პირობებში ჩატარებული ცდებისას მიღებული შედეგები, გვიჩვენებს, რომ ინდუქციის ემძ მხოლოდ მაგნიტური ინდუქციის ნაკადის ცვლილების სიჩქარეზე დამოკიდებული და მისი პროპორციულია.

ინდუქციის ემძ პროპორციულია კონტურით შემოსაზღვრული ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სიჩქარის. SI-ში პროპორციულობის კოეფიციენტი ერთის ტოლია, ამიტომ:

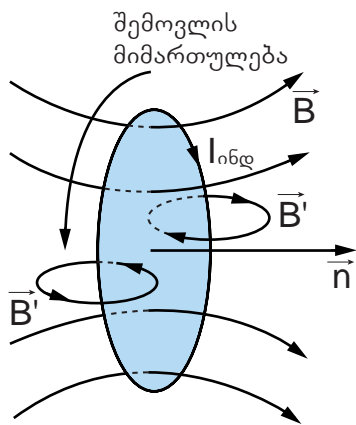
$$|\mathcal{E}_i| = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

ეს ტოლობა გამოსახავს ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონს.

თუ მაგნიტური ნაკადი დროის განმავლობაში არათანაბრად იცვლება, მაშინ $\Delta\Phi/\Delta t$ შეფარდება მაგნიტური ნაკადის ცვლილების საშუალო სიჩქარე იქნება, ხოლო \mathcal{E}_i – ინდუქციის ემძ-ის საშუალო მნიშვნელობა. როდესაც საჭიროა ინდუქციის ემძ-ის მყისიერი მნიშვნელობის გამოთვლა, მაშინ მაგნიტური ინდუქციის ცვლილება დროის ისეთ მცირე შუალედში უნდა განვიხილოთ, რომ ამ შუალედში მაგნიტური ინდუქციის ცვლილება თანაბრად მივიჩნიოთ.

ინდუქციის ემ ძალის გამომსახველი ფორმულა დაწერილია ერთი ხვიისგან შემდგარი კონტურისათვის. ზოგადად, როდესაც ინდუქციური კოჭა N ერთნაირი ხვიისაგან შედგება და ყოველი მათგანის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი ერთნაირად იცვლება, მაშინ ინდუქციის ემძ N -ჯერ მეტი იქნება, ვინაიდან კოჭას ხვიები ერთმანეთთან მიმდევრობითაა შეერთებული. მაშასადამე,

$$|\mathcal{E}_i| = N \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$



სურ. 1.98

როგორ გავითვალისწინოთ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონში ინდუქციური დენის მიმართულება?

სურ. 1.98-ზე გამოსახულ ჩაკეტილ კონტურში შემოვლის დადებით მიმართულებად საათის ისრის მოძრაობის სანინაალმდეგო მიმართულება ავირჩიოთ. ვთქვათ, კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ველის ინდუქციის \vec{B} ვექტორი მიმართულია ზედაპირის ნორმალის გასწვრივ და დროის განმავლობაში იზრდება, ანუ $\Phi > 0$ და $\Delta\Phi/\Delta t > 0$. ლენცის წესის თანახმად, ინდუქციური დენი ქმნის უარყოფით მაგნიტურ ნაკადს $\Phi' < 0$. შესაბამისად, ინდუქციურ I_i დენს საათის ისრის მოძრაობის მიმართულება ექნება და ამიტომ ინდუქციის ემდ უარყოფითია. აქედან გამომდინარე, ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონში ნიშანი მინუსი უნდა დავსვათ:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

მაგნიტური ნაკადის ერთეული ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონიდანაც შეიძლება განვმარტოთ: ჩაკეტილი გამტარი კონტურით შემოსაზღვრული ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი 1 ვებერის ტოლია, თუ 1 ნმ-ის განმავლობაში ამ ნაკადის ნულამდე თანაბრად შემცირებისას კონტურში 1 ვ ინდუქციის ემდ აღიძვრება.

§1.11-ში მივიღეთ ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოძრავ გამტარში აღძრული ინდუქციის ემ ძალის ფორმულა. ის შეიძლება ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის გამოყენებითაც მივიღოთ. თუ l სიგრძის გამტარი ჩარჩოზე v სიჩქარით მოძრაობს (იხ. სურ. §1.11), ის დროის Δt შუალედში $v \cdot \Delta t$ მანძილით გადაადგილდება, რაც ჩარჩოთი შემოსაზღვრულ ფართობს $v \cdot \Delta t \cdot l$ -ით შეცვლის. შესაბამისად, ჩარჩოს გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ცვლილების მოდული ტოლი იქნება: $|\Delta\Phi| = B_{\perp} v \cdot \Delta t \cdot l$. თუ ამ გამოსახულებას დროის Δt შუალედზე გავყოფთ, მივიღებთ: $|\mathcal{E}_i| = B_{\perp} v \cdot l$. ვინაიდან $B_{\perp} = B \sin\alpha$, ამიტომ:

$$|\mathcal{E}_i| = vBl \sin\alpha.$$

დასკვნები:

- შეკრული გამტარი კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ცვლილებისას, მასში გარეშე ძალები წარმოიქმნება, რომელთა მუშაობას ინდუქციის ემ ძალით ახასიათებენ;
- ინდუქციის ემდ მოდულით კონტურით შემოსაზღვრული ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სიჩქარის ტოლია: $|\mathcal{E}_i| = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$;
- \mathcal{E}_i -ს და $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ -ს სანინაალმდეგო ნიშნები აქვს: $\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

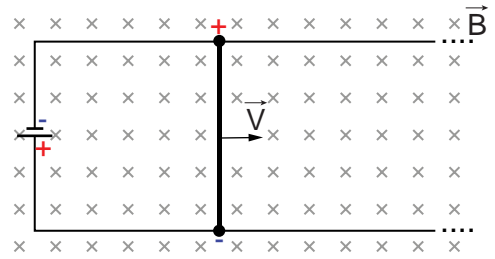
საკონტროლო კითხვები:

1. რატომ არის N ერთნაირი ხვიისაგან შემდგარ კონტურში ინდუქციის ემდ N -ჯერ მეტი, ვიდრე ერთი ხვიისაგან შემდგარ კონტურში?
2. როგორ განმარტავ მაგნიტური ნაკადის ერთეულს, 1 ვებერს, ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის გამოყენებით?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

9 ვ ემ ძალისა და მცირე შიგა წინააღობის დენის წყარო მიერთებულია 1 მ სიგრძისა და 2 ომი წინააღობის გამტართან, რომელიც 0,4 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველშია მოთავსებული. მაგნიტური ინდუქციის წირები ნახაზის სიბრტყის მართობულია (სურ. 1.99). განსაზღვრეთ დენის ძალა წრედში, როდესაც გამტარს მუდმივი $v=2$ მ/წმ სიჩქარით ავამოძრავებთ?



სურ. 1.99

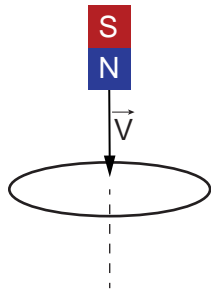
ამოხსნა: უკვე იცით, რომ მაგნიტურ ველში გამტარის ამოძრავებისას ლორენცის ძალის ზემოქმედებით მასში აღიძვრება ინდუქციის ემ ძალა, რომელიც ტოლი იქნება: $\mathcal{E}_i = Bv \sin 90^\circ = 0,4 \cdot 2 \cdot 1 = 0,8$ (ვ). ამრიგად, კონტურში გვექნება მიმდევრობით ჩართული ორი დენის წყარო. მარცხენა ხელის წესის გამოყენებით ადვილად დავადგენთ, რომ მოძრავ გამტარში ლორენცის ძალა მუხტებს ისე განაცალკევებს, როგორც ეს სურათზეა მითითებული. შესაბამისად, სრული ემძ თითოეულის ემძ-ს ჯამის ტოლი იქნება: $\mathcal{E}_{სრ} = \mathcal{E} + \mathcal{E}_i = 9,8$ (ვ). სრული წრედისთვის ომის კანონის თანახმად, მივიღებთ: $I = \frac{\mathcal{E}_{სრ}}{R} = \frac{9,8}{2} = 4,9$ (ა).

პასუხი: დენის ძალა წრედში 4,9 ა-ის ტოლი იქნება.

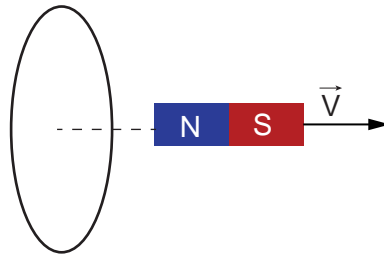


ამოხსენით ამოცანები:

- რა მიმართულება ექნება გამტარ რგოლში აღძრულ ინდუქციურ დენს, მასთან მაგნიტის მიახლოებისას (სურ. 1.100)? პასუხი დაასაბუთეთ.
- რა მიმართულების ინდუქციური დენი გაივლის გამტარ რგოლში, თუ მას მაგნიტს დავაშორებთ (სურ. 1.101)? პასუხი დაასაბუთეთ.

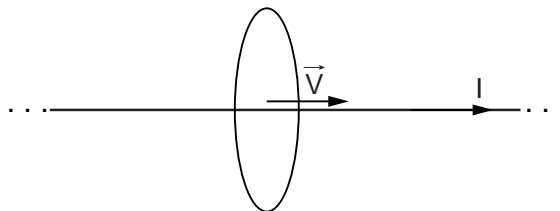


სურ. 1.100



სურ. 1.101

- წრფივი და უსასრულოდ გრძელი გამტარი, რომელშიც მუდმივი დენი გადის, გატარებულია რგოლში (სურ. 1.102). აღიძვრება თუ არა ინდუქციური დენი რგოლში, თუ მას დენიანი გამტარის გასწვრივ პარალელურად გადავიტანთ? პასუხი დაასაბუთეთ.



სურ. 1.102

4. განსაზღვრეთ შეკრულ გამტარ კონტურში აღძრული ინდუქციის ემ ძალა, თუ მისი გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი 2 ნმ-ის განმავლობაში 0,8 ვბ-ით თანაბრად იცვლება.

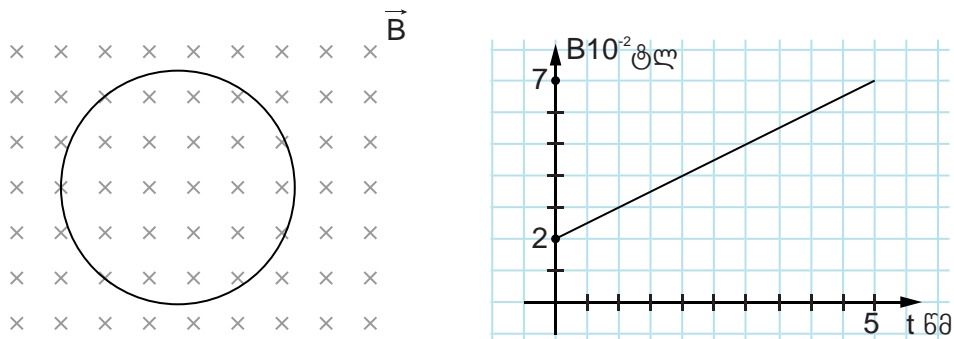
5. განსაზღვრეთ შეკრულ გამტარ კონტურში აღძრული ინდუქციის ემ ძალა, თუ კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი 4 ნმ-ის განმავლობაში 0,5 ვბ-დან 1,5 ვბ-მდე თანაბრად გაიზარდა.

6. 500 სმ² ფართობის მქონე შეკრული გამტარი კონტური მოთავსებულია ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში, რომლის ინდუქციის მოდული 6 ნამში 0,48 ტლ-ით თანაბრად შეიცვალა. განსაზღვრეთ კონტურში აღძრული ინდუქციის ემ ძალა, თუ კუთხე მაგნიტური ინდუქციის ვექტორსა და კონტურის სიბრტყის ნორმალს შორის 30°-ია.

7. გამოთვალეთ 3 ომი წინალობის გამტარ კონტურში აღძრული ინდუქციური დენის ძალა, თუ კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სისწრაფე 1,8 ვბ/ნმ-ის ტოლია.

8. გამოთვალეთ 4,5 ომი წინალობის შეკრულ გამტარ კონტურში აღძრული ინდუქციის ემ და ინდუქციური დენის ძალა, თუ კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი 15 ნმ-ის განმავლობაში 0.7 ვბ-დან 2,05 ვბ-მდე თანაბრად შეიცვალა.

9. 8 სმ რადიუსისა და 1,5 ომი წინალობის გამტარი რგოლი ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ისეა მოთავსებული, რომ ინდუქციის ვექტორი რგოლის სიბრტყის მართობულია (სურ. 1.103). რისი ტოლი იქნება რგოლში აღძრული ინდუქციური დენის ძალა და რა მიმართულება ექნება მას, თუ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდული სურათზე გამოსახული გრაფიკის მიხედვით იცვლება.



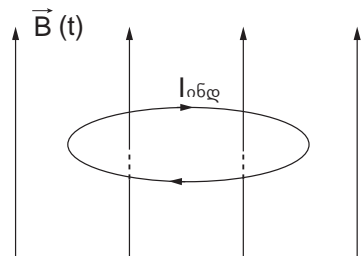
სურ. 1.103

10. B ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოთავსებულია S ფართობისა და N ხვიისაგან დამზადებული კოჭა, რომელიც R წინალობის ნათურასთანაა მიერთებული. რისი ტოლი იქნება ინდუქციური დენის ძალა ნათურაში, თუ t დროის განმავლობაში მაგნიტური ინდუქციის მოდული 75%-ით შემცირდა? ინდუქციის წირები ხვიების სიბრტყის მართობულია.

§ 1.16 გრიგალური ელექტრული ველი

წინა პარაგრაფებიდან თქვენ იცით, რომ ინდუქციის ემძ აღიძვრება ან მუდმივ მაგნიტურ ველში მოძრავ გამტარში, ან ცვლად მაგნიტურ ველში მოთავსებულ შეკრულ გამტარ კონტურში. მართალია, ორივე შემთხვევაში ინდუქციის ემძ $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ფორმულით გამოითვლება, მაგრამ მისი წარმოქმნის მიზეზები ერთმანეთისაგან განსხვავებულია. § 1.11-ში გავარკვიეთ, რომ პირველ შემთხვევაში ემ ძალის აღძვრის მიზეზი ლორენცის ძალაა. რა გარეშე ძალა მოქმედებს დამუხტულ ნაწილაკებზე მეორე შემთხვევაში?

ვთქვათ, გამტარის წრიული ხვია დროში ცვალებად ერთგვაროვან მაგნიტურ ველშია მოთავსებული (სურ. 1.104). თუ მაგნიტური ველის ინდუქცია დროის განმავლობაში იზრდება, გაიზრდება ხვიის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადიც. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის თანახმად, ხვიაში აღიძვრება ინდუქციური დენი. მაგნიტური ინდუქციის თანაბარი ზრდისას, ხვიაში წარმოქმნილი ინდუქციური დენი მუდმივი იქნება.



სურ. 104

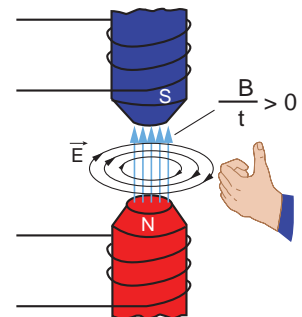
როგორც იცით, მაგნიტური ველი მოქმედებს მხოლოდ მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკებზე, წრიული ხვია კი უძრავია, ამიტომ უშუალოდ მაგნიტური ველი ინდუქციური დენს ვერ წარმოქმნიდა. ელექტრული ველი კი როგორც მოძრავ, ასევე უძრავ დამუხტულ ნაწილაკებზე მოქმედებს. აქამდე ჩვენთვის ცნობილი ელექტრული ველები დამუხტული ნაწილაკების გარშემო წარმოიქმნებოდა, ინდუქციურ დენს კი ცვლადი მაგნიტური ველი აღძრავს. თუ ამ ფაქტებს გავაანალიზებთ, შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ უძრავ ხვიაში ინდუქციური დენი აღიძრა თავისუფალ ელექტრონებზე იმ ელექტრული ველის მოქმედებით, რომელიც ცვლადმა მაგნიტურმა ველმა წარმოქმნა. ველების ამ ფუნდამენტურ თვისებამდე პირველი მივიდა ცნობილი ფიზიკოსი ჯ. მაქსველი, რომელმაც დაასკვნა:

დროში ცვალებადი მაგნიტური ველი წარმოქმნის ელექტრულ ველს.

ამ დასკვნის საფუძველზე ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა უკვე შეგვიძლია შემდეგნაირად აღვწეროთ: დროში ცვლადი მაგნიტური ველი წარმოქმნის ელექტრულ ველს, შემდეგ ელექტრული ველის მოქმედებით გამტარში ამოძრავდებიან თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკები და აღიძვრება ინდუქციური დენი. ამასთან, ცვლადი მაგნიტური ველი აუცილებლად წარმოქმნის ელექტრულ ველს, გამტარში აღძრული ინდუქციური დენი კი უბრალოდ ხელს უწყობს მის გამომჟღავნებას.

განსხვავებით ელექტროსტატიკური ველისაგან, რომელსაც უძრავი დამუხტული ნაწილაკები ქმნის, მაგნიტური ველის ცვლილებით წარმოქმნილი ელექტრული ველი დამუხტულ ნაწილაკებთან დაკავშირებული არ არის. შესაბამისად, მისი დაძაბულობის წირებს არც დასაწყისი ექნებათ, არც ბოლო. მაგნიტური ინდუქციის წირების მსგავსად, ეს წირები შეკრული მრუდებია. ამრიგად, **ცვლადი მაგნიტური ველით წარმოქმნილი ელექტრული ველი გრიგალურია.**

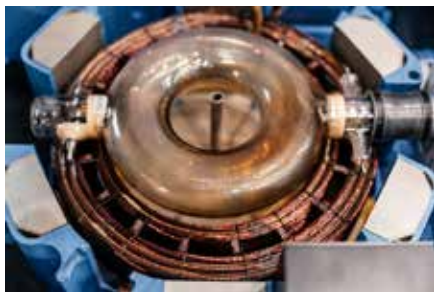
რაც უფრო სწრაფად იცვლება მაგნიტური ინდუქცია, მით მეტია წარმოქმნილი გრიგალური ელექტრული ველის დაძაბულობა. მაგნიტური ველის ინდუქციის ზრდისას, ლენცის წესის თანახმად, ელექტრული ველის დაძაბულობის \vec{E} ვექტორის მიმართულების დასადგენად გამოიყენება მარცხენა ხელის წესი: თუ 90° -ით გაშლილი ცერა თითი მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულებას გვიჩვენებს, მაშინ მოხრილი ოთხი თითი გრიგალური ელექტრული ველის დაძაბულობის წირების შემოვლის მიმართულებას გვიჩვენებს (სურ. 1.105). მაგნიტურ-



სურ. 1.105

რი ინდუქციის კვებისას კი, გრიგალური ელექტრული ველის დაძაბულობის წირების შემოვლის მიმართულების დასადგენად, 90° -ით გაშლილი მარცხენა ხელის ცერა თითი მაგნიტური ინდუქციის საინააღმდეგოდ უნდა მიემართოს. მაშინ მოხრილი ოთხი თითი გრიგალური ელექტრული ველის დაძაბულობის წირების შემოვლის მიმართულებას გვიჩვენებს.

გრიგალური ელექტრული ველის დაძაბულობის მიმართულება ინდუქციური დენის მიმართულებას ემთხვევა. ძალა, რომლითაც ეს ველი მუხტზე მოქმედებს, ასევე $\vec{F} = q\vec{E}$ ფორმულით გამოითვლება, მაგრამ ელექტროსტატიკური ელექტრული ველისაგან განსხვავებით, **შეკრულ წირზე გრიგალური ელექტრული ველის მუშაობა ნულის ტოლი აღარ არის** – ტრაექტორიის ყველა უბანზე მუშაობას ერთი ნიშანი აქვს.



სურ. 1.106

გრიგალური ელექტრული ველის მიერ, უძრავი შეკრული გამტარი კონტურის გასწვრივ, ერთეული დადებითი მუხტის გადატანაზე შესრულებული მუშაობა რიცხობრივად ამ გამტარში ინდუქციის ემ ძალის ტოლია.

ძლიერი ელექტრომაგნიტის მაგნიტური ველის ძალიან სწრაფად ცვლილებისას წარმოიქმნება დიდი დაძაბულობის გრიგალური ელექტრული ველები. ისინი შეიძლება გამოვიყენოთ ელექტრონების ასაჩქარებლად ძალიან დიდ, სინათლის სიჩქარესთან მიახლოებულ სიჩქარეებამდე. სწორედ ამ პრინციპზე მუშაობს ელექტრონების ამაჩქარებელი ხელსაწყო – ბეტატრონი (სურ. 1.106), რომელიც ფართოდ გამოიყენება ფიზიკურ კვლევებსა და მედიცინაში.

მასიურ გამტარებში, რომელთა წინაღობა ძალიან მცირეა, ინდუქციური დენები ძალიან დიდ რიცხვით მნიშვნელობებს აღწევს. ასეთ დენებს **ფუკოს დენებს** უწოდებენ, მათი აღმომჩენის, ფრანგი ფიზიკოსის ლეონ ფუკოს პატივსაცემად. ამ დენების გამოყენებით შეიძლება გამტარების გაცხელება. ეს პრინციპი უდევს საფუძვლად ინდუქციური ლუმელების, მაგალითად, მიკროტალღური ლუმელის მუშაობას.

დასკვნები:


- დროში ცვალებადი მაგნიტური ველი წარმოქმნის ელექტრულ ველს;
- ცვლადი მაგნიტური ველით წარმოქმნილი ელექტრული ველი გრიგალურია;
- გრიგალური ელექტრული ველის მიერ, უძრავი შეკრული გამტარი კონტურის გასწვრივ, ერთეული დადებითი მუხტის გადატანაზე შესრულებული მუშაობა რიცხობრივად ამ გამტარში ინდუქციის ემ ძალის ტოლია.

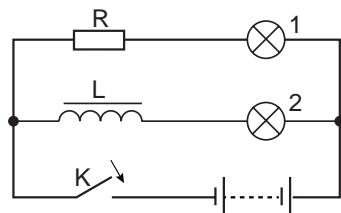
საკონტროლო კითხვები:

1. რატომ ვერ აღძრავს ინდუქციურ დენს უშუალოდ მაგნიტური ველი, მასში მოთავსებულ უძრავ გამტარ კონტურში?
2. რატომ არ არის შეკრულ წირზე მუხტის გადატანისას გრიგალური ელექტრული ველის მუშაობა ნულის ტოლი?
3. რას უწოდებენ ფუკოს დენებს?

§ 1.17 თვითინდუქცია. ინდუქციურობა

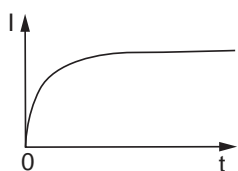
მაგნიტური მოვლენების შესწავლისას, ისეთ შემთხვევებს ვიხილავდით, როდესაც კოჭაში (გამტარში) გამავალი დენის ძალა არ იცვლებოდა. არანაკლებ მნიშვნელოვანია მოვლენა, რომელსაც ადგილი აქვს კოჭაში დენის ძალის ცვლილების დროს.

 ჩავატაროთ ცდა. ავანყოთ ელექტრული წრედი სურ. 1.107-ზე გამოსახული სქემის მიხედვით. პარალელურად ჩართული ორი ერთნაირი ნათურა მიერთებულია მუდმივი ემძ-ის დენის წყაროსთან. ნათურა 1 მიმდევრობითაა შეერთებული R რეზისტორთან, ხოლო ნათურა 2 – რკინის გულარიან L კოჭასთან.



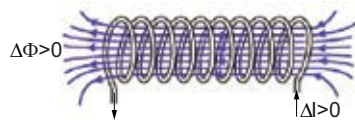
სურ. 1.107

ჩამრთველის ჩართვის შემდეგ ნათურა 1 თითქმის მყისიერად აინთება, ნათურა 2 კი – შესამჩნევი დაგვიანებით. რითია გამოწვეული ეს დაგვიანება?



სურ. 1.108 ა

ჩამრთველის ჩართვისას ნათურა 2-ში დენის ძალის გარკვეული მნიშვნელობა არა მყისიერად, არამედ დროის განმავლობაში თანდათან მიიღწევა (სურ. 1.108 ა). ამის მიზეზი ისაა, რომ კოჭაში დენის ძალის მატების დროს კოჭას გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი იზრდება (სურ. 1.108 ბ). ლენცის წესის თანახმად, ამავე კოჭაში აღიძვრება ინდუქციის ემ ძალა, რომელიც დენის

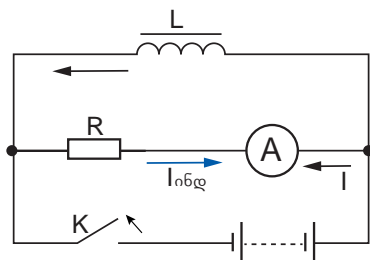


სურ. 1.108 ბ

ზრდას ეწინააღმდეგება. შესაბამისად, გრიგალური ელექტრული ველი დენის მატებას ეწინააღმდეგება. შედეგად, ნათურა 2 დაგვიანებით აინთება.

მოვლენას, რომლის დროსაც ცვლადი მაგნიტური ველი ინდუქციის ემ ძალას აღძრავს იმავე გამტარში, რომელშიც გადის ამ ველის შემქმნელი დენი, თვითინდუქცია ეწოდება.

ანალოგიურად, დენის წყაროდან გათიშვისას, ჩაკეტილ კონტურებში დენი მყისიერად არ წყდება: კოჭაში დენის ძალის შემცირებისას წარმოქმნილი გრიგალური ელექტრული ველის დაძაბულობას დენის მიმართულება აქვს და ეწინააღმდეგება მის შემცირებას. რადგან გათიშვის დროს დენის და, შესაბამისად, მაგნიტური ველის ცვლილების სიჩქარე ძალიან დიდია, ამიტომ თვითინდუქციის ემ ძალის მნიშვნელობა შეიძლება დენის წყაროს ემძ-ს აღემატებოდეს. ამ მოვლენას შეიძლება დავაკვირდეთ სურ. 1.109-ზე ნაჩვენები სქემის მიხედვით აწყობილ ელექტრულ წრედში. ჩამრთველის გათიშვისას L კოჭაში აღიძვრება თვითინდუქციის ემძ, რომელიც ცდილობს საწყისი დენის ძალის შენარჩუნებას. შედეგად, ჩამრთველის გათიშვის შემდეგ ამპერმეტრში გადის დენი (ლურჯი ისარი), რომლის მიმართულება საწყისი დენის მიმართულების საპირისპიროა. ამასთან, წრედის გათიშვის შემდეგ ამპერმეტრში გამავალი დენის ძალა, საწყისი დენის ძალას აღემატება.



სურ. 1.109

თვითინდუქციის მოვლენა მსგავსია ინერციის მოვლენისა. როგორც იცით, ინერციის გამო სხეულის სიჩქარის მოცემულ მნიშვნელობამდე მყისიერად გაზრდა შეუძლებელია – ამისათვის გარკვეული დროა საჭირო. ასევე შეუძლებელია მოძრავი სხეულის მყისიერად გაჩერება. ანალოგიურად, წრედის ჩართვისას, თვითინდუქციის გამო დენის ძალა მყისიერად ვერ აღწევს მოცემულ მნიშვნელობას. ასევე, მიუხედავად წრედის წინააღმდეგობისა,

დენის წყაროდან გათიშვის შემდეგ, თვითინდუქციის მოვლენის გამო, დენი მყისიერად არ წყდება.

მექანიკიდან თქვენთვის ცნობილია, რომ სხეულის სიჩქარის გაზრდისათვის, მუშაობის შესრულებაა საჭირო, დამუხრუჭებისას კი თავად სხეული ასრულებს დადებით მუშაობას. ანალოგიურად, წრედში დენის აღძვრისათვის საჭიროა, შესრულდეს მუშაობა გრიგალური ელექტრული ველის წინააღმდეგ, ხოლო დენის გათიშვის შემდეგ ეს ველი თვითონ ასრულებს დადებით მუშაობას.

ახლა თვითინდუქციის მოვლენა რაოდენობრივად აღვწეროთ. გავიხსენოთ, რომ დენის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველის ინდუქციის \vec{B} ვექტორის მოდული დენის ძალის პროპორციულია $B \sim I$, მაგნიტური ნაკადი კი პროპორციულია ველის ინდუქციის მოდულის $\Phi \sim B$. აქედან გამომდინარეობს, რომ $\Phi \sim I$, ანუ

$$\Phi = LI,$$

რომელშიც L პროპორციულობის კოეფიციენტია და მას კონტურის **ინდუქციურობა**, ან მის **თვითინდუქციის კოეფიციენტს** უწოდებენ.

თუ კონტურის ფორმა არ იცვლება, მაშინ მაგნიტური ნაკადის ცვლილება მხოლოდ დენის ძალის ცვლილებითაა გამოწვეული. ამ შემთხვევაში შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\Delta\Phi = L \cdot \Delta I.$$

ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის გამოყენებით, თვითინდუქციის ემძთვის მივიღებთ:

$$\mathcal{E}_{\text{თ.ი}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

ამ ფორმულიდან გამომდინარეობს, რომ კონტურის ინდუქციურობა რიცხობრივად თვითინდუქციის იმ ემძ-ის ტოლია, რომელიც აღიძვრება მასში 1 ნმ-ის განმავლობაში დენის ძალის 1 ა-ით ცვლილებისას.

ინდუქციურობა ფიზიკური სიდიდეა. ის დამოკიდებულია მხოლოდ გამტარის გეომეტრიულ ფორმაზე, ზომებზე და იმ გარემოს მაგნიტურ თვისებებზე, რომელშიც გამტარია მოთავსებული.

SI-ში ინდუქციურობის ერთეულია **1 ჰენრი (1 ჰნ)**, ამერიკელი მეცნიერის, ჯოზეფ ჰენრის პატივსაცემად. გამტარის ინდუქციურობა 1 ჰნ-ის ტოლია, თუ 1 ნმ-ის განმავლობაში მასში დენის ძალის 1 ა-ით თანაბარი ცვლილებისას, 1ვ თვითინდუქციის ემძ აღიძვრება:

$$1 \text{ ჰნ} = 1 \frac{\text{ვ} \cdot \text{ნმ}}{\text{ა}}.$$

ცხადია, სოლენოიდის ინდუქციურობა მეტია, ვიდრე გამტარის ერთი ხვიისა, რადგან კოჭას ხვიათა რიცხვის გაზრდით, მაგნიტური ნაკადიც იზრდება.

დასკვნები:

- მოვლენას, რომლის დროსაც ცვლადი მაგნიტური ველი ინდუქციის ემ ძალას აღძრავს იმავე გამტარში, რომელშიც გადის ამ ველის შემქმნელი დენი, თვითინდუქცია ეწოდება;

- თვითინდუქციის ემ ძალა გამოითვლება ფორმულით: $\mathcal{E}_{\text{თ.ი}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$;

- გამტარის ინდუქციურობა 1 ჰნ-ის ტოლია, თუ 1 ნმ-ის განმავლობაში მასში დენის ძალის 1 ა-ით თანაბარი ცვლილებისას, 1ვ თვითინდუქციის ემძ აღიძვრება:

$$1 \text{ ჰნ} = 1 \frac{\text{ვ} \cdot \text{ნმ}}{\text{ა}}.$$

საკონტროლო კითხვები:

1. რატომ აგვიანებს კოჭასთან მიერთებული ნათურა ანთებას ჩამრთველის ჩართვისას?
2. რატომ არ წყდება დენი მყისიერად ჩამრთველის გამორთვისას?
3. რა ანალოგია თვითინდუქციისა და ინერციის მოვლენებს შორის?
4. რიცხობრივად რისი ტოლია კონტურის ინდუქციურობა?
5. რაზეა დამოკიდებული კონტურის ინდუქციურობა?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

§ 1.17 კოჭაში, რომლის ინდუქციურობა $0,08$ ჰნ-ია დენის ძალა იცვლება შემდეგი კანონით: $I=0,1+100t$. გამოთვალეთ კოჭაში აღძრული თვითინდუქციის ემ ძალის მოდული.

ამოხსნა: $\mathcal{E}_{\text{თ.}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ ფორმულის თანახმად, თვითინდუქციის ემ ძალის მოდულის გამოსათვლელად კოჭას ინდუქციურობასთან ერთად საჭიროა, ვიცოდეთ დენის ძალის ცვლილების სისწრაფე, ანუ დენის ძალის ცვლილება 1 ნმ-ში. დენის ძალის მოცემული ფორმულიდან ადვილად დაადგენთ, რომ 1 ნმ-ში დენის ძალა 100 ა-ით იცვლება: $\frac{\Delta I}{\Delta t} = 100$ ა/ნმ. შესაბამისად, $\mathcal{E}_{\text{თ.}} = 0,08$ ჰნ $\cdot 100$ ა/ნმ $= 8$ ვ.

პასუხი: კოჭაში აღძრული თვითინდუქციის ემძ-ს მოდული 8 ვ-ია.



ამოხსენით ამოცანები:

1. რით განსხვავდება ელექტროსტატიკური ველის ძალწირები მაგნიტური ველის ცვლილებით წარმოქმნილი ელექტრული ველის ძალწირებისაგან?
2. გამოიწვევს თუ არა გამტარში დენის ძალის ცვლილება გრიგალური ელექტრული ველის წარმოქმნას? პასუხი დაასაბუთეთ.
3. შესაძლებლად მიგაჩნიათ თუ არა, რომ ინდუქციურობის კოჭასთან მიერთებული ნათურა წრედის განრთვისას გადაინვას? პასუხი დაასაბუთეთ.
4. როგორ შეიცვლება კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი და კონტურის ინდუქციურობა, თუ მასში დენის ძალას 3 -ჯერ გავზრდით? პასუხი დაასაბუთეთ.
5. გამოთვალეთ კონტურის ინდუქციურობა, თუ მასში 2 ა დენის გავლისას გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი $0,8$ ვებერია.
6. კოჭაში დენის ძალის 4 -ჯერ გაზრდისას მისი გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი 9 ვბ-ით გაიზარდა. იპოვეთ მაგნიტური ნაკადის მნიშვნელობა კოჭაში დენის გაზრდამდე.
7. კოჭაში დენის ძალის 5 -ჯერ შემცირებისას მისი გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი $0,8$ ვებერით შემცირდა. იპოვეთ მაგნიტური ნაკადის მნიშვნელობა კოჭაში დენის ძალის შემცირების შემდეგ.
8. 5 მჰნ ინდუქციურობის კოჭაში დენის ძალის ცვლილების სიჩქარე 12 ა/ნმ-ია. გამოთვალეთ კოჭაში აღძრული თვითინდუქციის ემ ძალა.
9. განსაზღვრეთ კოჭას ინდუქციურობა, თუ $1,5$ ნმ-ის განმავლობაში დენის ძალის 9 ა-ით თანაბრად შემცირებისას, მასში $5,4$ ვ თვითინდუქციის ემ ძალა აღიძრა.
10. 15 მჰნ ინდუქციურობის კოჭას აერთებენ 3 ვ ემ ძალის დენის წყაროსთან. რისი ტოლი იქნება სრული ემძ კოჭას დენის წყაროსთან მიერთებისას, თუ დენის ძალა კოჭაში 100 ა/ნმ სიჩქარით იზრდება?

§ 1.18 დენის მაგნიტური ველის ენერჯია

რატომ არის საჭირო წრედში დენის აღძვრისათვის მუშაობის შესრულება, ანუ ენერჯიის დახარჯვა?

წრედის შეკვრისას, დენის წყარო გამტარში ქმნის ელექტრულ ველს, ამიტომ დენი იწყებს ზრდას. თავის მხრივ, დენის ზრდისას აღიძვრება გრიგალური ელექტრული ველი, რომელიც დენის წყაროს ელექტრული ველის სანინალმდეგოდ მოქმედებს და ხელს უშლის დენის ძალის ზრდას. იმისათვის, რომ დენის ძალამ გარკვეულ I მნიშვნელობას მიაღწიოს, დენის წყარომ უნდა შეასრულოს მუშაობა გრიგალური ველის ძალების წინააღმდეგ. სწორედ ამ მუშაობის ხარჯზე იზრდება დენის ენერჯია. ამ დროს გრიგალური ველი უარყოფით მუშაობას ასრულებს.

წრედის გათიშვისას დენი იკლებს, აღძრული გრიგალური ველი კი ენინალმდეგება ამ კლებას და დადებით მუშაობას ასრულებს. ამ პროცესმა დიდი ინდუქციურობის კოჭაში შეიძლება მძლავრი ნაპერწკლის სახით იჩინოს თავი, რომლის დროსაც წრედში გამოყოფილი ენერჯიის წყაროს კოჭას მაგნიტური ველი წარმოადგენს.

კოჭას მაგნიტური ველის ენერჯიის გამოსათვლელად, სიმარტივისთვის მივიჩნით, რომ წრედის გათიშვისას დროის Δt შუალედში, დენის ძალა სანყის I მნიშვნელობიდან ნულამდე, წრფივად მცირდება. ამ შემთხვევაში თვითინდუქციის ემ ძალის მნიშვნელობა მუდმივი იქნება და ის შეიძლება შენდგენაირად ჩავწეროთ:

$$\mathcal{E}_{\text{თ.ი}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = L \frac{I}{\Delta t}.$$

დენის ძალის ასეთი შემცირებისას, Δt დროის განმავლობაში წრედში გადატანილი მუხტი ასე გამოითვლება:

$$q = I_{\text{საშ.}} \Delta t = \frac{I+0}{2} \Delta t = \frac{I \Delta t}{2}.$$

შესაბამისად, მაგნიტური ველის ენერჯიის ხარჯზე დენის მიერ შესრულებული მუშაობა ტოლი იქნება:

$$A = q \mathcal{E}_{\text{თ.ი}} = \frac{I \Delta t I}{2 \Delta t} = \frac{LI^2}{2}.$$

ამრიგად, L ინდუქციურობის კოჭაში I დენის ძალის არსებობისას მაგნიტური ველის ენერჯია გამოისახება ფორმულით:

$$W_{\text{მაგნ.}} = \frac{LI^2}{2}.$$

იმავე შედეგის მიღება შესაძლებელია თვითინდუქციისა და ინერჯიის მოვლენებს შორის ანალოგიის საფუძველზე. მართლაც, დენის ზრდის პროცესში ინდუქციურობა იმავე როლს ასრულებს, რასაც სხეულის მასა სიჩქარის ზრდისას. დენის ძალა კი, როგორც დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობის მახასიათებელი, სხეულის სიჩქარის ანალოგიური სიდიდეა. ეს მსგავსება გვაფიქრებინებს, რომ დენის მაგნიტური ველის ენერჯია შეიძლება სხეულის კინეტიკური ენერჯიის ანალოგიურად ჩაიწეროს. თუ კინეტიკური ენერჯიის ფორმულაში მასის ნაცვლად ინდუქციურობას ჩავწეროთ, ხოლო სიჩქარეს დენის ძალით შევცვლით, იმავე ფორმულას მივიღებთ.

ელექტრული დენით შექმნილი მაგნიტური ველის ენერჯია დენის ძალის კვადრატის პირდაპირპროპორციულია.

დასკვნები:

- L ინდუქციურობის კოჭაში I დენის ძალის არსებობისას მაგნიტური ველის ენერჯია გამოისახება ფორმულით: $W_{\text{მაგნ.}} = \frac{LI^2}{2}$.

საკონტროლო კითხვები:

1. როდის ასრულებს გრიგალური ელექტრული ველი უარყოფით მუშაობას? დადებით მუშაობას?
2. რა არის კოჭას ინდუქციურობის ანალოგი მექანიკურ მოვლენებში? დენის ძალის ანალოგი?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

რა ინდუქციურობა უნდა ჰქონდეს კოჭას, რომ 3 ა დენის გატარებისას მისი მაგნიტური ველის ენერგია 120 ვ დაბვამდე დამუხტული, 5 მკფ ტევადობის კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგიის ტოლი იყოს?

ამოხსნა: მეათე კლასის ფიზიკის კურსიდან თქვენთვის ცნობილია, რომ კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგია განისაზღვრება ფორმულით: $W_{\text{ელ}} = \frac{CU^2}{2}$. დენიანი კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია კი ტოლია $W_{\text{მაგ}} = \frac{LI^2}{2}$. პირობის თანახმად $\frac{CU^2}{2} = \frac{LI^2}{2}$, საიდანაც $L = \frac{CU^2}{I^2} = 0,008$ (ჰნ) = 8 მჰნ.

პასუხი: კოჭას ინდუქციურობა 8 მჰნ-ის ტოლი უნდა იყოს.



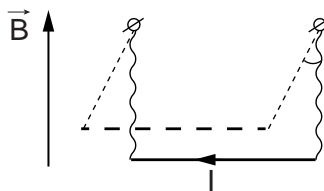
ამოხსენით ამოცანები:

1. განსაზღვრეთ 5 ჰნ ინდუქციურობის კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია, თუ მასში 2 ა დენი გადის.
2. იპოვეთ 30 მჰნ ინდუქციურობის კოჭაში გამავალი დენის ძალა, თუ კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია 1,8 ჯ-ია.
3. გამოთვალეთ კოჭას ინდუქციურობა, თუ მასში 1,5 ა დენის გავლისას კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია 9 ჯ-ია.
4. როგორ შეიცვლება კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია, თუ დენის ძალა მასში 5-ჯერ შემცირდება?
5. თუ კოჭაში დენის ძალას გავაორმაგებთ, მისი მაგნიტური ველის ენერგია 18 ჯ-ით გაიზრდება. იპოვეთ კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია მასში დენის ძალის გაზრდამდე და გაზრდის შემდეგ.
6. კოჭაში დენის ძალის 4 ა-ით გაზრდამ მისი მაგნიტური ველის ენერგია 9-ჯერ გაზარდა. გამოთვალეთ დენის ძალა კოჭაში მისი შეცვლის შემდეგ.
7. იპოვეთ კოჭას ინდუქციურობა, თუ მასში დენის ძალის 1 ა-ით ცვლილება მაგნიტური ველის ენერგიას 0,4 ჯ-დან 1,6 ჯ-მდე ზრდის.
8. განსაზღვრეთ კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია, თუ მასში 8 ა დენის გავლისას წარმოქმნილი მაგნიტური ნაკადი 1,25 ვბ-ია.
9. იპოვეთ კოჭას ინდუქციურობა და დენის ძალა მასში, თუ წარმოქმნილი მაგნიტური ნაკადი და კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია, შესაბამისად, 3,5 ვბ და 14 ჯ-ია.
10. მცირე წინააღობის კოჭა შეაერთეს 12 ვ ემ ძალისა და 2 ომი შიგა წინააღობის დენის წყაროსთან. გამოთვალეთ კოჭას ინდუქციურობა და დენის ძალა მასში, თუ სტაციონარულ რეჟიმში კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია 7,2 ჯ-ია.

** სტაციონარული რეჟიმი – დამყარებული რეჟიმი, როდესაც წრედის ძირითადი პარამეტრები არ იცვლება.

I თავის შემაჯამებელი ამოცანები

- 0,6 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოთავსებულია 150 ხეისგან დამზადებული კვადრატული ფორმის კოჭა, რომლის გვერდის ზომა 10 სმ-ია. რა მაქსიმალური მახრუნებელი მომენტი იმოქმედებს კოჭაზე, თუ მასში 5 ა დენს გავატარებთ?
- არსებობს თუ არა მაგნიტური მუხტი? პასუხი განამტკიცეთ მსჯელობით.
- მართებულია თუ არა მოსაზრება, რომ მაგნიტური ინდუქციის წირები მაგნიტის ერთ პოლუსზე იწყება და მეორეზე მთავრდება? პასუხი დაასაბუთეთ.
- ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში, რომლის მაგნიტური ინდუქციის მოდული 0,5 ტესლაა, ინდუქციის წირებისადმი 75° -იანი კუთხით მოთავსებულია 3 მ სიგრძის წრფივი დენიანი გამტარი. იპოვეთ დენის ძალა გამტარში, თუ მასზე მოქმედი ამპერის ძალის მოდული 4,5 ნ-ია.
- ვერტიკალურად მიმართულ \vec{B} ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ორ ძაფზე ჩამოკიდებულია S განივკვეთის ფართობის მქონე ლითონის გამტარი, რომელშიც დენის ძალა I -ს ტოლია. განსაზღვრეთ გამტარის სიმკვრივე, თუ ძაფები ვერტიკალიდან α კუთხითაა გადახრილი (სურ. 1.115). მიიჩნიეთ, რომ გამტართან დენის მიმყვანი სადენები მაგნიტურ ველში მოთავსებული არ არის და არ უშლის ხელს გამტარის მოძრაობას.

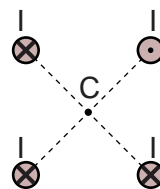


სურ. 1.115

- სურ. 1.116-ზე გამოსახულია ვაკუუმში მოთავსებული, ერთმანეთისგან 40 სმ მანძილით დაშორებული ორი წვრილი, უსასრულოდ გრძელი, პარალელური დენიანი გამტარი, რომლებშიც $I_1=1,6$ ა და $I_2=2,4$ ა დენი გადის. იპოვეთ თითოეულისგან თანაბარი მანძილით დაშორებულ A წერტილში მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის მოდული.
- ვაკუუმში მოთავსებული წვრილი, უსასრულოდ გრძელი, პარალელური დენიანი გამტარების მოპირდაპირე 0,9 მ სიგრძის მონაკვეთები $4,5 \cdot 10^{-5}$ ნ ძალით ურთიერთქმედებს. იპოვეთ დენის ძალა პირველ გამტარში, თუ დენის ძალა მეორე გამტარში მას 2-ჯერ აღემატება. გამტარებს შორის მანძილი 15 სმ-ია.
- სურ. 1.117-ზე გამოსახულია ვაკუუმში მოთავსებული, ერთმანეთისგან 60 სმ-ით დაშორებული ოთხი წვრილი, უსასრულოდ გრძელი, პარალელური დენიანი გამტარი, რომლებშიც ერთნაირი $I=0,4$ ა დენი გადის. იპოვეთ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდული თითოეული გამტარიდან თანაბარი მანძილით დაშორებულ C წერტილში. გამტარები ნახაზის სიბრტყის მართობულია და მათი განივი კვეთები კვადრატის წვეროებშია განლაგებული.

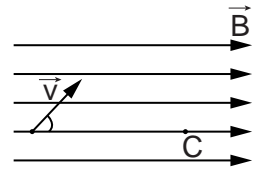


სურ. 1.116



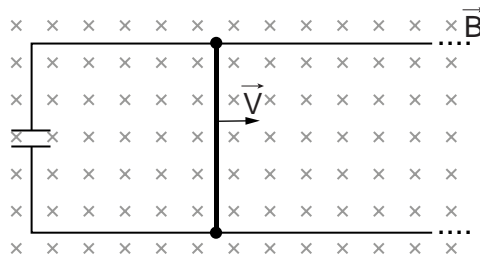
სურ. 1.117

9. \vec{B} ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირებისადმი 30° კუთხით შეიჭრა U პოტენციალთა სხვაობით აჩქარებული m მასისა და q მუხტის მქონე ნაწილაკი. მიიჩნიეთ, რომ მასზე მხოლოდ ლორენცის ძალა მოქმედებს და იპოვეთ ნაწილაკის აჩქარება მაგნიტურ ველში მოძრაობისას
10. ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ინდუქციის წირების მართობულად შეიჭრა ტოლი მასის ორი დამუხტული ნაწილაკი. პირველი ნაწილაკის მუხტი და სიჩქარის მოდული, შესაბამისად, 4-ჯერ და 3-ჯერ მეტია, ვიდრე მეორისა. რამდენჯერ განსხვავდება ამ ნაწილაკთა შემონერვილი წრეწირების რადიუსები?
11. 12 ნკ მუხტისა და 10^{-9} გ მასის ნაწილაკი 100 მ/წმ სიჩქარით შეიჭრა ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში. A წერტილში ნაწილაკის სიჩქარის ვექტორი მაგნიტური ინდუქციის წირებთან 30° -იან კუთხეს ქმნის (სურ. 1.118). რისი ტოლი უნდა იყოს მაგნიტური ინდუქციის მოდული, რომ ნაწილაკმა ორი შემობრუნების შემდეგ C წერტილში გაიაროს, თუ AC მონაკვეთის სიგრძე 1მ-ია?



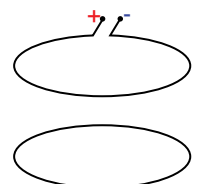
სურ. 1.118

12. სივრცეში, სადაც ერთდროულადაა ერთგვაროვანი ელექტრული და მაგნიტური ველები, დამუხტული ნაწილაკი მოძრაობს წრფივად და თანაბრად. იპოვეთ ნაწილაკის სიჩქარე, თუ ელექტრული ველის დაძაბულობა და მაგნიტური ველის ინდუქციის მოდულები, შესაბამისად $2 \cdot 10^3$ ვ/მ და 10^{-2} ტესლაა.
13. 0,125 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მისი წირებისადმი 60° -იანი კუთხით, 16 მ/წმ სიჩქარით მოძრაობს გამტარი ღერო. იპოვეთ ღეროში შექმნილი ელექტრული ველის დაძაბულობის მოდული.
14. 4 ნფ ტევადობის კონდენსატორი მიერთებულია 2 მ სიგრძის გამტართან, რომელიც 0,025 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველშია მოთავსებული. მაგნიტური ინდუქციის წირები ნახაზის სიბრტყის მართობულია (სურ. 1.119). რა მუხტი დაგროვდება კონდენსატორზე, თუ გამტარს მუდმივი $v=5$ მ/წმ სიჩქარით ავამოძრაობთ?



სურ. 1.119

15. კვადრატის ფორმის ჩარჩო, რომლის გვერდის ზომა 8 სმ-ია, მოთავსებულია ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ისე, რომ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი ჩარჩოს სიბრტყესთან 25° -იან კუთხეს ქმნის. გამოთვალეთ ჩარჩოს გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი, თუ ინდუქციის ვექტორის მოდული 0,15 ტესლაა.
16. წრიული ფორმის ჩარჩო, რომლის რადიუსი 25 სმ-ია, მოთავსეს 1 ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ისე, რომ ჩარჩოს სიბრტყის ნორმალის ინდუქციის ვექტორთან 45° -იან კუთხეს ადგენს. განსაზღვრეთ ჩარჩოს გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი.
17. დაადგინეთ სურ. 1.120-ზე გამოსახულ ქვედა რგოლში აღძრული ინდუქციური დენის მიმართულება მაშინ, როდესაც ზედა რგოლში დენის ძალა შემცირებას დაიწყებს.

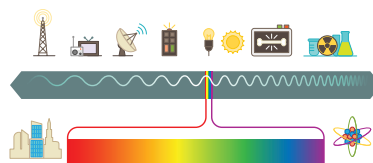
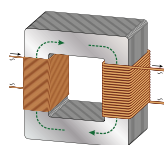
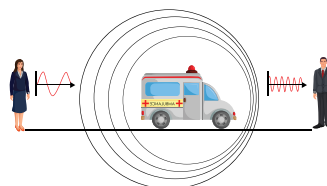
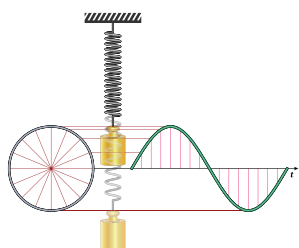


სურ. 1.120

18. ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოთავსებული კოჭა, რომელიც შედგება 20 სმ² ფართობის მქონე 500 ხვიისაგან, მიერთებულია ამპერმეტრთან. რა მუხტი გაივლის ამპერმეტრში 1 წთ-ის განმავლობაში, თუ მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის მოდული დროის მიხედვით $B=0,1+0,02t$ კანონით იცვლება. წრედის წინაღობა 0,5 ომია. ფორმულაში შემავალი სიდიდეები გაზომილია SI ერთეულებში. მაგნიტური ინდუქციის წირები კოჭას ხვიების სიბრტყის მართობულია.
19. ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოთავსებული კოჭა, რომელიც შედგება 50 სმ² ფართობის მქონე 450 ხვიისაგან, მიერთებულია 0,4 ომი წინაღობის ნათურასთან. გამოთვალეთ ნათურაში გამოყოფილი სიმძლავრე, თუ ინდუქციის ვექტორის მოდულის ცვლილების სისწრაფე 10^{-1} ტლ/წმ-ია. ინდუქციის წირები ხვიების სიბრტყის მართობულია.
20. განსაზღვრეთ კოჭას ინდუქციურობა, თუ 5 წმ-ის განმავლობაში მასში დენის ძალის 15 ა-ით თანაბარი ცვლილებისას, 0,6 ვ თვითინდუქციის ემ ძალა აღძრვა.
21. დენის წყაროსთან მიერთებულია 0,02 ჰნ ინდუქციურობისა და 4 ომი წინაღობის მქონე კოჭასთან, რომელშიც 6 ა დენი გადის. რისი ტოლი იქნება ძაბვა კოჭას ბოლოებზე იმ მომენტში, როცა დენის ძალა 100 ა/წმ სიჩქარით გაზრდას დაიწყებს?
22. 5 მჰნ ინდუქციურობისა და 1 ომი წინაღობის კოჭა მიერთებულია 12 ვ ემ ძალისა და 2 ომი შიგა წინაღობის დენის წყაროსთან. როგორ შეიცვლება ძაბვა კოჭას მომჭერებზე წრედის განრთვისას, თუ დენის ძალა 50 ა/წმ სიჩქარით დაიწყებს შემცირებას?
23. რისი ტოლი უნდა იყოს დენის ძალა 15 მჰნ ინდუქციის კოჭაში, რომ მისი მაგნიტური ველის ენერგია 100 ვ ძაბვამდე დამუხტული 60 ნფ ტევადობის კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგიის ტოლი იყოს?
24. 8 ომი წინაღობის კოჭა მიაერთეს 30 ვ ემ ძალისა და 2 ომი შიგა წინაღობის დენის წყაროსთან. გამოთვალეთ კოჭას ინდუქციურობა და მასში გამავალი დენის ძალა, თუ სტაციონარული რეჟიმის დამყარების შემდეგ კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია 8,1 ჯ-ია.
25. განსაზღვრეთ მუდმივი დენის გენერატორის როტორის ბრუნვის პერიოდი, თუ 400 ხვიისგან შემდგარ გრაგნილში მაგნიტური ნაკადის მაქსიმალური მნიშვნელობა 0,25 ვბ-ია, გენერატორში აღძრული ემ ძალა კი – 314 ვ.

თავი II

რხევები და ტალღები



ამ თავში თქვენ გაეცნობით:

- მექანიკურ რხევებს და მათ მახასიათებლებს;
- ტალღების გავრცელებას დრეკად გარემოში;
- ბგერით ტალღებს;
- ელექტრომაგნიტურ რხევებსა და ტალღებს;
- ცვლად დენსა და ცვლადი დენის გენერატორს;
- ელექტროენერჯის გადაცემას და ტრანსფორმატორს;
- ელექტრომაგნიტური ტალღების სკალას.

§ 2.1 რხევითი მოძრაობა



სურ. 2.1 ა

მრავალი სახის მექანიკურ მოძრაობას შორის, ხშირად გვხვდება პერიოდული (განმეორებადი) მოძრაობები – საათის ქანქარას მოძრაობა (სურ. 2.1 ა), მუსიკალური ინსტრუმენტების სიმების მოძრაობა (სურ. 2.1 ბ), საქანელას მოძრაობა (სურ. 2.1 გ), ქარის დროს ხის ტოტების მოძრაობა (სურ. 2.1 დ), ადამიანის გულისცემა და სხვა. რა განსაკუთრებული თვისება აქვს ამ მოძრაობებს? რით განსხვავდება ისინი გადატანითი და ბრუნვითი მოძრაობები-საგან? როგორ შეიძლება ასეთი მოძრაობების აღწერა?

მოძრაობის პერიოდულობა ნიშნავს, რომ სხეული დროის გარკვეული შუალედის შემდეგ საწყის მდგომარეობას უბრუნდება. გადატანითი მოძრაობის დროს სხეული საწყის მდებარეობაში შეიძლება საერთოდ არ დაბრუნდეს, ბრუნვითი მოძრაობისას კი

ის საწყის მდებარეობას უბრუნდება დროის გარკვეული შუალედის – ბრუნვის პერიოდის შემდეგ.



სურ. 2.1 ბ



სურ. 2.1 გ



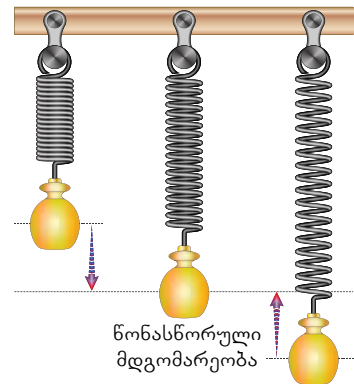
სურ. 2.1 დ

ხშირად გვხვდება ისეთი მოძრაობა, რომლის დროსაც სხეული ჯერ ერთი მიმართულებით, შემდეგ კი საწინააღმდეგო მიმართულებით ერთსა და იმავე ტრაექტორიაზე მრავალჯერ გადაადგილდება.

მოძრაობას, რომლის დროსაც სხეული (სხეულთა სისტემა) წონასწორობის მდებარეობიდან ხან ერთ ხან მეორე მხარეს გადაადგილდება, რხევითი მოძრაობა ეწოდება.

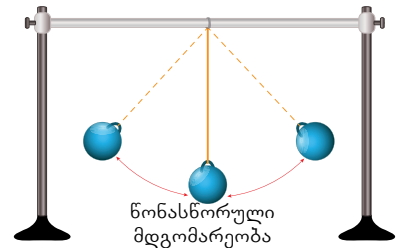
 ჩავატაროთ ცდა. ზამბარა ერთი ბოლოთი შტატივზე ჩამოვკიდოთ, მის ქვედა ბოლოზე რაიმე ტვირთი მივამაგროთ და ფრთხილად დავუშვათ. ზამბარა დაიჭიმება და როდესაც დრეკადობის ძალა მოდულით სიმძიმის ძალას გაუტოლდება, ტვირთი წონასწორობის მდგომარეობაში აღმოჩნდება. თუ ტვირთს ამ მდგომარეობიდან გამოვიყვანთ – ოდნავ ქვევით ჩამოვქაჩავთ და ხელს გავუშვებთ, ის დაიწყებს რხევით მოძრაობას – ზევით-ქვევით, ზევით-ქვევით და ა.შ (სურ. 2.2). დროის განმავლობაში რხევითი მოძრაობა ნელ-ნელა შესუსტდება და ბოლოს ტვირთი გაჩერდება. ზამბარას, მის ერთ ბოლოზე მიმაგრებული ტვირთით, **ზამბარიან ქანქარას** უწოდებენ.

უმარტივესი ქანქარა ძაფზე დაკიდებული ტვირთია. წონასწორობის მდგომარეობაში ძაფი შვეულია და ტვირთზე მოქმედი სიმძიმის ძალა ძაფის დაჭიმულობის ძალითაა განწონასწორებული. თუ ტვირთს გადავხრით და შემდეგ



სურ. 2.2

ხელს გავუშვებთ, მაშინ ის იმოძრავეს მარჯვნივ-მარცხნივ, მარჯვნივ-მარცხნივ და ა.შ., სანამ რხევა არ შეწყდება (სურ. 2.3).



სურ. 2.3

როდესაც ქანქარას ტვირთი, მაგალითად, უკიდურესი მარცხენა მდებარეობიდან უკიდურეს მარჯვენა მდებარეობაში გადადის და უკან, უკიდურეს მარცხენა მდებარეობაში ბრუნდება, ერთი სრული რხევა სრულდება. ზამბარიანი ქანქარას შემთხვევაში ერთი სრული რხევა მაშინ

შესრულდება, როდესაც ტვირთი უკიდურესი ქვედა მდებარეობიდან უკიდურეს ზედა მდებარეობაში ავა და უკან, უკიდურეს ქვედა მდებარეობაში დაბრუნდება.

ნებისმიერი სხვა მოძრაობის მსგავსად, რხევით მოძრაობასაც ახასიათებენ ისეთი ფიზიკური სიდიდეებით, როგორიცაა: მერხევი სხეულის კოორდინატი (წანაცვლება), სიჩქარე, აჩქარება და სხვა. რხევით მოძრაობას, რომლის დროსაც მისი მახასიათებელი ფიზიკური სიდიდეები დროის ტოლი შუალედების შემდეგ ერთსა და იმავე მნიშვნელობებს იღებს, **პერიოდული რხევითი მოძრაობა** ეწოდება.

დროის მინიმალურ შუალედს, რომლის შემდეგ რხევის მახასიათებელი ყველა ფიზიკური სიდიდის მნიშვნელობა მეორდება, რხევის პერიოდი ეწოდება და აღნიშნება T ასოთი:

$$T = \frac{\Delta t}{N},$$

ამ ფორმულაში Δt დროის ის შუალედი, რომლის განმავლობაშიც N რხევა შესრულდა. პერიოდის განმარტებიდან გამომდინარეობს, რომ დროის ამ შუალედში ერთი სრული რხევა სრულდება.

გარდა პერიოდისა, რხევით მოძრაობას ახასიათებენ **რხევის სიხშირით** და მას ν ასოთი აღნიშნავენ. რხევის სიხშირე ტოლია რხევების N რიცხვის შეფარდებისა დროის იმ Δt შუალედთან, რომლის განმავლობაშიც ეს რხევები შესრულდა:

$$\nu = \frac{N}{\Delta t}.$$

რხევის სიხშირე გვიჩვენებს რამდენი სრული რხევა შესრულდა დროის ერთეულში. ცხადია, რხევის სიხშირე და პერიოდი ურთიერთშებრუნებული სიდიდეებია:

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

SI-ში სიხშირის ერთეულია 1 ჰერცი (1ჰც). 1ჰც = წმ⁻¹. ქანქარას რხევის სიხშირე 5 ჰც-ია, ნიშნავს, რომ 1 წმ-ში ის 5 რხევას ასრულებს.

რხევით მოძრაობას კიდევ ერთი ფიზიკური სიდიდით – **რხევის ამპლიტუდით** ახასიათებენ. **რხევის ამპლიტუდა ეწოდება მაქსიმალურ მანძილს, რომლითაც მერხევი სხეული წონასწორობის მდებარეობას დაშორდება.** ამპლიტუდას A ასოთი აღნიშნავენ. ამპლიტუდის განმარტებიდან გამომდინარეობს, რომ მერხევი სხეულის მიერ პერიოდის განმავლობაში გავლილი მანძილი $4A$ -ს ტოლია.

დასკვნები:

- მოძრაობას, რომლის დროსაც სხეული (სხეულთა სისტემა) წონასწორობის მდებარეობიდან ხან ერთ ხან მეორე მხარეს გადაადგილდება, რხევითი მოძრაობა ეწოდება;
- რხევით მოძრაობას, რომლის დროსაც მისი მახასიათებელი ფიზიკური სიდიდეები დროის ტოლი შუალედების შემდეგ ერთსა და იმავე მნიშვნელობებს იღებს, პერიოდული რხევითი მოძრაობა ეწოდება;

- დროის მინიმალურ შუალედს, რომლის შემდეგ რხევის მახასიათებელი ყველა ფიზიკური სიდიდის მნიშვნელობა მეორდება, რხევის პერიოდი ეწოდება:

$$T = \frac{\Delta t}{N};$$
- რხევის სიხშირე ტოლია რხევების N რიცხვის შეფარდებისა დროის იმ Δt შუალედთან, რომლის განმავლობაშიც ეს რხევები შესრულდა: $\nu = \frac{N}{\Delta t};$
- რხევის ამპლიტუდა ეწოდება მაქსიმალურ მანძილს, რომლითაც მერხვეი სხეული ნონასწორობის მდებარეობას დაშორდება.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა თვისებები ახასიათებს რხევით მოძრაობას?
2. მერხვეი სხეულის საწყის მდებარეობაში დაბრუნება ნიშნავს თუ არა აუცილებლად ერთი სრული რხევის შესრულებას?
3. რას გვიჩვენებს რხევის სიხშირე?
4. რამდენი ამპლიტუდის ტოლ მანძილს გაივლის მერხვეი სხეული ერთი სრული რხევის შესრულებისას?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

მერხვემა სხეულმა 1,5 წუთში 225 რხევა შეასრულა. რა მანძილს გაივლის ის 100 წმ-ში, თუ რხევის ამპლიტუდა 8 სმ-ია.

ამოხსნა: პირველ რიგში განვსაზღვროთ რხევის სიხშირე: $\nu = \frac{N}{\Delta t}; \nu = 2,5$ ჰც. რადგან სხეული 1 წმ-ში 2,5 რხევას ასრულებს 100 წმ-ში შესრულებული რხევების რაოდენობა იქნება $N_1 = \nu \cdot t_1 = 250$. რადგან ერთი რხევისას სხეული ოთხი ამპლიტუდის ტოლ მანძილს გადის, შესაბამისად $S = 4AN_1; S = 8000$ სმ = 80 მ.

პასუხი: სხეული 80 მ მანძილს გაივლის.



ამოხსენით ამოცანები:

1. იპოვეთ ქანქარას რხევის პერიოდი, თუ მისი რხევის სიხშირე 0,2 ჰც-ია.
2. იპოვეთ რხევითი მოძრაობის სიხშირე, თუ რხევის პერიოდი 0,25 წმ-ია.
3. რისი ტოლია ქანქარას რხევის პერიოდი, თუ მან 1 წთ-ში 150 რხევა შეასრულა?
4. მერხვემა სხეულმა 300 რხევის შესრულებას 0,5 წთ მოანდომა. რისი ტოლია მისი რხევის სიხშირე?
5. ერთსა და იმავე დროში ერთმა სხეულმა 20 რხევა შეასრულა, მეორემ – 40. იპოვეთ პირველი სხეულის რხევის პერიოდი, თუ მეორე სხეულის რხევის პერიოდი 1,5 წმ-ია.
6. ერთსა და იმავე დროში ერთმა სხეულმა 10 რხევა შეასრულა, მეორემ – 30. იპოვეთ პირველი სხეულის რხევის პერიოდი თუ მეორე სხეულის რხევის სიხშირე 6 ჰც-ია.
7. ერთმა სხეულმა 2 წთ-ში 60 რხევა შეასრულა. რამდენ რხევას შეასრულებს მეორე სხეული 3 წთ-ში, თუ მისი რხევის სიხშირე პირველისას 2-ჯერ აღემატება?
8. მერხვეი სხეულის რხევის ამპლიტუდა A -ს ტოლია. რა მანძილს გაივლის სხეული 5 რხევის შესრულებისას?
9. მერხვეი სხეულის რხევის ამპლიტუდა 2 სმ-ია. რა მანძილს გაივლის სხეული 10 წმ-ის განმავლობაში, თუ მისი რხევის სიხშირე 50 წმ⁻¹-ის ტოლია.
10. მერხვემა სხეულმა 5 წუთში 600 მ მანძილი გაიარა. იპოვეთ სხეულის რხევის პერიოდი, თუ მისი რხევის ამპლიტუდა 0,5 მ-ია.

§ 2.2 თავისუფალი და იძულებითი რხევები. ჰარმონიული რხევა

წინა პარაგრაფში თქვენ გაეცანით ორ მაგალითს, რომლებშიც რხევითი მოძრაობა ხორციელდებოდა სხეულის წონასწორული მდგომარეობიდან გამოყვანის შემდეგ, თავისთავად, გარედან ზემოქმედების გარეშე. ასეთი სხეულები და სხეულთა სისტემები, საკმაოდ ხშირად გვხვდება ყოფა-ცხოვრებაში, ბუნებასა და ტექნიკაში. რა პირობები უნდა შესრულდეს, რომ სხეულთა სისტემაში რხევები თავისთავად წარმოებდეს?

ვიდრე ამ კითხვას პასუხს გავცემთ, გავიხსენოთ:



- სისტემაში შემავალ სხეულებს შორის მოქმედ ძალებს, შიდა ძალები ეწოდება;
- გარეშე სხეულების მხრიდან სისტემაში შემავალ სხეულებზე მოქმედ ძალებს, გარე ძალები ეწოდება;
- სხეულის წონასწორობას მდგრადი ეწოდება, თუ წონასწორობის მდებარეობიდან მცირე გადახრისას სხეული კვლავ ამ მდებარეობას უბრუნდება.

რხევებს, რომლებიც სისტემის წონასწორობის მდებარეობიდან გამოყვანის შემდეგ სისტემის შიდა ძალების მოქმედებით მიმდინარეობს, თავისუფალი რხევები ეწოდება.

სხეულთა სისტემას, რომელშიც შეიძლება თავისუფალი რხევები აღიძვრას, **მერხევ სისტემას** უწოდებენ.

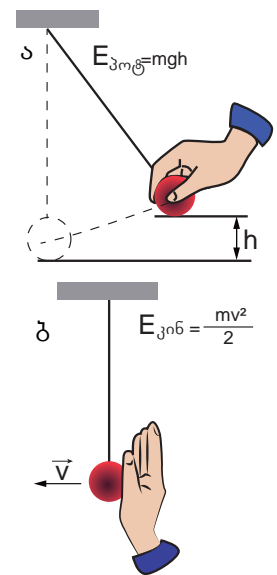
თავისუფალი რხევები შეუძლია შეასრულოს ძაფზე დაკიდებულმა ბურთულამ. ამ შემთხვევაში მერხევი სისტემა შედგება ბურთულის, ძაფისა და დედამიწისაგან. შემდეგ პარაგრაფებში ნახავთ, რომ თავისუფალი რხევების სიხშირე თვით მერხევი სისტემის თვისებებით განისაზღვრება.

იმისათვის, რომ სისტემაში თავისუფალი რხევები აღიძვრას, უნდა შესრულდეს შემდეგი პირობები: სისტემას უნდა გააჩნდეს მდგრადი წონასწორობის მდგომარეობა; მას უნდა გადაეცეს დამატებითი ენერჯია (სურ. 2.4 ა,ბ); სისტემაში წინააღმდეგობის ძალები უნდა იყოს ძალიან მცირე, რადგან წინააღმდეგ შემთხვევაში რხევა სწრაფად მიიღევა, ან საერთოდ არ აღიძვრება.

ვინაიდან სისტემაში ყოველთვის მოქმედებს წინააღმდეგობის ძალები, დროთა განმავლობაში თავისუფალი რხევები მიიღევა. შიდა და წინააღმდეგობის ძალების მოქმედებით მერხევი სისტემა **მიღევა რხევებს** ასრულებს. რხევები არამიღევად ხასიათს მიიღებს, თუ სისტემაზე გარე პერიოდული ძალით ვიმოქმედებთ, მაგალითად, საქანელას რხევის შენელების დროს, მას ხელს ვუბუძვებთ. მუდმივი გარე ძალა რხევების მიმდინარეობას ვერ უზრუნველყოფს, რადგან ასეთ ძალას მხოლოდ წონასწორობის მდგომარეობის ცვლილება შეუძლია.

რხევებს, რომელიც სისტემაში გარე პერიოდულად ცვალებადი ძალის მოქმედებით მიმდინარეობს, იძულებითი რხევები ეწოდება.

აუცილებელი არ არის, რომ იძულებით რხევებს მერხევი სისტემა ასრულებდეს. არსებობს სისტემები, რომლებშიც რხევები მხოლოდ მაშინ მიმდინარეობს, როდესაც მასზე პერიოდულად ცვლადი გარე ძალა მოქმედებს. მაგალითად, თუ კარი პერიოდულად გავაღებთ და დავკეტავთ, ის რხევით მოძრაობას შეასრულებს, მაგრამ კარი თავისთავად რხევას ვერ შეასრულებს. ასეთივე იძულებით რხევით მოძრაობას ასრულებს საკერავი მანქანის ნემსი, შიგანვის ძრავას დგუში (სურ. 2.5 ა, ბ) და სხვა. იძულებითი რხევის სიხშირე გარე ძალის ცვლილების სიხშირის ტოლია და მიმდინარეობს მანამ, სანამ გარე ძალა მოქმედებს.



სურ. 2.4

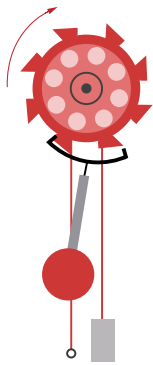


სურ. 2. 5

არსებობს ისეთი სისტემებიც, რომლებშიც არამილევადი რხევები პერიოდულად ცვალებადი გარე ძალების მოქმედებით კი არ მიმდინარეობს, არამედ სისტემის უნარით, თვითრეგულირებით შეივსოს ენერგია უწყვეტი (არაპერიოდული) ენერგიის წყაროდან.

არამილევად რხევებს, რომლებიც ენერგიის უწყვეტი წყაროდან თვითრეგულირებადი შევსებით მიმდინარეობს, ავტორხევები ეწოდება.

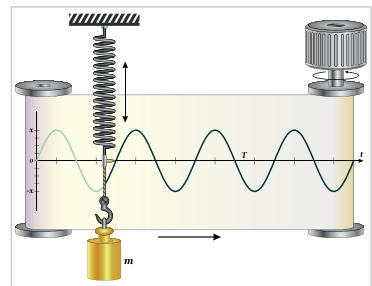
ავტორხევების მაგალითია ქანქარიანი საათის მექანიზმის მუშაობა (სურ. 2.6). ისევე, როგორც თავისუფალი რხევების სიხშირე, ავტორხევების სიხშირეც სისტემის თვისებებით განისაზღვრება. პრაქტიკულად ყველა ავტომერხვე სისტემაში შეიძლება გამოვყოთ სამი ელემენტი: მერხვეი სისტემა, ენერგიის წყარო და უკუკავშირის მოწყობილობა, რომელიც მერხვე სისტემაზე ენერგიის პორციებად მიწოდებას უზრუნველყოფს.



სურ. 2. 6

რხვეითი მოძრაობის აღწერისათვის უპირველესად საჭიროა შევისნავლოთ მერხვეი სხეულის კოორდინატის (წანაცვლების) დროზე დამოკიდებულება. ჩვეულებრივ, საკოორდინატო Ox ღერძს მერხვეი სხეულის ტრანექტორიის გასწვრივ ავლებენ, ხოლო კოორდინატთა სათავეს წონასწორულ მდებარეობას ამთხვევენ. $x(t)$ დამოკიდებულების მიხედვით, რხევა შეიძლება იყოს ჰარმონიული და არაჰარმონიული.

ავაგოთ ზამბარაზე დაკიდებული ტვირთის რხევის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი. ამისათვის ზამბარას ქვედა ბოლოზე მარკერი ისე მივამაგროთ, რომ მისი წვერი გაჭიმულ ქაღალდის რულონს ეხებოდეს (სურ. 2.7). თუ ტვირთს რხევით მოძრაობაში მოვიყვანთ და ქაღალდს რხევის მართობულად მუდმივი სიჩქარით ავამოძრავებთ, მარკერი კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების მრუდს დახაზავს. ეს დანადგარი წარმოადგენს უმარტივეს ოსცილოგრაფს – რხევების ჩამწერ ხელსაწყოს. მრუდს, რომელსაც ჩანერს ოსცილოგრაფი, ოსცილოგრამას უწოდებენ. ჩვენ შემთხვევაში ოსცილოგრამა სინუსოიდა (კოსინუსოიდა) იქნება.



სურ. 2.7

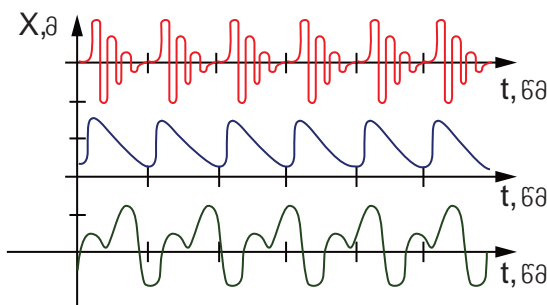
რხევებს, რომლის დროსაც მერხვეი სხეულის კოორდინატი დროის მიხედვით სინუსის ან კოსინუსის კანონით იცვლება, ჰარმონიული რხევები ეწოდება.

მათემატიკურად ჰარმონიული რხევების კოორდინატის დროზე დამოკიდებულება შემდეგი განტოლებებით აღინერება:

$$x = A\sin(\omega t + \varphi_0) \quad \text{ან} \quad x = A\cos(\omega t + \varphi_0).$$

ეს ფორმულები ჰარმონიული რხევისას სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულებას აღწერს.

არაჰარმონიული რხევების შემთხვევაში კოორდინატის დროზე დამოკიდებულება უფრო რთულია. სურ. 2.8-ზე მოცემულია ამ დამოკიდებულების რამდენიმე მაგალითი.



სურ. 2.8

გავარკვიოთ, რა ფიზიკური სიდიდეები შედის ჰარმონიული რხევის განტოლებებში. რადგან სინუსისა და კოსინუსის ფუნქციის მაქსიმალური მნიშვნელობა ერთის ტოლია, ამიტომ A კოორდინატის (წანაცვლების) მაქსიმალური მნიშვნელობა, ანუ რხევის ამპლიტუდაა. $\varphi = \omega t + \varphi_0$ სიდიდეს მერხევი სხეულის **ფაზას** უწოდებენ. ფაზა განსაზღვრავს სხეულის მექანიკურ მდგომარეობას დროის მოცემულ მომენტში. φ_0 რხევის **საწყისი ფაზა**, ანუ მერხევი სხეულის ფაზა დროის საწყის $t = 0$ მომენტში; სინუსი და კოსინუსი პერიოდული ფუნქციებია 2π უმცირესი პერიოდით, ამიტომ $\sin(\omega t + \varphi_0) = \sin(\omega t + \varphi_0 + 2\pi)$. ვინაიდან, რხევის მახასიათებელი სიდიდეები T დროის შემდეგ მეორდება, ამიტომ $\sin(\omega t + \varphi_0 + 2\pi) = \sin(\omega(t + T) + \varphi_0)$, ანუ, $\omega t + \varphi_0 + 2\pi = \omega t + \omega T + \varphi_0$, საიდანაც $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$. ამ სიდიდეს **ციკლური სიხშირე** ეწოდება. როგორც იცით, რხევის ν სიხშირე 1 წმ-ში შესრულებულ რხევათა რიცხვს გვიჩვენებს, ამიტომ ციკლური ω სიხშირე რიცხობრივად 2π წმ-ში შესრულებული რხევათა რიცხვის ტოლი იქნება.

თუ დროის საწყის მომენტში სხეული დადებითი მიმართულებით მაქსიმალურადაა წანაცვლებული (სურ. 2.9 ა), მაშინ რხევის განტოლება უმჯობესია ჩაინეროს შემდეგნაირად:

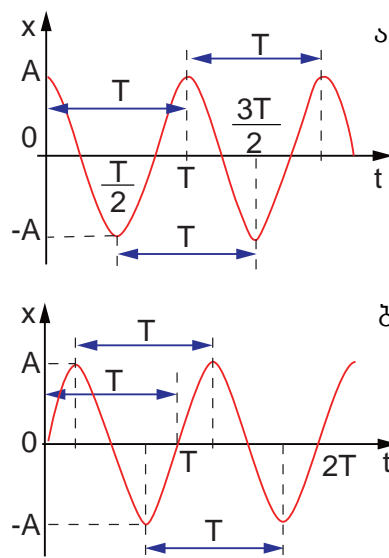
$$x = A \cos \omega t.$$

იმ შემთხვევაში კი, როდესაც დროის საწყის მომენტში სხეული წონასწორობის მდებარეობაშია (სურ. 2.9 ბ), რხევის განტოლება მოსახერხებელია ამ სახით ჩაწეროთ:

$$x = A \sin \omega t.$$

ჰარმონიული რხევის დროს არა მარტო სხეულის კოორდინატი, არამედ მისი სიჩქარეც და აჩქარებაც ჰარმონიულად იცვლება და მათი მაქსიმალური (ამპლიტუდური) მნიშვნელობები შემდეგი ფორმულებით გამოითვლება:

$$v_{\text{მაქს}} = \omega A; \quad a_{\text{მაქს}} = \omega^2 A.$$



სურ. 2.9

დასკვნები:

- რხევებს, რომლებიც მიმდინარეობს სისტემის წონასწორობის მდგომარეობიდან გამოყვანის შემდეგ სისტემის შიდა ძალების მოქმედებით, თავისუფალი რხევები ეწოდება;
- სხეულთა სისტემას, რომელშიც შეიძლება თავისუფალი რხევები აღიძვრას, მერხვე სისტემას უწოდებენ;
- რხევებს, რომელიც სისტემაში გარე პერიოდულად ცვალებადი ძალის მოქმედებით მიმდინარეობს, იძულებითი რხევები ეწოდება;
- არამილევად რხევებს, რომლებიც ენერგიის უწყვეტი წყაროდან თვითრეგულირებადი შევსებით მიმდინარეობს, ავტორხევები ეწოდება;
- რხევებს, რომლის დროსაც მერხვეი სხეულის კოორდინატი დროის მიხედვით სინუსის ან კოსინუსის კანონით იცვლება, ჰარმონიული რხევები ეწოდება.
- ჰარმონიული რხევების დროს კოორდინატის დროზე დამოკიდებულება შემდეგი განტოლებებით აღინერება: $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$ ან $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$.

საკონტროლო კითხვები:

1. როდის ასრულებს სისტემა მილევად რხევებს?
2. რას განსაზღვრავს რხევის ფაზა?
3. რას გვიჩვენებს რხევის ციკლური სიხშირე?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

მერხვეი სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების განტოლებას აქვს შემდეგი სახე: $x=0,14\sin(2\pi t + \frac{\pi}{4})$. დაადგინეთ რხევის სანყისი ფაზა, კოორდინატი დროის ათვლის დასაწყისში და სხეულის მაქსიმალური აჩქარება. ფორმულაში შემავალი ყველა სიდიდე SI ერთეულებშია გაზომილი.

ამოხსნა: როგორც იცით, სანყისი ფაზა ეწოდება სინუსის ან კოსინუსის არგუმენტს დროის ათვლის დასაწყისში, ანუ $t=0$ მომენტში, ამიტომ $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$. კოორდინატი $t=0$ მომენტში იქნება: $x_0 = 0,14 \sin \frac{\pi}{4}$, $x_0 \approx 0,1$ მ. მაქსიმალური აჩქარების გამოსათვლელი ფორმულის თანახმად $a_{\text{მაქს}} = A\omega^2$. თუ გავითვალისწინებთ, რომ $\omega = 2\pi$ და მივიჩნევთ, რომ $\pi^2 \approx 10$, მაშინ $a_{\text{მაქს}} = 0,14 \cdot 4\pi^2 = 5,6$ მ/წმ².

პასუხი: $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$; $x_0 \approx 0,1$ მ; $a_{\text{მაქს}} \approx 5,6$ მ/წმ².



ამოხსენით ამოცანები:

1. გამოთვალეთ ჰარმონიულად მერხვეი სისტემის ციკლური სიხშირე, თუ მისი რხევის პერიოდი 2 წმ-ის ტოლია.
2. იპოვეთ სისტემის რხევის ციკლური სიხშირე, თუ 10 წმ-ში ის 50 რხევას ასრულებს.

3. ჰარმონიულად მერხევი სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულება $x=0,5\sin\pi t$ განტოლებითაა მოცემული. განსაზღვრეთ რხევის ამპლიტუდა და სიხშირე. ფორმულაში შემავალი ყველა სიდიდე SI ერთეულებშია გაზომილი.

4. მერხევი სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულებას აქვს შემდეგი სახე: $x=0,2\sin 20\pi t$. განსაზღვრეთ, რა მანძილს გაივლის ეს სხეული 15 წმ-ში. ფორმულაში შემავალი ყველა სიდიდე SI ერთეულებშია გაზომილი.

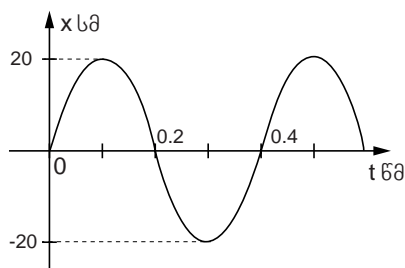
5. შეადგინეთ ჰარმონიულად მერხევი სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების განტოლება, თუ მისი რხევის პერიოდი და ამპლიტუდა, შესაბამისად 0,5 წმ და 10 სმ-ია. მიიჩნიეთ, რომ დროის ათვლის დასაწყისში სხეული წონასწორობის მდებარეობიდან დადებითი მიმართულებით მაქსიმალურადაა გადახრილი.

6. მერხევი სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების განტოლებას აქვს შემდეგი სახე: $x=0,4\sin(2\pi t + \frac{\pi}{4})$. დაადგინეთ რხევის სანყისი ფაზა და 1 წთ-ში შესრულებული რხევების რაოდენობა. ფორმულაში შემავალი ყველა სიდიდე SI ერთეულებშია გაზომილი.

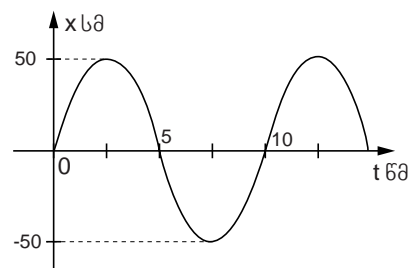
7. მერხევი სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების განტოლებას აქვს შემდეგი სახე: $x=0,1\sin 10\pi t$. გამოთვალეთ რხევისას სხეულის მაქსიმალური სიჩქარე და აჩქარება. ფორმულაში შემავალი ყველა სიდიდე SI ერთეულებშია გაზომილი.

8. მერხევი სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების განტოლებას აქვს შემდეგი სახე: $x=0,25\sin(\pi t + \frac{\pi}{2})$. განსაზღვრეთ, სხეულის კოორდინატი დროის სანყის მომენტიდან და ამ მომენტიდან 3 წმ-ის შემდეგ. ფორმულაში შემავალი ყველა სიდიდე SI ერთეულებშია გაზომილი.

9. სურ. 2.10-ზე გამოსახულია მერხევი სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი. იპოვეთ სხეულის მაქსიმალური სიჩქარე და აჩქარება.



სურ. 2.10




სურ. 2.11

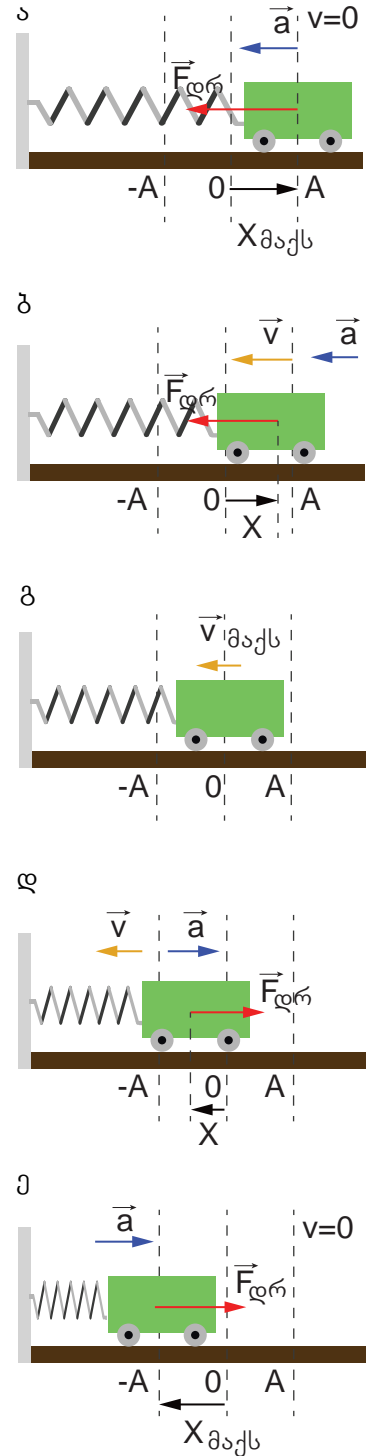
10. სურ. 2.11-ზე გამოსახულია მერხევი სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი. დაწერეთ სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების განტოლება და იპოვეთ კოორდინატის მნიშვნელობა დროის სანყისი მომენტიდან 35 წმ-ის შემდეგ.

§ 2.3 ზამბარიანი ქანქარა

რხევითი სისტემები მრავალგვარია, მაგრამ ორი მათგანი – ზამბარიანი და მათემატიკური ქანქარა, ჯერ კიდევ საუკუნეების წინ გალილეო გალილემ და ქრისტინან ჰიუგენსმა შეისწავლეს და აღწერეს. ამ პარაგრაფში ზამბარიან ქანქარას განვიხილავთ.

 ჩავატაროთ ცდა. ზამბარის ერთი ბოლო მივამაგრებთ კედელს, მეორე კი – ურიკას, რომელიც გლუვ პორიზონტალურ ზედაპირზეა მოთავსებული. თუ ურიკას წონასწორობის მდებარეობიდან ოდნავ მარჯვნივ გადავწევთ, ზამბარის სიგრძე $x_{მაქს}$ -ით მოიმატებს და ის ურიკაზე დრეკადობის ძალით იმოქმედებს (სურ. 2.12 ა). ჰუკის კანონის თანახმად, ეს ძალა დეფორმაციის სიდიდის პროპორციულია და მიმართულია მარცხნივ. როდესაც ურიკას ხელს გავუშვებთ, ის მზარდი სიჩქარით, აჩქარებულად მარცხნივ დაიწყებს მოძრაობას (სურ. 2.12 ბ). ამ დროს დრეკადობის ძალის მოდული, დეფორმაციის შემცირების გამო, თანდათან იკლებს. წონასწორობის მდებარეობის გავლის მომენტი ზამბარის დრეკადობის ძალა ნულის ტოლი გახდება. შესაბამისად, ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად, ურიკის აჩქარებაც ნულს გაუტოლდება. ამ მომენტისათვის ურიკის სიჩქარის მოდული მაქსიმალურ მნიშვნელობას მიაღწევს (სურ. 2.12 გ), ურიკა წონასწორობის მდებარეობაში არ გაჩერდება და ინერციით მარცხნივ მოძრაობას გააგრძელებს. შედეგად, ზამბარა შეკუმშვას დაიწყებს და მასში აღიძვრება მარჯვნივ მიმართული დრეკადობის ძალა, რომელიც ურიკის დამუხრუჭებას გამოიწვევს (სურ. 2.12 დ). ამ ძალის და, შესაბამისად, მარჯვნივ მიმართული აჩქარების მოდული x წანაცვლების მოდულის პირდაპირპროპორციულად გაიზრდება. ამ დროს სიჩქარის მოდული თანდათან მცირდება, ვიდრე კიდურა მარცხენა მდებარეობაში ნულს არ გაუტოლდება (სურ. 2.12 ე). ამ მომენტი წანაცვლების, დრეკადობის ძალისა და აჩქარების მოდულები მაქსიმალურია, რხევის დაწყებიდან კი პერიოდის ნახევარია გასული. პერიოდის მეორე ნახევრის განმავლობაში ურიკას მოძრაობის ხასიათი იგივე დარჩება, შეიცვლება მხოლოდ მოძრაობის მიმართულება. პერიოდის $3/4$ -ის გავლის შემდეგ ურიკა კვლავ გავლის წონასწორობის მდებარეობის წერტილს მაქსიმალური სიჩქარით და ინერციით გააგრძელებს მოძრაობას კიდურა მარჯვნივ მდებარეობამდე, სადაც მისი სიჩქარე ნულს გაუტოლდება. შედეგად, შესრულდება ერთი სრული რხევა. ამის შემდეგ მთელი პროცესი გამეორდება.

ზამბარიანი ქანქარას რხევისას მთავარი ისაა, რომ მთელი პროცესის განმავლობაში დრეკადობის ძალა წონასწორობის მდგომარეობისაკენ, ანუ წანაცვლების საწინააღმდეგოდაა მიმართული. სწორედ დრეკადობის ძალა



სურ. 2.12

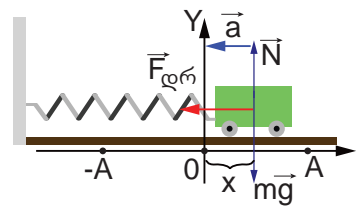
განაპირობებს რხევითი მოძრაობის განმეორებადობას. ის მერხევი სისტემის შიდა ძალას წარმოადგენს.

წინააღმდეგობის ძალები რომ არ ყოფილიყო, ურიკის რხევითი მოძრაობა არ შეწყდებოდა, მაგრამ ხახუნის და ჰაერის წინააღმდეგობის გამო ურიკის რხევის ამპლიტუდა ნელ-ნელა შემცირდება და საბოლოოდ ურიკა გაჩერდება. მცირე ხახუნის შემთხვევაში რხევა მხოლოდ ურიკას მრავალი რხევის შესრულების შემდეგ მიიღევა. თუ ურიკას მოძრაობას მცირე დროის განმავლობაში განვიხილავთ, წინააღმდეგობის ძალები შეიძლება არ გავითვალისწინოთ და რხევის მიღევა უგულებელვყოთ. ასევე მივიჩნიოთ, რომ ზამბარის მასა ბევრად მცირეა ურიკას მასაზე. რხევითი მოძრაობის აღწერისას სწორედ ამ დაშვებებს გამოვიყენებთ.

ზამბარიანი ქანქარას რხევის რაოდენობრივი აღწერისათვის გამოვიყენოთ ნიუტონის მეორე კანონი:

$$\vec{F}_{\text{დრ}} = m\vec{a}, \quad (1)$$

რომელშიც m ურიკას მასაა. ურიკაზე მოქმედი სიმძიმის და საყრდენის რეაქციის ძალები ერთმანეთს ანონანორებს. კოორდინატა OX ღერძი მარჯვნივ მივმართოთ, სათავე კი წონასწორობის მდებარეობის წერტილს დავამთხვიოთ (სურ. 2.13). OX ღერძზე (1) ტოლობის დაგეგმილებით მივიღებთ:



სურ. 2.13

$$F_{\text{დრ}x} = ma_x. \quad (2)$$

ჰუკის კანონის თანახმად, დრეკადობის ძალის $F_{\text{დრ}x}$ გეგმილი პირდაპირპროპორციულია წანაცვლების, რომელიც ურიკას კოორდინატის ტოლია. ამასთან, დრეკადობის ძალის გეგმილს და ურიკას კოორდინატს საპირისპირო ნიშნები აქვს:

$$F_{\text{დრ}x} = -kx, \quad (3)$$

რომელშიც k ზამბარის სიხისტეა. (3)-ის (2)-ში ჩასმით გვექნება:

$$ma_x = -kx,$$

საიდანაც,

$$a_x = -\frac{k}{m}x. \quad (4)$$

რადგან კონკრეტული ზამბარიანი ქანქარასათვის $\frac{k}{m}$ ფარდობა არ იცვლება, შეგვიძლია დავასკვნათ:

ზამბარიანი ქანქარას აჩქარების a_x გეგმილი პირდაპირპროპორციულია კოორდინატის, აღებულის შებრუნებული ნიშნით.

დადგენილია, რომ აჩქარების გეგმილის კოორდინეტზე დამოკიდებულება ციკლური სიხშირით გამოისახება შემდეგნაირად:

$$a_x = -\omega^2x. \quad (5)$$


(4) და (5) ტოლობების შედარებით მივიღებთ:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (6)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $T = 2\pi/\omega$, მივიღებთ ზამბარიანი ქანქარას პერიოდის ფორმულას:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (7)$$

როგორც ამ ფორმულიდან ჩანს, ზამბარიანი ქანქარას პერიოდი მხოლოდ მერხვეი სისტემის – „სხეული – ზამბარა“ მახასიათებელი სიდიდეებით განისაზღვრება.

 როგორ განსაზღვრავდით სხეულის მასას კოსმოსურ ხომალდზე უწონობაში ყოფნისას?

ვერტიკალურ ზამბარაზე დაკიდებული ტვირთის რხევის შესწავლა შედარებით რთულია. ამ რხევისას სხეულის აჩქარება ცვლადი დრეკადობის ძალითა და მუდმივი სიმძიმის ძალითაა გამოწვეული, მაგრამ რხევის ხასიათი ისეთივეა, როგორც ქანქარას ჰორიზონტალური რხევისას. სწორედ ამიტომ, მიღებული ფორმულები შეგვიძლია ვერტიკალურად მერხვეი ქანქარასთვისაც გამოვიყენოთ.

დასკვნები:

- ზამბარიანი ქანქარას აჩქარების a_x გეგმილი პირდაპირპროპორციულია კოორდინატის, აღებული შებრუნებული ნიშნით;
- ზამბარიანი ქანქარას რხევის ციკლური სიხშირე და პერიოდი გამოისახება ფორმულებით: $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$, $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$.

საკონტროლო კითხვები:

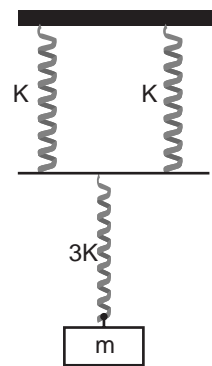
1. რა მიმართულება აქვს დრეკადობის ძალას ზამბარიანი ქანქარას რხევისას?
2. როგორ შეიცვლება ზამბარიანი ქანქარას რხევის პერიოდი სხეულის მასის გაზრდით? ზამბარის სიხისტის შემცირებით?

ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

დაადგინეთ სურ. 2.14-ზე გამოსახული სისტემის თავისუფალი რხევების პერიოდი, თუ $k=60$ ნ/მ და $m=2$ კგ.

ამოხსნა: მეცხრე კლასის ფიზიკის კურსიდან იცით, როდესაც სისტემა პარალელური ზამბარებისაგან შედგება, მისი სიხისტე, ცალკეული ზამბარის სიხისტეთა ჯამის ტოლია: $k_1=2k=120$ ნ/მ. ზამბარების მიმდევრობით გადაბმისას კი, სისტემის სიხისტის შებრუნებული სიდიდე, ზამბარების სიხისტეების შებრუნებული სიდიდეების ჯამის ტოლია: $\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$ შესაბამისად, $k=72$ ნ/მ. თუ სიხისტის ამ მნიშვნელობას პერიოდის გამოსათვლელ $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ ფორმულაში ჩავსვამთ, მივიღებთ: $T = \frac{\pi}{3}$ წმ.

პასუხი: სისტემის რხევის პერიოდი მიახლოებით 1,05 წმ-ია.

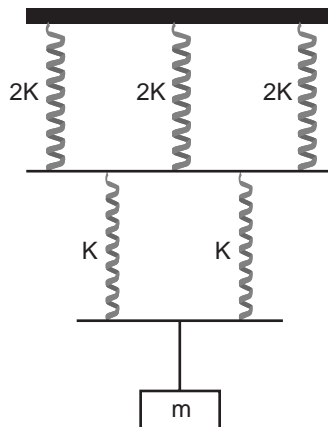


სურ. 2.14



ამოხსენით ამოცანები:

1. ჰორიზონტალური ზამბარის ერთი ბოლო კედელზე უძრავადაა დამაგრებული, მეორე ბოლოზე კი მიმაგრებულია სხეული, რომელსაც გლუვ ჰორიზონტალურ ზედაპირზე შეუძლია სრიალი. ზამბარა მის გასწვრივ მიმართული ძალის მოქმედებით შეკუმშეს და შემდეგ გაათავისუფლეს. აღწერეთ მექანიკური ენერჯის გარდაქმნები, რომელსაც ადგილი აქვს სისტემის ერთი რხევისას.
2. 200 ნ/მ სიხისტის ზამბარაზე მიმაგრებული 50 გ მასის სხეული ასრულებს ჰარმონიულ რხევებს. გამოთვალეთ სხეულის აჩქარების მოდული იმ მომენტში, როდესაც ის წონასწორობის მდებარეობიდან 2 სმ-ითაა წანაცვლებული.
3. 100 ნ/მ სიხისტის ზამბარაზე მიმაგრებულია 0,1 კგ მასის სხეული. განსაზღვრეთ ამ სისტემის თავისუფალი რხევების პერიოდი.
4. ზამბარისა და მასზე დაკიდებული 400 გ მასის სხეულის თავისუფალი რხევის სიხშირე 5 ჰც-ია. გამოთვალეთ ზამბარის სიხისტე.
5. ზამბარისა და მასზე მიმაგრებული 50 გ მასის სხეულის თავისუფალი რხევების სიხშირე 12 ჰც-ია. რისი ტოლი იქნება რხევის სიხშირე, თუ სხეულს 200 გ მასის სხეულით შევცვლით?
6. K სიხისტის ზამბარისა და მასზე ჩამოკიდებული m მასის სხეულის თავისუფალი რხევის პერიოდი T -ს ტოლია. რისი ტოლი იქნება სისტემის რხევის პერიოდი, თუ ზამბარას შუაზე გავჭრით და მასზე $2m$ მასის სხეულს დავკიდებთ?
7. სხეულის ზამბარაზე დაკიდებისას ის 10 სმ-ით გაჭიმა. იპოვეთ ამ სისტემის თავისუფალი რხევების სიხშირე.
8. ზამბარიანი ქანქარა 500 ნ/მ სიხისტის ზამბარისა და მის ბოლოზე მიმაგრებული 0,5 კგ მასის სხეულისაგან შედგება. განსაზღვრეთ ქანქარას რხევისას სხეულის მიერ 62 წამის განმავლობაში გავლილი მანძილი, თუ რხევის ამპლიტუდა 8 სმ-ია.
9. 10 ნ/მ სიხისტის ზამბარაზე მიმაგრებულია 100 გ მასის სხეული. გამოთვალეთ ამ სისტემის თავისუფალი რხევისას სხეულის მაქსიმალური სიჩქარე და აჩქარება, თუ რხევის ამპლიტუდა 2 სმ-ია.
10. დაადგინეთ სურ. 2.15-ზე გამოსახული სისტემის თავისუფალი რხევების პერიოდი, თუ $K=400$ ნ/მ და $m=1$ კგ.



სურ. 2.15

§ 2.4 მათემატიკური ქანქარა

ნებისმიერი სხეული, რომელიც ისეა ჩამოკიდებული, რომ მისი სიმძიმის ცენტრი დაკიდების წერტილის ქვევით მდებარეობს, ქანქარას წარმოადგენს. ასეთ სხეულს **ფიზიკურ ქანქარას** უწოდებენ (სურ. 2.16). როდესაც სხეულის სიმძიმის ცენტრზე გავლებული ვერტიკალი დაკიდების წერტილზე გადის, ქანქარა წონასწორულ მდგომარეობაშია. თუ ქანქარას ვუბიძგებთ, ან გადავხრით ვერტიკალური მდგომარეობიდან და გავათავისუფლებთ, ის დაიწყებს რხევას – წონასწორული მდებარეობიდან ხან ერთ, ხან მეორე მხარეს გადაიხრება. ამის მაგალითია საქანელა (სურ. 2.17). მისი რხევის შესწავლა მარტივი არ არის, ვინაიდან რხევების მახასიათებელ სიდიდეებს განსაზღვრავს საქანელას და თოკის ზომები, ფორმა და სხვა ფაქტორები.



სურ. 2.16

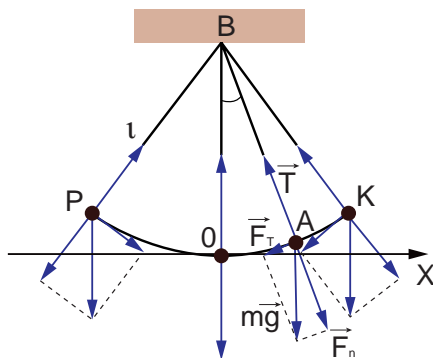


სურ. 2.17

იმისათვის, რომ სხეულის ზომებს რხევების მახასიათებელ სიდიდეებზე დიდი გავლენა არ ჰქონდეს, საჭიროა თოკის სიგრძე ბევრად მეტი იყოს სხეულის ზომებზე, თოკის მასა კი, სხეულის მასასთან შედარებით – უმნიშვნელო. ასეთ შემთხვევაში სხეული შეიძლება ნივთიერ წერტილად მივიჩნიოთ, ხოლო თოკის მასა უგულებელვყოთ. რხევისას სხეული დაკიდების წერტილიდან ყოველთვის ერთ მანძილზე რომ იყოს, საჭიროა თოკის სიგრძე არ იცვლებოდეს, ანუ ის უჭიმვადი იყოს. ასე მივიღებთ ქანქარას ფიზიკურ მოდელს – მათემატიკურ ქანქარას.

მათემატიკური ქანქარა მერხვეი სისტემის მოდელია, რომელიც გრავიტაციულ ველში მოთავსებულ უწონო და უჭიმვად ძაფზე დაკიდებულ ნივთიერ წერტილის წარმოადგენს.

ავილოთ მცირე ზომის, მაგრამ საკმაოდ მძიმე ბურთულა და დავკიდოთ გრძელ უჭიმვად თოკზე. ასეთი ქანქარა შეიძლება მათემატიკურ ქანქარად მივიჩნიოთ. თუ ბურთულას წონასწორობის მდებარეობიდან გადავხრით და ხელს გავუშვებთ, მაშინ სიმძიმის ძალისა და თოკის დაჭიმულობის ძალების მოქმედებით ის რხევას დაიწყებს. როდესაც ჰაერის წინააღმდეგობის ძალა უმნიშვნელოა, შეიძლება მივიჩნიოთ, რომ გარკვეული დროის განმავლობაში რხევის ამპლიტუდა არ მცირდება და ადგილი აქვს თავისუფალ რხევას.



სურ. 2.18

მერხვე ბურთულაზე მოქმედებს ორი ძალა: ვერტიკალურად ქვევით მიმართული სიმძიმის $m\vec{g}$ ძალა და თოკის გასწვრივ მიმართული დაჭიმულობის \vec{T} ძალა (სურ. 2.18). სიმძიმის ძალა დავშალოთ ორ მდგენელად: თოკის გასწვრივ მიმართულ \vec{F}_n და მის მართობ, ტრანექტორიის მხების გასწვრივ მიმართულ \vec{F}_τ ძალად:

$$\vec{F}_n + \vec{F}_\tau = m\vec{g}.$$

თოკის დაჭიმულობის \vec{T} ძალა და სიმძიმის ძალის \vec{F}_n მდგენელი ბურთულას სიჩქარის მართობულადაა მიმართული და მას ცენტრისკენულ აჩ-

ქარებას ანიჭებს. ეს აჩქარება ქანქარას ტრაექტორიის – წრენიის რკალის ცენტრისკენაა მიმართული. ამ ძალების მიერ შესრულებული მუშაობა ნულის ტოლია და ამიტომ ისინი ქანქარას სიჩქარის მოდულს არ ცვლის. მათი მოქმედება მხოლოდ სიჩქარის ვექტორის მიმართულებას ცვლის – სიჩქარე ყოველთვის ტრაექტორიის მხების გასწვრივაა მიმართული. სიმძიმის ძალის მეორე \vec{F}_r მდგენელის მოქმედებით ქანქარა რკალის გასწვრივ მზარდი სიჩქარით იწყებს ქვევით მოძრაობას. ქანქარას მოძრაობისას წონასწორობის მდებარეობისაკენ მიმართული ამ მდგენელის მოდული მცირდება და წონასწორობის მდებარეობის გავლისას ნულს უტოლდება. ამ მომენტში ქანქარას სიჩქარე მაქსიმალურია (Oწერტილი), ის ინერციით აგრძელებს მოძრაობას და მეორე მხარეს ტრაექტორიის უმაღლეს P წერტილში ადის. ამ დროს ისევ ჩნდება \vec{F}_r მდგენელი, რომელიც უკვე მოძრაობის საწინააღმდეგოდ არის მიმართული და ამიტომ ქანქარას სიჩქარე შემცირებას დაიწყებს. ქანქარას გაჩერების მომენტში, ტრაექტორიის უმაღლეს წერტილში \vec{F}_r -ს მოდული მაქსიმალური იქნება და ქანქარას საწინააღმდეგოდ მიმართულებით მოძრაობას დაიწყებინებს. ამ მომენტისათვის რხევის დაწყებიდან პერიოდის ნახევარი იქნება გასული. პერიოდის მეორე ნახევარში ქანქარას მოძრაობის ხასიათი იგივე დარჩება, შეიცვლება მხოლოდ მოძრაობის მიმართულება. პერიოდის 3/4-ის გასვლის შემდეგ ქანქარა მაქსიმალური სიჩქარით კვლავ გაივლის წონასწორობის მდებარეობის წერტილს და ინერციით გააგრძელებს მოძრაობას კიდურა მარჯვენა მდებარეობამდე, სადაც მისი სიჩქარე ნულს გაუტოლდება. შედეგად, შესრულდება ერთი სრული რხევა, რის შემდეგაც მთელი პროცესი გამეორდება.

მათემატიკური ქანქარას რხევისას მთავარი ისაა, რომ მთელი პროცესის განმავლობაში \vec{F}_r მდგენელი წონასწორობის მდგომარეობისაკენ, ანუ წანაცვლების საწინააღმდეგოდაა მიმართული. სიმძიმისა და თოკის დაჭიმულობის ძალების მოქმედება განაპირობებს რხევითი მოძრაობის განმეორებადობას. ეს ძალები სისტემის შიდა ძალებს წარმოადგენს.

ახლა რაოდენობრივად აღვწეროთ მათემატიკური ქანქარას რხევა. რხევისას ბურთულა თოკის l სიგრძის ტოლი რადიუსის წრენიის რკალზე მოძრაობს, ამიტომ ბურთულას მდებარეობა შეიძლება განისაზღვროს ერთი სიდიდით – შვეულებიდან თოკის გადახრის α კუთხით. ეს კუთხე მივიჩნიოთ დადებითად, თუ ქანქარა წონასწორობიდან მარჯვნივაა გადახრილი, მარცხნივ გადახრისას კი – უარყოფითად. ტრაექტორიის თითოეულ წერტილში მხების დადებით მიმართულებად K წერტილისაკენ – მარჯვენა უდიდესი გადახრისაკენ მიმართულება ავიჩინოთ.

როდესაც ქანქარა α კუთხითაა გადახრილი, სიმძიმის ძალის \vec{F}_r მდგენელის გეგმილი ტრაექტორიის მხებზე ტოლია:

$$F_r = - mgsin\alpha.$$

ნიშანი „-“ განპირობებულია იმით, რომ \vec{F}_r და α -ს სხვადასხვა ნიშნები აქვს: როდესაც ქანქარა გადახრილია მარჯვნივ ($\alpha > 0$), სიმძიმის ძალის \vec{F}_r მდგენელი მიმართულია მარცხნივ და მისი გეგმილი უარყოფითია ($F_r < 0$). ქანქარას მარცხნივ გადახრისას ($\alpha < 0$) და ეს გეგმილი დადებითია ($F_r > 0$).

ქანქარას სიჩქარის მოდულის ცვლილების სისწრაფეს ახასიათებს აჩქარების გეგმილი ტრაექტორიის მხებზე a_r , რომელიც ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად ტოლია:

$$a_r = \frac{F_r}{m} = - \frac{mgsin\alpha}{m} = - gsin\alpha.$$

თუ კუთხეს რადიანებში გავზომავთ, მაშინ გადახრის მცირე კუთხეების შემთხვევაში $sin\alpha \approx \alpha$, ამიტომ

$$a_r = - g\alpha.$$

ასევე, მცირე კუთხეებისათვის წერტილის კოორდინატის მოდული მიახლოებით

ქორდის სიგრძეს უდრის, ხოლო აჩქარების გეგმილი მხებზე და OX ღერძზე დიდი მიახლოებით ერთმანეთის ტოლია: $a_x \approx a_x$. ABO სამკუთხედთან ჩანს, რომ

$$a = \frac{x}{l}.$$

ამ ტოლობის გათვალისწინებით გვექნება:

$$a_x = -\frac{g}{l}x.$$

რადგან კონკრეტული მათემატიკური ქანქარასათვის $\frac{g}{l}$ ფარდობა არ იცვლება, შეგვიძლია დავასკვნათ: **მათემატიკური ქანქარას აჩქარების a_x გეგმილი პირდაპირპროპორციულია კოორდინატის, ალბულის მოპირდაპირე ნიშნით.**

როგორც ხედავთ, მათემატიკური ქანქარასათვის ისეთივე განტოლება მივიღეთ, როგორც ზამბარიანი ქანქარასათვის. ზამბარაზე დამაგრებული ტვირთის ნანაცვლება და თოკზე დაკიდებული სხეულის ნანაცვლება, მიუხედავად იმისა, რომ რხევის გამომწვევი ძალები განსხვავებული ბუნებისაა, დროის მიხედვით ერთნაირი კანონით იცვლება.

დადგენილია, რომ აჩქარების გეგმილის კოორდინატზე დამოკიდებულება ციკლური სიხშირით გამოისახება შემდეგნაირად:

$$a_x = -\omega^2 x.$$

ბოლო ორი ფორმულის შედარებით მივიღებთ:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}},$$

ამიტომ მათემატიკური ქანქარას რხევის პერიოდისათვის გვექნება:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

ეს ფორმულა მიღებულ იქნა XVII საუკუნეში ქრისტიან ჰიუგენსის მიერ, ამიტომ მას **ჰიუგენსის ფორმულას** უწოდებენ.

მათემატიკური ქანქარას რხევის პერიოდი არ არის დამოკიდებული მის მასაზე და განისაზღვრება მხოლოდ თოკის სიგრძითა და თავისუფალი ვარდნის აჩქარებით იმ ადგილას, სადაც ქანქარაა მოთავსებული. თოკის სიგრძის გაზომვითა და ექსპერიმენტულად ქანქარას პერიოდის დადგენით, შესაძლებელია, მოცემულ ადგილზე თავისუფალი ვარდნის აჩქარების განსაზღვრა.

ზამბარიანი და მათემატიკური ქანქარის ჰარმონიული რხევების აღწერისას, ვნახეთ, რომ ორივე შემთხვევაში რხევები გამომწვეული იყო წონასწორობის მდებარეობიდან გადახრისას აღძრული და ამ მდებარეობისაკენ მიმართული გადახრის პროპორციული ძალით – $F_{\text{დრ}_x}$ -ით და $F_{\text{რ}}=0$ -ით. უნდა აღინიშნოს, რომ ნებისმიერ სხეულზე, რომელზეც ასეთი ძალა იმოქმედებს ის ჰარმონიულ რხევას შეასრულებს.



<http://tiny.cc/xm87vz>

დასკვნები:

- მათემატიკური ქანქარა მერხვეი სისტემის ფიზიკური მოდელია, რომელიც შედგება უწონო და უჭიმვად თოკზე დაკიდებული ნივთიერი წერტილისაგან და დედამიწისაგან;
- მათემატიკური ქანქარას აჩქარების a_x გეგმილი პირდაპირპროპორციულია კოორდინატის, ალბულის მოპირდაპირე ნიშნით;
- მათემატიკური ქანქარას რხევის ციკლური სიხშირე და პერიოდი გამოისახება ფორმულებით: $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$, $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა პირობებში შეგვიძლია ფიზიკური ქანქარა მათემატიკურ ქანქარად მივიჩნიოთ?
2. როგორ შეიცვლება მათემატიკური ქანქარას რხევის პერიოდი, თუ მის სიგრძეს შევამცირებთ?
3. როგორ შეიცვლება მათემატიკური ქანქარას რხევის პერიოდი, თუ მას მთვარეზე ავიტანთ?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

გამოთვალეთ 1 მ სიგრძის მათემატიკური ქანქარას თავისუფალი რხევის სიხშირე პლანეტაზე, რომლის რადიუსი დედამიწის რადიუსს 8-ჯერ, ხოლო სიმკვრივე დედამიწის სიმკვრივეს 2-ჯერ აღემატება. მიიჩნიეთ, რომ დედამიწა და პლანეტა ერთგვაროვანი ბირთვია.

ამოხსნა: პლანეტაზე რხევის სიხშირის გამოსათვლელად, მასზე თავისუფალი ვარდნის აჩქარების ცოდნაა საჭირო: $v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$; როგორც მეცხრე კლასის ფიზიკის კურსიდან იცით, $g = G \frac{m}{R^2}$, რომელშიც M პლანეტის მასაა, R – პლანეტის რადიუსი, ხოლო G – გრავიტაციული მუდმივა. ასევე იცით, რომ $M = \rho V$, რომელშიც ρ პლანეტის სიმკვრივეა, V კი მისი მოცულობაა, რომელიც $V = \frac{4}{3} \pi R^3$ ფორმულით გამოითვლება. ამ მონაცემების გათვალისწინებით მივიღებთ: $g = \frac{4}{3} \pi G \rho R$; ამ ფორმულიდან გამომდინარეობს, რომ პლანეტაზე თავისუფალი ვარდნის აჩქარება 16-ჯერ მეტი იქნება, ვიდრე დედამიწაზე. ე.ი. $v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{16g}{l}}$; $\pi \approx \sqrt{g}$; $v=2$ ჰც.

პასუხი: მათემატიკური ქანქარას თავისუფალი რხევების სიხშირე პლანეტაზე 2 ჰც-ია.




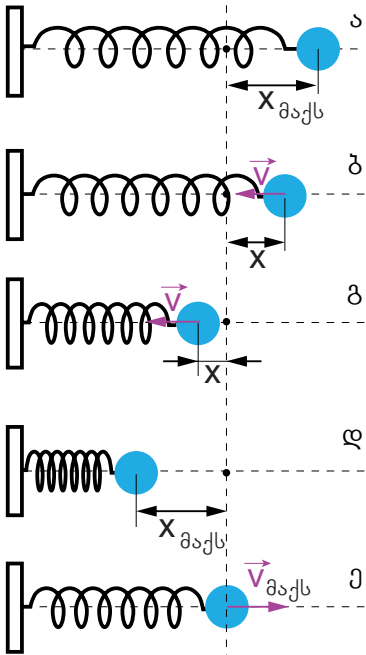
ამოხსენით ამოცანები:

1. გამოთვალეთ 1 მ სიგრძის მათემატიკური ქანქარას რხევის პერიოდი.
2. იპოვეთ მათემატიკური ქანქარას სიგრძე, თუ მისი რხევის პერიოდი 1 წმ-ია.
3. ცდით გაზომეს 1 მ სიგრძის მათემატიკური ქანქარას რხევის სიხშირე, რომელიც 0,5 ჰც-ის ტოლი აღმოჩნდა. ამ მონაცემებით გამოთვალეთ თავისუფალი ვარდნის აჩქარების მნიშვნელობა.
4. როგორ შეიცვლება მათემატიკური ქანქარას რხევის პერიოდი, თუ მას ოკეანის სანაპიროდან მყინვარწვერზე ავიტანთ?
5. ერთსა და იმავე დროში ერთმა მათემატიკურმა ქანქარამ უფრო მეტი რხევა შეასრულა ვიდრე მეორემ. რომელი ქანქარას სიგრძეა მეტი? პასუხი დაასაბუთეთ.
6. რამდენ რხევას შეასრულებს 90 სმ სიგრძის მათემატიკური ქანქარა 1 წთ-ში?
7. ერთსა და იმავე დროში ერთმა მათემატიკურმა ქანქარამ 2-ჯერ მეტი რხევა შეასრულა, ვიდრე მეორემ. მათი სიგრძეთა სხვაობა 30 სმ-ია. იპოვეთ ამ ქანქარების სიგრძეთა ჯამი.
8. ერთი მათემატიკური ქანქარას რხევის პერიოდი 0,3 წმ-ია, მეორესი კი – 0,4 წმ. განსაზღვრეთ იმ მათემატიკური ქანქარას რხევის პერიოდი, რომლის სიგრძე მოცემული მათემატიკური ქანქარების სიგრძეთა ჯამის ტოლია.
9. ერთი მათემატიკური ქანქარას რხევის პერიოდი 1 წმ-ია, მეორესი კი – 0,8 წმ. იპოვეთ იმ მათემატიკური ქანქარას რხევის სიხშირე, რომლის სიგრძე მოცემული მათემატიკური ქანქარების სიგრძეთა სხვაობის ტოლია.
10. რისი ტოლი იქნება 1 მ სიგრძის მათემატიკური ქანქარას რხევის პერიოდი, თუ მას დედამიწის რადიუსის ტოლ სიმაღლეზე ავიტანთ?

§ 2.5 ენერგიის გარდაქმნა მექანიკური რხევებისას

მექანიკური რხევების სრულყოფილი აღწერისათვის აუცილებელია განვიხილოთ მერხვე სისტემაში მიმდინარე ენერგეტიკული გარდაქმნები. ენერგიის რა გარდაქმნებს აქვს ადგილი ჰარმონიული რხევებისას? რა იცვლება, როდესაც მერხვე სისტემაში წინააღმდეგობის ძალები მოქმედებს?

 მე-8 და მე-9 კლასის ფიზიკის კურსიდან იცით, რომ სისტემის სრული მექანიკური ენერგია მისი კინეტიკური და პოტენციალური ენერგიების ჯამის ტოლია. კინეტიკური ენერგია სხეულს მოძრაობის გამო აქვს, პოტენციალური ენერგია კი – სხვა სხეულებთან, ძალურ ველებთან, ან სხეულის შემადგენელ ნაწილებს შორის ურთიერთქმედების გამო. თქვენთვის ასევე ცნობილია, რომ სხეულთა ჩაკეტილი სისტემის სრული მექანიკური ენერგია მუდმივია, თუ სისტემის სხეულებზე წინააღმდეგობის ძალები არ მოქმედებს.



სურ. 2.19

წინა პარაგრაფებში ნახეთ, რომ მერხვე სისტემაში რხევების აღძვრა შეიძლება წონასწორობის მდებარეობიდან გადახრით ან სიჩქარის მინიჭებით გამოვიწვიოთ. პირველ შემთხვევაში სისტემას დამატებით პოტენციალურ ენერგიას ვანიჭებთ, მეორე შემთხვევაში კი – დამატებით კინეტიკურ ენერგიას. თუ მივიჩნევთ, რომ წინააღმდეგობის ძალები უმნიშვნელოა და უგულებელვყოფთ, მაშინ რხევისას სისტემის სრული მექანიკური ენერგია მუდმივია და შეგვიძლია დავწეროთ:

$$E_{\text{მექ}} = E_{\text{პოტ}} + E_{\text{კინ}} = \text{const.}$$

ჯერ განვიხილოთ მექანიკური ენერგიის გარდაქმნის პროცესი ზამბარიანი ქანქარას რხევისას. მაქსიმალური გადახრის მდებარეობებში, x ნანაცვლების მოდული მაქსიმალურია და რხევის ამპლიტუდის ტოლია ($x = \pm A$), ბურთულას სიჩქარე კი ნულის ტოლია ($v = 0$). შესაბამისად, სისტემის პოტენციალური ენერგია მაქსიმალურია, კინეტიკური კი ნულის ტოლია (სურ. 2.19 ა, დ). ამის გამო, უკიდურეს მდებარეობებში სისტემის სრული მექანიკური ენერგია ზამბარის პოტენციალური ენერგიის მაქსიმალური მნიშვნელობის ტოლია:

$$E_{\text{მექ}} = \frac{kA^2}{2}, \quad (1)$$

რომელშიც k ზამბარას სიხისტეა, A – რხევის ამპლიტუდა.

ამრიგად, **ზამბარიანი ქანქარას სრული მექანიკური ენერგია რხევის ამპლიტუდის კვადრატის პროპორციულია.**

მაქსიმალური გადახრის მდებარეობიდან წონასწორობისაკენ მოძრაობისას ზამბარას დეფორმაცია მცირდება. შესაბამისად, მცირდება პოტენციალური ენერგიაც. სამაგიეროდ იზრდება ბურთულის სიჩქარე და მისი კინეტიკური ენერგია. წონასწორობის მდებარეობაში, როდესაც ნანაცვლება ნულის ტოლია ($x = 0$), ქანქარას მთელი ენერგია ბურთულის კინეტიკურ ენერგიაში გადადის (სურ. 2.19 ე). ამის გამო, სისტემის სრული მექანიკური ენერგია ბურთულის კინეტიკური ენერგიის მაქსიმალური მნიშვნელობის ტოლია:

$$E_{მექ} = \frac{mv_{მაქს}^2}{2}, \quad (2)$$

რომელშიც $v_{მაქს}$ რხევისას ბურთულის მაქსიმალური სიჩქარეა.

თუ (1) და (2) ტოლობებიდან ბურთულის მაქსიმალურ სიჩქარეს გამოვსახავთ, მივიღებთ:

$$v_{მაქს} = \sqrt{\frac{k}{m}} A.$$

კიდურა და წონასწორულ მდებარეობებს შორის სისტემას კინეტიკური ენერგიაც აქვს და პოტენციალურიც. სისტემის სრული მექანიკური ენერგია ამ მდებარეობაში მისი კინეტიკური და პოტენციალური ენერგიების ჯამის სახით ასე ჩაინერგება:

$$E_{მექ} = E_{კინ} + E_{პოტ} = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}.$$

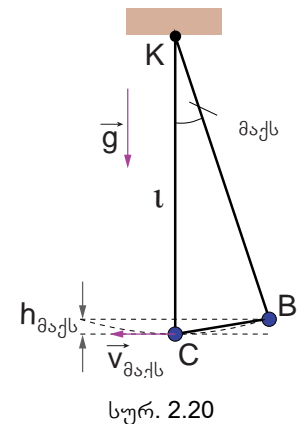
სრული მექანიკური ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{kA^2}{2} = \frac{mv_{მაქს}^2}{2}.$$

ახლა განვიხილოთ მექანიკური ენერგიის გარდაქმნები მათემატიკურ ქანქარაში და ვაჩვენოთ, რომ ისინი ისევე მიმდინარეობს, როგორც ზამბარიან ქანქარაში.

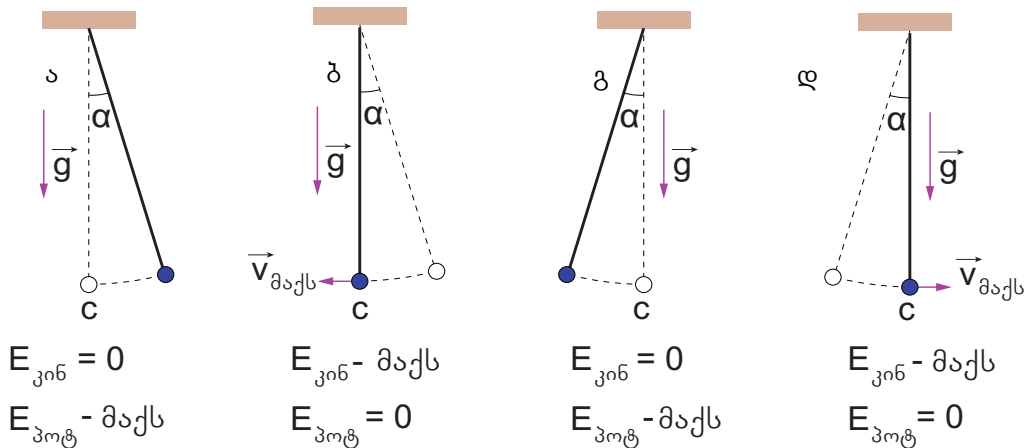
პოტენციალური ენერგიის ნულოვან დონედ ბურთულის წონასწორული მდებარეობის შესაბამისი დონე ავირჩიოთ. ქანქარას მაქსიმალურ კუთხეზე გადახრისას, ბურთულას წანაცვლების მოდული მაქსიმალურია, სიჩქარე კი ნულის ტოლია (სურ. 2.20). შესაბამისად, მაქსიმალურია პოტენციალური ენერგია, კინეტიკური ენერგია კი – ნულის ტოლია. ამის გამო, მაქსიმალური გადახრისას, სისტემის სრული მექანიკური ენერგია ბურთულის პოტენციალური ენერგიის მაქსიმალური მნიშვნელობის ტოლი იქნება (სურ. 2.21 ა, 2.21 გ):

$$E_{მექ} = mgh_{მაქს}, \quad (3)$$



რომელშიც $h_{მაქს}$ წონასწორობის მდებარეობის დონიდან მაქსიმალური ასვლის სიმაღლეა. შეიძლება დამტკიცდეს, რომ ზამბარიანი ქანქარას მსგავსად, მათემატიკური ქანქარას სრული მექანიკური ენერგია

ამპლიტუდის კვადრატის პროპორციულია.



სურ. 2.21

მაქსიმალური გადახრის მდებარეობიდან წონასწორულისაკენ მოძრაობისას, ბურთულის ასვლის სიმაღლე იკლებს, შესაბამისად, მცირდება ქანქარას პოტენციალური ენერგია. სამაგიეროდ იზრდება ბურთულის სიჩქარის მოდული და კინეტიკური ენერგიაც. წონასწორობის მდებარეობაში ($h = 0$), ქანქარას მთელი ენერგია ბურთულის კინეტიკურ ენერგიაში გადადის (სურ. 2.21 ბ, დ). ამის გამო, სისტემის სრული მექანიკური ენერგია მისი კინეტიკური ენერგიის მაქსიმალური მნიშვნელობის ტოლია (ნერტილი C):

$$E_{\text{მექ}} = \frac{mv_{\text{მაქს}}^2}{2}. \quad (4)$$

თუ (3) და (4) ტოლობების მარცხენა მხარეებს ერთმანეთს გავუტოლებთ და ქანქარას მაქსიმალურ სიჩქარეს გამოვსახავთ, მივიღებთ:

$$v_{\text{მაქს}} = \sqrt{2gh_{\text{მაქს}}}.$$

სხვა, შუალედურ მდებარეობებში სისტემას კინეტიკური ენერგიაც აქვს და პოტენციალურიც. სისტემის სრული მექანიკური ენერგია ამ მდებარეობებში, კინეტიკური და პოტენციალური ენერგიების ჯამის სახით ასე ჩაიწერება:

$$E_{\text{მექ}} = E_{\text{კინ}} + E_{\text{პოტ}} = \frac{mv^2}{2} + mgh.$$

სრული მექანიკური ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\frac{mv^2}{2} + mgh = mgh_{\text{მაქს}} = \frac{mv_{\text{მაქს}}^2}{2}.$$

მერხევი სისტემის პოტენციალური და კინეტიკური ენერგიების დროზე დამოკიდებულებების ფორმულები შეიძლება მივიღოთ, თუ $E_{\text{პოტ}} = \frac{kx^2}{2}$ -ში შევიტანთ პარ. 2.2-ში მოყვანილ $x(t) = A \cos \omega t$ დამოკიდებულებას:

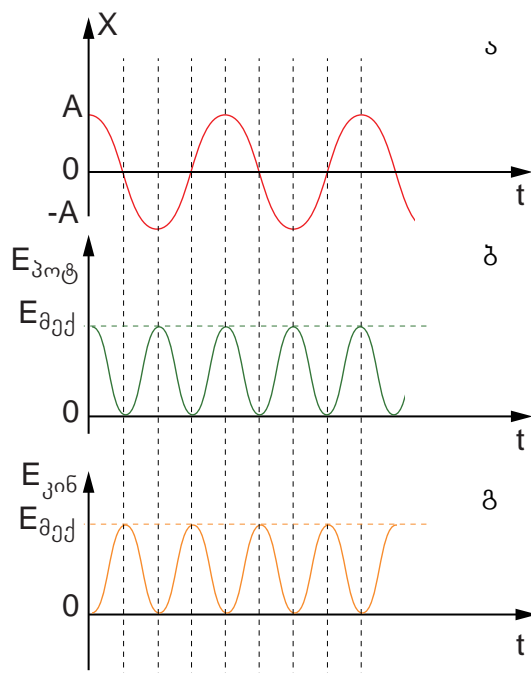
$$E_{\text{პოტ}} = \frac{kA^2}{2} \cdot \cos^2 \omega t. \quad (5)$$

წინააღმდეგობის ძალების არ არსებობის შემთხვევაში, რხევისას სისტემის პოტენციალური ენერგია დანაკარგის გარეშე გადადის კინეტიკურში და, პირიქით. ამიტომ,

$$E_{\text{კინ}} = E_{\text{მექ}} - E_{\text{პოტ}} = \frac{kA^2}{2} \cdot (1 - \cos^2 \omega t), \text{ ანუ}$$

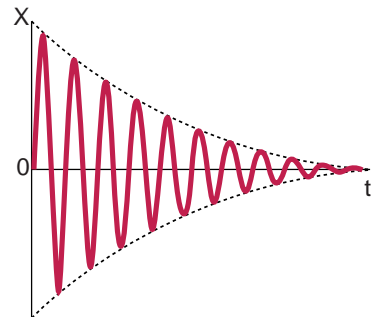
$$E_{\text{კინ}} = \frac{kA^2}{2} \cdot \sin^2 \omega t \quad (6)$$

როგორც (5) და (6) ფორმულებიდან ჩანს, ენერგიის ასეთი გარდაქმნები თვით რხევების სიხშირეზე ორჯერ მეტი სიხშირით მიმდინარეობს (სურ. 2.22 ა, ბ, გ). მართლაც რხევის ერთ პერიოდში, სრული მექანიკური ენერგია ორჯერ გარდაიქმნება პოტენციალურ ენერგიად, ორჯერ – კინეტიკურად.




სურ. 2.22

ზამბარიანი და მათემატიკური ქანქარას თავისუფალი რხევები ჰარმონიულია, თუ სისტემაზე წინააღმდეგობის ძალები არ მოქმედებს. სინამდვილეში ეს ძალები ყოველთვის არსებობს და მცირე მნიშვნელობის შემთხვევაშიც კი გავლენას ახდენს რხევით მოძრაობაზე. კერძოდ, წინააღმდეგობის ძალები უარყოფით მუშაობას ასრულებს და სისტემის მექანიკური ენერჯის შემცირებას იწვევს. შედეგად, დროის განმავლობაში რხევის ამპლიტუდა დაიკლებს და ბოლოს, როდესაც მექანიკური ენერჯია ამოიწურება, რხევა მთლიანად მიიღევა. მიღევადი რხევისას სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი სურ. 2.23-ზეა გამოსახული.



სურ. 2.23

 რხევის მიღევისას რა სახის ენერჯიად გარდაიქმნება მერხვეი სისტემის მექანიკური ენერჯია?


დასკვნები:

- ქანქარას სრული მექანიკური ენერჯია რხევის ამპლიტუდის კვადრატის პროპორციულია;
- ზამბარიანი ქანქარას სრული მექანიკური ენერჯია გამოისახება ფორმულებით:

$$E_{მექ} = \frac{kA^2}{2}, E_{მექ} = \frac{mv_{მაქ}^2}{2}, E_{მექ} = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2};$$
- მათემატიკური ქანქარას სრული მექანიკური ენერჯია გამოისახება ფორმულებით: $E_{მექ} = mgh_{მაქ}, E_{მექ} = \frac{mv_{მაქ}^2}{2}, E_{მექ} = \frac{mv^2}{2} + mgh;$
- რხევის ერთ პერიოდში, სრული მექანიკური ენერჯია ორჯერ გარდაიქმნება პოტენციურ ენერჯიად, ორჯერ – კინეტიკურად;
- მიღევადი რხევებისას სრული მექანიკური ენერჯია მცირდება.

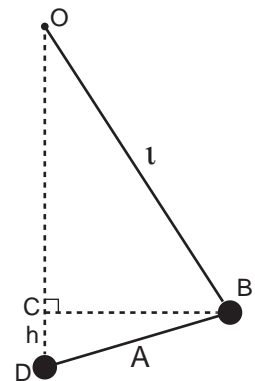
საკონტროლო კითხვები:

1. მაქსიმალური გადახრიდან წონასწორული მდებარეობისაკენ მოძრაობისას როგორ იცვლება კინეტიკური ენერჯია? პოტენციური ენერჯია?
2. რა სიდიდეებზეა დამოკიდებული ზამბარიანი ქანქარას მაქსიმალური სიჩქარე?
3. რა სიდიდეებზეა დამოკიდებული მათემატიკური ქანქარას მაქსიმალური სიჩქარე?
4. რატომ იწვევს წინააღმდეგობის ძალები რხევის ამპლიტუდის შემცირებას?

 **ერთად ამოვხსნათ ამოცანა**

გამოთვალეთ 1 მ სიგრძის მათემატიკური ქანქარას რხევის სრული მექანიკური ენერჯია, თუ მასზე დაკიდებული 0,2 კგ მასის მცირე ზომის ბურთულა 2 სმ ამპლიტუდით ირხევა (სურ. 2.24). შენიშვნა: მცირე კუთხით გადახრისას რკალის ქორდა ამპლიტუდის ტოლად შეგვიძლია მივიჩნიოთ.

ამოხსნა: სისტემის სრული მექანიკური ენერჯია წონასწორობის მდებარეობიდან მაქსიმალური გადახრისას პოტენციური ენერჯის ტოლია. ნულოვან დონედ წონასწორობის მდებარეობა ავირჩიოთ და გამოვსახოთ ეს პოტენციური ენერჯია:



სურ. 2.24

$E_{პოტ} = mgh$, რომელშიც $h=DC$. განვიხილოთ ორი $\triangle OCB$ და $\triangle DCB$ მართკუთხა სამკუთხედი. თითოეულიდან გამოვსახოთ BC გვერდის კვადრეტი და გავუტოლოთ ერთმანეთს. $BC^2=l^2-OC^2$; $BC^2=A^2-h^2$; $l^2-(l-h)^2=A^2-h^2$; ფრჩხილების გახსნით და h -ის გამოსახვით მივიღებთ: $h = \frac{A^2}{2l}$, ე.ი. $E_{პოტ} = mg \frac{A^2}{2l}$ და $E_{პოტ} = 4 \cdot 10^{-4}$ ჯ.

პასუხი: მათემატიკური ქანქარას სრული მექანიკური ენერგია $E = 4 \cdot 10^{-4}$ ჯ-ია.

ანალოგია ზამბარიანი და მათემატიკური ქანქარას მახასიათებლებს შორის

	ზამბარიანი ქანქარა	მათემატიკური ქანქარა
პერიოდი და ციკლური სიხშირე	$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$	$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$
რხევის გამომწვევი ძალა	დრეკადობის ძალა	სიმძიმისა და დაჭიმულობის ძალა
მაქსიმალური სიჩქარე	$v_{\text{მაქს}} = A \sqrt{\frac{k}{m}}$	$v_{\text{მაქს}} = A \sqrt{\frac{g}{l}}$
მაქსიმალური პოტენციალური ენერგია	$E_{\text{პოტ,მაქს}} = \frac{kA^2}{2}$	$E_{\text{პოტ,მაქს}} = mg \frac{A^2}{2l}$



ამოხსენით ამოცანები:

- რა ნიშნის მუშაობას ასრულებს ჰორიზონტალურ ზამბარიან ქანქარაში აღძრული დრეკადობის ძალა წონასწორობის მდებარეობიდან მაქსიმალურ წანაცვლებამდე სხეულის გადაადგილებისას?
- როგორ შეიცვლება მერხევი სისტემის სრული მექანიკური ენერგია, რხევის ამპლიტუდის 2-ჯერ გაზრდით?
- 100 ნ/მ სიხისტის ზამბარის ბოლოზე მიმაგრებული სხეული 2 სმ-ის ტოლი ამპლიტუდით ირხევა. იპოვეთ ამ სისტემის სრული მექანიკური ენერგია.
- 200 ნ/მ სიხისტის ზამბარის ბოლოზე მიმაგრებული სხეულის რხევის ამპლიტუდა 10 მმ-ია. განსაზღვრეთ ზამბარის პოტენციალური ენერგია იმ მომენტში, როდესაც სისტემის კინეტიკური და პოტენციალური ენერგიები ერთმანეთის ტოლია.
- 50 ნ/მ სიხისტის ზამბარის ბოლოზე დამაგრებული სხეულის რხევის ამპლიტუდა 4 სმ-ია. გამოთვალეთ სისტემის მაქსიმალური კინეტიკური ენერგია.
- იპოვეთ 250 ნ/მ სიხისტის ზამბარის ბოლოზე მიმაგრებული 100 გ მასის სხეულის მაქსიმალური სიჩქარე, თუ ამ ქანქარას რხევის ამპლიტუდა 20 მმ-ია.
- განსაზღვრეთ 500 ნ/მ სიხისტის ზამბარის ბოლოზე მიმაგრებული 800 გ მასის სხეულის სიჩქარე იმ მომენტში, როდესაც სისტემის პოტენციალური ენერგია 3-ჯერ მეტია კინეტიკურზე. რხევის ამპლიტუდა 20 მმ-ია.
- ფიზიკური ქანქარა წონასწორობის მდებარეობიდან იმდენად გადახარეს, რომ სხეულის მასათა ცენტრმა 20 სმ-ით აინია. გამოთვალეთ სხეულის მაქსიმალური სიჩქარე მისი გათავისუფლების შემდეგ.
- 1,6 მ სიგრძის მათემატიკური ქანქარა წონასწორული მდებარეობიდან 60° -იანი კუთხით გადახარეს და შემდეგ გაათავისუფლეს. იპოვეთ სხეულის სიჩქარე წონასწორობის მდებარეობის გავლისას.
- რამდენჯერ გაიზრდება მათემატიკური ქანქარას რხევის სრული მექანიკური ენერგია, თუ წონასწორობის მდებარეობიდან გადახრის მაქსიმალურ კუთხეს 30° -დან 60° -მდე გავზრდით?

§ 2.6 რეზონანსი


1831 წლის 12 აპრილს, ინგლისში, მდინარე ირველზე ბროტონის ხიდი მაშინ ჩაინგრა, როდესაც მასზე მწყობრი ნაბიჯით სამხედრო რაზმი გადადიოდა. ხიდი რაზმის წევრთა საერთო წონაზე გაცილებით მეტ დატვირთვაზე იყო გათვლილი. მაშ, რა იყო ამ კატასტროფის მიზეზი? როცა მატარებელი ხიდს უახლოვდება, მემანქანე ან ამცირებს სიჩქარეს, ან ზრდის მას. რატომ?

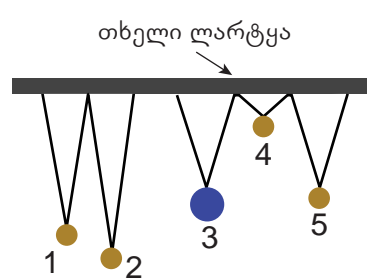
თუ რხევით სისტემას წონასწორობის მდებარეობიდან გამოვიყვანთ, მასში აღიძვრება თავისუფალი რხევები, რომელთა სიხშირე ამპლიტუდაზე დამოკიდებული არ არის. თავისუფალი რხევების სიხშირეს სისტემის **საკუთარი სიხშირე** უწოდებენ. წინა პარაგრაფში აღვნიშნეთ, რომ ენერჯის დანაკარგის გამო, თავისუფალი რხევები მიიღევა. ეს რომ არ მოხდეს, საჭიროა სისტემას გარედან პერიოდულად ენერჯია მიენოდოს.

მოვიყვანოთ მაგალითი. ვთქვათ, არც ისე დიდი ძალით, ვცდილობთ გავაქანოთ საქანელა (სურ. 2. 25). საქანელა ფიზიკური ქანქარაა, ანუ გარკვეული საკუთარი სიხშირის მქონე მერხვე სისტემას წარმოადგენს. წონასწორობის მდებარეობიდან მისი დიდი კუთხით გადახრა მცირე მუდმივი ძალის მოქმედებით შეუძლებელია. ასევე საქანელას ვერ გავაქანებთ, თუ მას უწესრიგოდ, სხვადასხვა მხარეს ვუბიძგებთ. გამოცდილებით იცით, რომ თუ საქანელას ყოველ ჯერზე ხელს მაშინ კრავთ, როდესაც ის თქვენამდე მოვა და შეჩერდება, ანუ, როდესაც მისი გადახრა წონასწორობის მდებარეობიდან უდიდესია, მის ძლიერად გაქანებას შეძლებთ, თუმცა ამისთვის გარკვეული დრო დაგჭირდებათ. პირველი ბიძგის შემდეგ რხევას მცირე ამპლიტუდა ექნება, მეორე დროული ბიძგის შემდეგ, ამპლიტუდა მოიმატებს, მესამეს შემდეგ – კიდევ უფრო გაიზრდება და ა. შ. ამპლიტუდის ზრდის აუცილებელი პირობაა, რომ საქანელას თავისუფალი რხევისა და გარე ბიძგების სიხშირეები ტოლი იყოს. წინააღმდეგ შემთხვევაში ერთი ბიძგის შედეგად ამპლიტუდის ზრდა შეიძლება მეორე ბიძგმა გააბათილოს და საქანელა ვერ გაქანდეს.



სურ. 2.25

 ჩავატაროთ ცდა. თხელ ლარტყაზე სხვადასხვა სიგრძის ძაფებზე ჩამოვკიდოთ ბურთულები ისე, როგორც სურ. 2.26-ზეა ნაჩვენები. მე-3 ბურთულა იყოს დიდი მასის, დანარჩენები კი – ერთნაირი. ამასთან, მე-3 და მე-5 ბურთულა ტოლი სიგრძის ძაფებზე დავკიდოთ. გამოვიყვანოთ მე-3 ბურთულა წონასწორობის მდებარეობიდან და გავათავისუფლოთ, ის დაიწყებს რხევას. მძიმე ქანქარას რხევა გადაეცემა ლარტყას, რომელიც იმავე სიხშირით დაიწყებს იძულებით რხევას და, შესაბამისად, სხვა ქანქარებზე ამავე სიხშირის პერიოდულად ცვლადი ძალით მოქმედებას. შედეგად, დანარჩენი ქანქარებიც რხევას დაიწყებენ. ამასთან, რხევის ამპლიტუდა ყველაზე მეტი ექნება მე-5 ქანქარას, რომლის სიგრძე მძიმე ქანქარას სიგრძის ტოლია.



სურ. 2.26

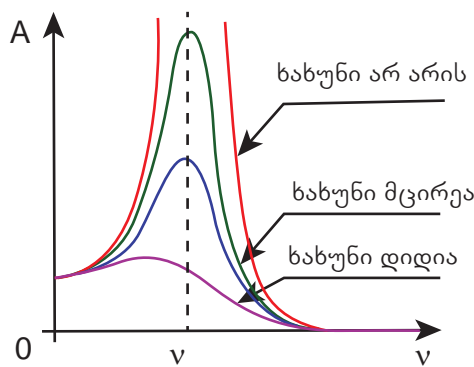
ქანქარების ასეთ „ქცევას“ ადვილად ავხსნით, თუ გავიხსენებთ, რომ ტოლი სიგრძის ქანქარებს რხევის ერთნაირი საკუთარი სიხშირე აქვს. როდესაც გარე ცვლადი

ძალის სიხშირე ქანქარას რხევის საკუთარ სიხშირეს არ ემთხვევა, გარე ძალა ქანქარას ხან მოძრაობის მიმართულებით უბიძგებს და დადებით მუშაობას ასრულებს, ხან – მოძრაობის საპირისპიროდ და უარყოფით მუშაობას ასრულებს. შედეგად, გარე ძალის მიერ შესრულებული ჯამური მუშაობა უმნიშვნელოა და, შესაბამისად, დამყარებული რხევების ამპლიტუდაც მცირეა. სწორედ ასეა პირველი, მე-2 და მე-4 ქანქარების შემთხვევაში.

თუ გარე ცვალებადი ძალის სიხშირე ქანქარას რხევის საკუთარ სიხშირეს ემთხვევა, მაშინ რხევის მთელი დროის განმავლობაში ამ ძალის მიერ შესრულებული მუშაობა დადებითი იქნება. სისტემის ენერგია სწრაფად გაიზრდება და შესაბამისად, სწრაფად გაიზრდება რხევის ამპლიტუდაც. ხახუნის ძალის არსებობის გამო, რაღაც დროის გასვლის შემდეგ რხევა დამყარდება – ამპლიტუდა აღარ შეიცვლება, ე.ი რხევის ენერგიაც აღარ გაიზრდება. ამ დროს მერხვე სისტემაზე გადაცემული ენერგია მთლიანად წინააღმდეგობის ძალების დაძლევას ხმარდება. რაც უფრო მცირეა ხახუნი, მით უფრო დიდი ამპლიტუდით იწარმოებს რხევა.

იძულებითი რხევების ამპლიტუდის მკვეთრი ზრდის მოვლენას, როდესაც გარე პერიოდულად ცვლადი ძალის სიხშირე სისტემის რხევის საკუთარ სიხშირეს ემთხვევა, რეზონანსი ეწოდება.

სურ. 2.27-ზე ნაჩვენებია მერხვეი სისტემის ამპლიტუდის გარე პერიოდული ძალის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკები ხახუნის ძალის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის. გრაფიკების ანალიზით შეგვიძლია დავასკვნათ: იძულებითი რხევის ამპლიტუდა უდიდესი მაშინაა, როდესაც გარე ცვლადი ძალის სიხშირე სისტემის რხევების საკუთარ სიხშირეს ემთხვევა: $\nu = \nu_0$; რაც უფრო დიდია ხახუნის ძალები, მით ნაკლებია რეზონანსული ამპლიტუდა, ანუ მით ნაკლებადაა გამოხატული რეზონანსი.




სურ. 2.27

ნებისმიერი დრეკადი სხეული – ხიდი, ავტომობილის ძარა, ანძა, შენობა, გემის კორპუსი და მრავალი სხვა, რხევით სისტემას წარმოადგენს და რხევის საკუთარი სიხშირე აქვს. რეზონანსის დროს, მათი რხევების ამპლიტუდა შესაძლოა, იმდენად გაიზარდოს, რომ სხეული დაზიანდეს. სწორედ რეზონანსის მოვლენა იყო ბროტონის ხიდის დანგრევის მიზეზი – ჯარისკაცების მწყობრი ნაბიჯის სიხშირე რხევის საკუთარ სიხშირეს დაემთხვა, რამაც რხევის ამპლიტუდის მკვეთრი ზრდა და ხიდის ნგრევა გამოიწვია. ამ შემთხვევის შემდეგ დაანესეს, რომ სამხედრო რაზმი ხიდზე არა მწყობრი, არამედ არეული ნაბიჯებით გადასულიყო.

ლიანდაგების გადაბმის ადგილზე გადასვლისას, მატარებლის ბორბალი საყრდენზე ზემოქმედებს. ხიდის რხევის საკუთარი სიხშირე არც ძალიან მცირეა და არც ძალიან დიდი. ამიტომ მატარებლის ბორბლის ზემოქმედების სიხშირე ხიდის რხევის

საკუთარ სიხშირეს რომ არ დაემთხვეს, საჭიროა მატარებელმა ხიდი ან ძალიან ნელა, ან მაქსიმალური შესაძლებელი სიჩქარით გაიაროს.

რეზონანსული მოვლენების თავიდან ასაცილებლად, სპეციალურ ხერხებსაც მიმართავენ. მაგალითად, მიწისძვრის დროს შენობის ნგრევის თავიდან ასაცილებლად მასში ამონტაჟებენ სპეციალურ კონსტრუქციას, რომელიც ძლიერი რყევისას ადვილად იშლება. თუ მიწისძვრისას შენობის რხევის ამპლიტუდა გაიზარდა, ამ კონსტრუქციის დაშლა შენობის საკუთარი რხევის სიხშირეს შეცვლის, რაც მას რეზონანსული მდგომარეობიდან გამოიყვანს.

 წარმოიდგინეთ, რომ სათლებით წყალი მიგაქვთ და რაღაც სიჩქარით მოძრაობისას წყალმა გადმოღვრა დაიწყო. რა არის ამის მიზეზი და რა უნდა გააკეთოთ, რომ სათლებიდან წყალი არ გადმოიღვაროს?

ბევრ შემთხვევაში რეზონანსის მოვლენა სასარგებლოდ გამოიყენება. მაგალითად, როდესაც საბურავი ორმოში ჩარჩება, ავტომობილის ამოსაყვანად მასზე პერიოდული ძალით ისე მოქმედებენ, რომ რეზონანსი გამოიწვიონ და ორმოს მიმართ მისი რხევის ამპლიტუდა გაზარდონ. რეზონანსი გამოიყენება სამთომოპოვებით მრეწველობაში ვიბრომანქანების მუშაობისას, აკუსტიკაში, მედიცინაში და სხვა.



<http://tiny.cc/hn87vz>

დასკვნები:

- მერხვეი სისტემის თავისუფალი რხევების სიხშირეს, სისტემის საკუთარი სიხშირე ეწოდება;
- იძულებითი რხევების ამპლიტუდის მკვეთრი ზრდის მოვლენას, როდესაც გარე პერიოდულად ცვლადი ძალის სიხშირე სისტემის რხევის საკუთარ სიხშირეს ემთხვევა, რეზონანსი ეწოდება;
- რეზონანსის მოვლენა ხშირად საზიანოა, მაგრამ ყოფა-ცხოვრებასა და ტექნიკაში მას სასარგებლოდაც იყენებენ.

საკონტროლო კითხვები:

1. რატომ წარმოებს პირველი, მე-2 და მე-4 ქანქარების იძულებითი რხევა მცირე ამპლიტუდით, მე-5 ქანქარის კი – დიდი ამპლიტუდით?
2. რა ინვესს რეზონანსის დროს ამპლიტუდის მკვეთრ ზრდას?
3. როგორ გავლენას ახდენს წინააღმდეგობის ძალა რეზონანსულ ამპლიტუდაზე?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

რა სიჩქარით უნდა მოძრაობდეს მწყობრი ნაბიჯით ჯარისკაცების კოლონა ხიდზე, რომ დამყარდეს რეზონანსი, თუ თითოეული ნაბიჯის სიგრძე 75 სმ-ია, ხოლო ხიდის ვერტიკალური რხევების საკუთარი სიხშირეა 0,8 ჰც .

ამოხსნა: იმისათვის, რომ რეზონანსი დამყარდეს, გარე პერიოდული ძალის ზემოქმედების სიხშირე სისტემის თავისუფალი (საკუთარი) რხევის სიხშირეს უნდა დაემთხვეს. ვინაიდან რხევის პერიოდი სიხშირის შებრუნებული სიდიდეა, ჯარისკაცები ყოველ ნაბიჯს უნდა დგამდნენ $\frac{1}{0,8}$ წმ=1,25 წმ-იანი ინტერვალით, ანუ უნდა მოძრაობდნენ $v = \frac{S}{t} = 0,6$ მ/წმ სიჩქარით.

პასუხი: რეზონანსი დამყარდება კოლონის 0,6 მ/წმ სიჩქარით მოძრაობისას.



ამოხსენით ამოცანები:

1. შესაძლებელია თუ არა მცირე პერიოდული ძალის ზემოქმედებით საქანელას რხევის ამპლიტუდა მკვეთრად გავზარდოთ? პასუხი განამტკიცეთ მსჯელობით.
2. ხიდზე გადასვლისას მემანქანე მატარებელს ცვლადი სიჩქარით ამოძრავებს, ან ზრდის სიჩქარეს ან ამცირებს მას. რატომ?
3. თუ რაიმე მიზეზის გამო, ხიდზე ავტომობილების დიდ რაოდენობას მოუწია დგომა, მიზანშეწონილია მძღოლებმა ძრავა გამორთონ. რატომ?
4. დამყარდება თუ არა რეზონანსი მერხვე სისტემაში, როდესაც მასზე მოქმედი გარე პერიოდული ძალის მიერ შესრულებული მუშაობა პერიოდის ნაწილის განმავლობაში დადებითია, ნაწილში კი – უარყოფითი?
5. დროის რა შუალედით უნდა იმოქმედოს გარე ძალამ სისტემაზე, რომლის საკუთარი რხევის სიხშირე 0,1 ჰც-ია, რომ რხევის ამპლიტუდა მაქსიმალური იყოს?
6. რა სიხშირით უნდა იმოქმედოს გარე ძალამ 1მ სიგრძის მათემატიკურ ქანქარაზე, რომ რხევის ამპლიტუდა რაც შეიძლება დიდი იყოს?
7. იპოვეთ 200 ნ/მ სიხისტის ზამბარის ბოლოზე მიბმული სხეულის მასა, თუ ამ სისტემაზე 1 წმ-იანი შუალედით მოქმედი გარე პერიოდული ძალა სისტემის მაქსიმალური ამპლიტუდით რხევას იწვევს.
8. მათემატიკური ქანქარას თავისუფალი რხევისას კოორდინატის დროზე დამოკიდებულება აღინერება განტოლებით: $x=0,4\cos 10\pi t$. რა სიხშირით უნდა ზემოქმედებდეს გარე პერიოდული ძალა ამ სისტემაზე, რათა რეზონანსი დამყარდეს?
9. ლიანდაგის რელსების გადაბმის ადგილებში მატარებლის ბორბლების ჩარტყმა ვაგონის ვერტიკალურ იძულებით რხევებს იწვევს. ვაგონის თავისუფალი რხევების პერიოდი 1,2 წმ-ია. მატარებლის მოძრაობის რა სიჩქარისას იქნება ყველაზე დიდი ვაგონის ვერტიკალური რხევის ამპლიტუდა, თუ რელსის სიგრძე 30 მ-ია?
10. მატარებლის ჭერზე დამაგრებულია ზამბარიანი ქანქარა, რომლის საკუთარი რხევის სიხშირე 0,5 ჰც-ია. მატარებლის რა სიჩქარით მოძრაობისას იქნება ქანქარას რხევის ამპლიტუდა ყველაზე დიდი, თუ რელსის სიგრძე 32 მ-ია?

§ 2.7 ტალღური პროცესი. ტალღის გავრცელება დრეკად გარემოში

თუ წყალში ქვას ჩავაგდებთ, ჩაგდების ადგილიდან გავრცელებას დაიწყებს წრიული ტალღები, რომელთა რადიუსი დროის განმავლობაში იზრდება (სურ. 2.28). რჩება შთაბეჭდილება, თითქოს წყალი ქვის ჩაგდების ადგილიდან ყველა მიმართულებით მიედინება. სინამდვილეში რა პროცესი მიმდინარეობს ამ დროს? მართლა აქვს ადგილი ნივთიერების გადატანას?

ბევრ თქვენგანს უნახავს ზღვის ღელვის დროს ნაპირზე დაცემული ტალღების სიძლიერე, როდესაც ისინი ნაპირს რეცხავენ და ანგრევენ კიდეც (სურ. 2.29). როგორ გადააქვს ტალღას ენერგია?



სურ. 2.28



სურ. 2.29

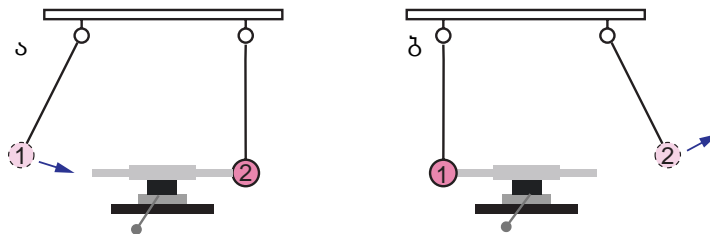
გაელვების შემდეგ გარკვეულ დროში გვესმის ჭექა-ქუხილის ძლიერი ხმა. საიდან და როგორ მოვიდა ეს ხმა ჩვენამდე?

საზოგადოდ, სივრცის ორ ნერტილს შორის ენერგიისა და იმპულსის გადატანის ორი ფუნდამენტური ხერხი არსებობს: უშუალოდ ნივთიერების გადატანა ნერტილიდან ნერტილამდე და ენერგიის გადატანა ნივთიერების გადატანის გარეშე, რომელიც გარემოს შემადგენელ ნაწილაკებს შორის ენერგიისა და იმპულსის თანმიმდევრული გადაცემის გზით ხორციელდება.

ამ პარაგრაფში ენერგიის გადაცემის მეორე ხერხს დანვრილებით განვიხილავთ.



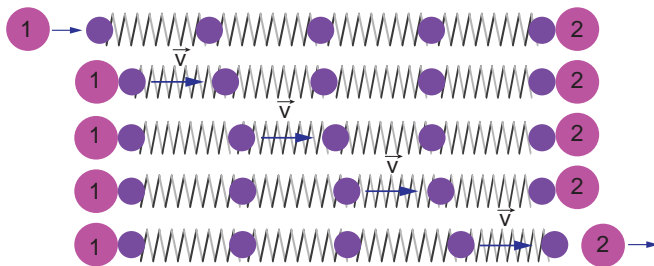
ჩავატაროთ ცდა. ორი ერთნაირი ქანქარა ისე დავკიდოთ, რომ ბურთულები დამაგრებული ლითონის ღეროს ბოლოებზე იყოს მიბჯენილი. გადავხაროთ ქანქარა **1** და ხელი გავუშვათ (სურ. 2.30 ა). ის ამოძრავდება წონასწორობის მდებარეობისაკენ, დაეჯახება ლითონის ღეროს, რის შემდეგაც ქანქარა **2** მისგან გახტება და გარკვეული კუთხით გადაიხრება (სურ. 2.30 ბ).



სურ. 2.30

ამ მოვლენის უკეთ გასააზრებლად განვიხილოთ ღეროს აგებულების ერთგანზომილებიანი მექანიკური მოდელი, რომელიც ზამბარებით ერთმანეთთან გადაბმული ბურთულების ერთობლიობას წარმოადგენს (სურ. 2.31). ამ მოდელში ღეროს ატომები ბურთულების სახითაა წარმოდგენილი, ატომებს შორის ურთიერთქმედება კი – ზამბარების სახით. ქანქარას ზემოქმედება კიდურა მარცხენა ბურთულაზე (ატომზე) მისი მდებარეობის ცვლილებას გამოიწვევს, ამიტომ მეზობელ ბურთულასთან (ატომთან) დამაკავშირებელი ზამბარა შეიკუმშება. მეზობელი ატომების ურთიერთქმედების პო-


ტენციური ენერგია შეიცვლება, რაც მეორე ატომის (ბურთულას) გადაადგილებას გამოიწვევს. შედეგად, მეორე ზამბარაც შეიკუმშება და ა.შ. როდესაც შეკუმშვა კიდურა მარჯვენა ბურთულას (ატომს) მიაღწევს, ის იმოქმედებს ქანქარა 2-ზე და ამოძრავებს მას. ამრიგად, გარე ზემოქმედება შეკუმშვის სახით ღეროს გასწვრივ გარკვეული სიჩქარით ვრცელდება, რასაც თან ახლავს ენერგიის გადატანა ნივთიერების გადატანის გარეშე.



სურ. 2.31

სივრცეში ენერგიის გადატანის პროცესს ნივთიერების გადატანის გარეშე, ტალღური პროცესი ეწოდება.

გარემოზე გარე ზემოქმედების შედეგად მისი შემადგენელი ნაწილაკები წონასწორობის მდებარეობიდან გადაიხრებიან – გარემოში აღიძვრება **შეშფოთება**.

 გაიხსენეთ, რომ გარემოს დრეკადი ეწოდება, თუ მისი დეფორმაციისას აღიძვრება დრეკადობის ძალები, რომლებიც ამ დეფორმაციას ეწინააღმდეგება.

შეშფოთებას, რომელიც დრეკად გარემოში ვრცელდება, მექანიკური ტალღა ეწოდება.

მიმართულებას, საითაც ტალღას ენერგია გადააქვს, ტალღის გავრცელების მიმართულებას უწოდებენ.

უნდა აღინიშნოს, რომ გარემოში მექანიკური ტალღის გავრცელების სიჩქარე სასრულია. აღწერილ ცდაში შეშფოთების გავრცელების (ტალღის) სიჩქარე ტოლი იქნება:

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

რომელშიც l ღეროს სიგრძეა, t – დროის შუალედი ქანქარა 1-ის დაჯახებიდან ქანქარა 2-ის გახტომამდე.

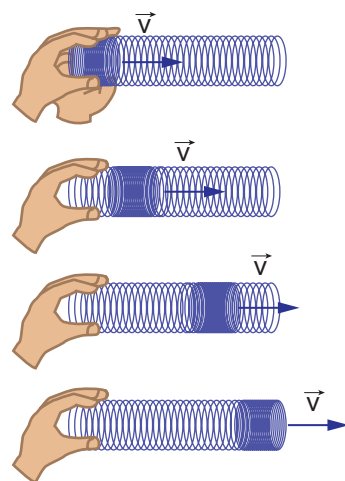
განხილულ მაგალითში გარემოს ნაწილაკები ტალღის გავრცელების მიმართულების გასწვრივ ამოძრავდნენ.

ტალღას, რომელშიც გარემოს ნაწილაკები ტალღის გავრცელების მიმართულების გასწვრივ მოძრაობენ, გრძივი ტალღა ეწოდება.

გრძივ ტალღაში ადგილი აქვს კუმშვის დეფორმაციას. ამ დეფორმაციისას, დრეკადობის ძალები აღიძვრება როგორც მყარ სხეულებში, ასევე სითხეებსა და აირებში. ამიტომ, **გრძივი ტალღები ნებისმიერ დრეკად გარემოში ვრცელდება.**

მყარ გარემოში გრძივი ტალღის გავრცელების ნათელი მოდელია შეშფოთების გავრცელება ზამბარაში. თუ მცირე სიხისტის ზამბარის ერთ ბოლოს ხელს დავარტყამთ, ამ ბოლოზე წარმოქმნილი შეკუმშვა ზამბარის მთელ სიგრძეზე გავრცელდება (სურ. 2.32).

განვიხილოთ გრძივი ტალღის გავრცელების პროცესი აირში. დგუშით აირის შეკუმშვა მის სიახლოვეს მყოფი მო-



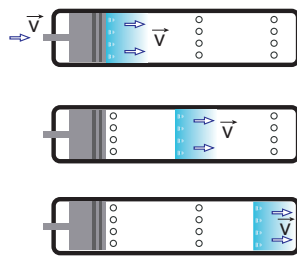
სურ. 2.32

ლეკულების სიჩქარის იმ მდგენელს შეცვლის, რომელიც დგუშის გადაადგილების გასწვრივია მიმართული (სურ. 2.33). ერთნაირი მასის მოლეკულების შემდგომი დრეკადი დაჯახებისას, ეს მოლეკულები იმპულსს მოლეკულების მეზობელ ფენას გადასცემენ და ა.შ. სწორედ ასე ვრცელდება გრძივი ტალღები აირებში.

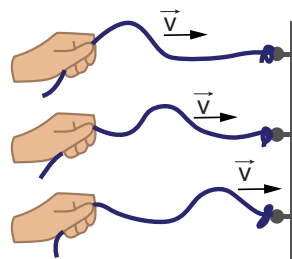
აირებისა და სითხეებისგან განსხვავებით, მყარ სხეულებში ნაწილაკების ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერჯია დიდია, ამიტომ მყარ სხეულში შესაძლებელია გავრცელდეს ტალღა, რომელშიც ნაწილაკები ტალღის გავრცელების მართობული მიმართულებით წაინაცვლებს.

ტალღას, რომელშიც გარემოს ნაწილაკები ტალღის გავრცელების მართობულად გადაადგილდება, განივი ტალღა ეწოდება.

დრეკადი ზონარის თავისუფალი ბოლოს ვერტიკალურად ზევით აწევით და სანყის მდებარეობაში დაბრუნებით, ზონარის გასწვრივ განივი ტალღა გავრცელდება (სურ. 2.34).

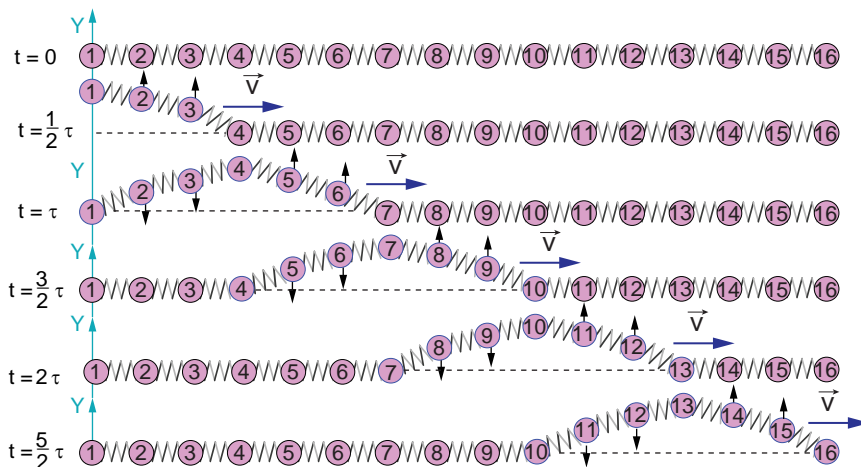


სურ. 2.33



სურ. 2.34

ზონარში განივი ტალღის გავრცელების შესწავლისათვის კვლავ ზემოთ აღწერილი მოდელი გამოვიყენოთ (სურ. 2.35). დავუშვათ, ბურთულა 1 წონასწორობის მდებარეობიდან გამოყავთ და τ დროის შემდეგ მასში აბრუნებენ. თუ $\tau/2$ დროში ბურთულა 1 ზევით მაქსიმალურად გადაადგილდა, მაშინ 1 და 2 ბურთულების, ასევე 2 და 3 ბურთულების დამაკავშირებელი დრეკადობის ძალები გამოიწვევს მათ გადაადგილებას ვერტიკალური ღერძის გასწვრივ. პირობითად მივიჩნიოთ, რომ დანარჩენი ბურთულების გადასადგილებლად საკმარისი ძალები ჯერ არ წარმოქმნილა. τ დროის შემდეგ, როდესაც გარე ძალის მოქმედებით ბურთულა 1 დაბრუნდება სანყის მდებარეობაში, ბურთულა 4 ზევით ამოძრავდება. ეს იმითაა გამოწვეული, რომ ბურთულა 4-თან დაკავშირებული ბურთულა 3 ამ მომენტისათვის ქვევით მოძრაობს და მათი დამაკავშირებელი ზამბარა, ინარჩუნებს რა პირვანდელ მდგომარეობას, ბურთულა 4-ს ზევით ააგდებს. თავის მხრივ ბურთულა 4 წაიყოლებს ბურთულა 5 და 6-ს. $3\tau/2$ დროის შემდეგ ბურთულა 4 დაუბრუნდება სანყის მდებარეობას, ხოლო ამოძრავებული იქნება შემდეგი სამეული – ბურთულები 7, 8 და 9.



სურ. 2.35

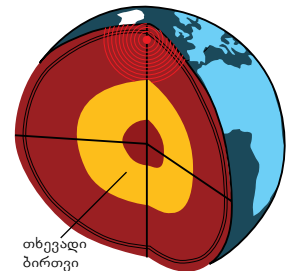
ამრიგად, საწყისი ვერტიკალური შეშფოთება განივი ტალღის სახით ჰორიზონტალური მიმართულებით გავრცელდება.

განივი ტალღაში ადგილი აქვს ძვრის დეფორმაციას – ნივთიერების ცალკეული ფენები ერთმანეთის მიმართ მხოლოდ წაინაცვლებს. რადგან აირებსა და სითხეებში ეს წაინაცვლება დრეკადობის ძალების გაჩენას არ იწვევს, ამიტომ მათში განივი ტალღები ვერ ვრცელდება. მაშასადამე, **განივი ტალღა მხოლოდ მყარ დრეკად გარემოში ვრცელდება.**

უნდა აღვნიშნოთ, რომ წყლის ზედაპირზე გავრცელებული ტალღა შერეული სახისაა, ის არც გრძივია, არც განივი – წყლის ზედაპირზე მყოფი ნაწილაკები ირხვეიან როგორც ტალღის გავრცელების მიმართულებით, ასევე მის მართობულად. ასეთი რხევის გამო, ნაწილაკები ელიფსურ ტრაექტორიზე მოძრაობენ.


ერთსა და იმავე მყარ გარემოში განივი და გრძივი ტალღების გავრცელების სიჩქარე განსხვავებულია. მაგალითად, ფოლადში განივი ტალღა 3300 მ/წმ სიჩქარით ვრცელდება, გრძივი კი – 6100 მ/წმ-ით. ამის მიზეზი ისაა, რომ სხეულის დრეკადი თვისებები კუმშვისა და ძვრის დეფორმაციების მიმართ ერთნაირი არ არის.

როგორც ცნობილია, დედამიწის ბირთვი თხევადია და მასში განივი ტალღა ვერ გავრცელდება. სწორედ ამიტომ, მიწისძვრის ეპიცენტრიდან დედამიწის ცენტრის გავლით განივი ტალღა არ გავრცელდება (სურ. 2.36). მიწისძვრის დროს ვრცელდება როგორც განივი, ასევე გრძივი ტალღები. თავიდან სეისმურ სადგურამდე გრძივი ტალღები აღწევს, გარკვეული პერიოდის შემდეგ კი განივი ტალღები დაფიქსირდება.



თხევადი ბირთვი

სურ. 2.36

 თუ იცით დედამიწის ქერქში განივი და გრძივი ტალღების გავრცელების სიჩქარე და განივი ტალღის დაგვიანების დრო, როგორ გამოთვლით მიწისძვრის ეპიცენტრამდე მანძილს?

დასკვნები:

- სივრცეში ენერჯიის გადატანის პროცესს ნივთიერების გადატანის გარეშე, ტალღური პროცესი ეწოდება;
- შეშფოთებას, რომელიც დრეკად გარემოში ვრცელდება, მექანიკური ტალღა ეწოდება;
- ტალღას, რომელშიც გარემოს ნაწილაკები ტალღის გავრცელების მიმართულების გასწვრივ მოძრაობენ, გრძივი ტალღა ეწოდება. გრძივი ტალღები ნებისმიერ დრეკად გარემოში ვრცელდება;
- ტალღას, რომელშიც გარემოს ნაწილაკები ტალღის გავრცელების მართობულად გადაადგილდება, განივი ტალღა ეწოდება. განივი ტალღა მხოლოდ მყარ დრეკად გარემოში ვრცელდება.

საკონტროლო კითხვები:

1. შეიძლება თუ არა მექანიკური ტალღა ვაკუუმში გავრცელდეს?
2. რას უწოდებენ ტალღის გავრცელების მიმართულებას?
3. ერთსა და იმავე მყარ გარემოში რომელ ტალღას აქვს მეტი სიჩქარე, განივს თუ გრძივს?



<http://tiny.cc/4n87vz>



<http://tiny.cc/7n87vz>

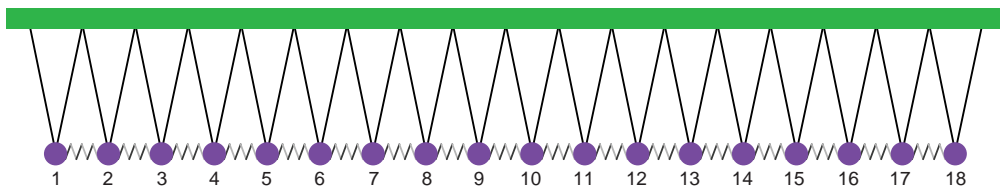


<http://tiny.cc/cn87vz>

§ 2.8 პერიოდული ტალღები

წინა პარაგრაფში ჩვენ განვიხილეთ მექანიკური ტალღები, რომელიც ერთჯერადი გარე ზემოქმედებისას წარმოიქმნებოდა და ვრცელდებოდა გარემოში. როგორ სურათს მივიღებთ იმ შემთხვევაში, თუ გარე ზემოქმედება პერიოდულად ცვლადი ან ჰარმონიულად ცვლადი იქნება?

ამ კითხვებზე პასუხის გასაცემად განვიხილოთ გარემოს შემდეგი მოდელი: ავიღოთ ძაფზე ჩამოკიდებული ერთმანეთთან ზამბარებით გადაბმული ლითონის ერთნაირი ბურთულებისაგან შემდგარი ჯაჭვი (სურ. 2.37). ბურთულების დამაკავშირებელი ზამბარებიც ერთნაირია და თითოეულის მასა ბევრად ნაკლებია ბურთულის მასაზე. ამ მოდელში გარემოს ინერტული თვისებები თავმოყრილია ბურთულებში, დრეკადი თვისებები კი – ზამბარებში. გადავხაროთ კიდურა მარცხენა ბურთულა 1 ჰორიზონტალურ სიბრტყეში ბურთულების ჯაჭვის მართობულად. მასზე მიმაგრებული ზამბარა დეფორმირდება და ბურთულა 2-ზე მოქმედებს დაიწყებს დრეკადობის ძალა, რომელიც მას აიძულებს ბურთულა 1-ის მხარეს გადაიხაროს. ბურთულა 2 გაიმეორებს ბურთულა 1-ის მოძრაობას, მაგრამ ინერტულობის გამო მას გარკვეული დროით ჩამორჩება.



სურ. 2.37

თუ ბურთულა 1-ს ვაიძულებთ შეასრულოს რხევითი მოძრაობა T პერიოდით, მაშინ ბურთულა 2-ც იმავე პერიოდით დაიწყებს რხევას, თუმცა გარკვეული ფაზით ჩამორჩება მას. ანალოგიურად, ბურთულა 2-ის წანაცვლება ბურთულა 3-ზე მოქმედი დრეკადობის ძალას აღძრავს, ამიტომ ისიც დაიწყებს რხევით მოძრაობას, მაგრამ ბურთულა 1-თან ფაზით ჩამორჩენა უფრო დიდი იქნება. ეს პროცესი მომდევნო ბურთულებზეც გავრცელდება და საბოლოოდ ყველა ბურთულა დაიწყებს იძულებით რხევით მოძრაობას ერთი და იმავე სიხშირით, მაგრამ განსხვავებული ფაზებით. შედეგად, ბურთულების ჯაჭვის გასწვრივ გავრცელდება რხევითი მოძრაობა. თითოეული ბურთულის რხევა, მისი გავრცელების მიმართულების მართობულად მიმდინარეობს, ანუ გარემოში განივი პერიოდული ტალღა ვრცელდება.

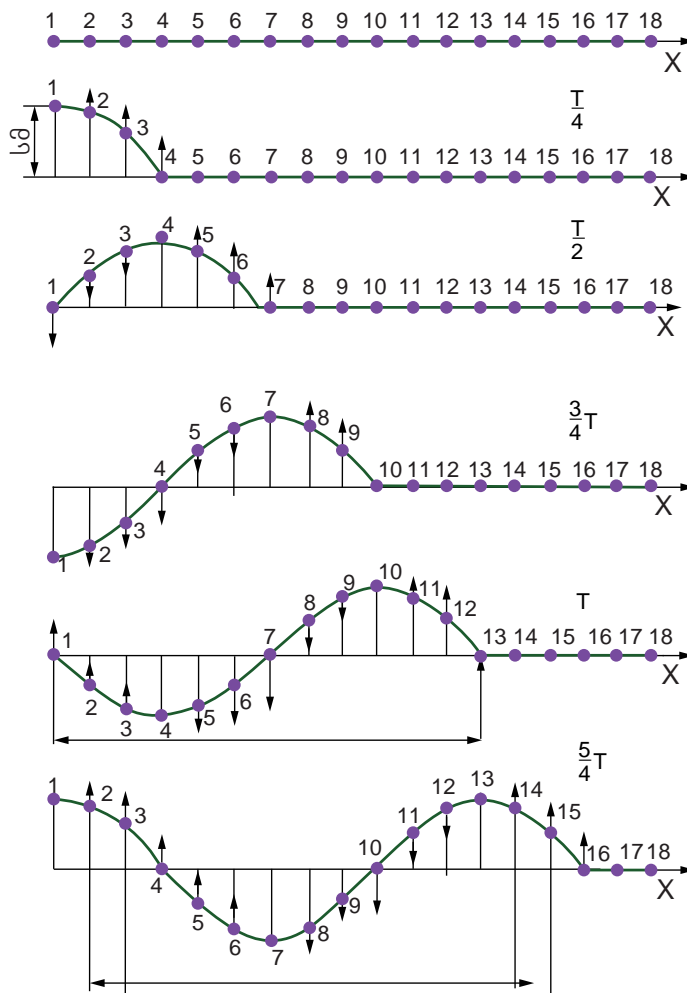
დრეკად გარემოში რხევითი მოძრაობის გავრცელებას პერიოდული მექანიკური ტალღა ეწოდება.

სურ. 2.38-ზე გამოსახულია ტალღის გავრცელების მიმდინარეობა ბურთულებისაგან შემდგარ ჯაჭვში. ბურთულების მდებარეობა პერიოდის ყოველი მეოთხედის შემდეგ ნაჩვენებია ზედახედიდან. ისრები ბურთულებზე გამოსახავს მათი მოძრაობის სიჩქარეთა ვექტორებს დროის შესაბამის მომენტში.

მას შემდეგ, რაც განივი პერიოდული ტალღა ბურთულა 13-ს მიაღწევს, ბურთულები 1 და 13 რხევას ერთნაირად დაიწყებენ: ორივე ბურთულა წონასწორობის მდებარეობაშია და ერთი მიმართულებით მოძრაობს (სურ. 2.38 ე). ამ ბურთულების რხევას ერთნაირი ფაზები აქვს (სინამდვილეში განსხვავება 2π -ის ტოლია). ასევე ერთ ფაზაში ირხევიან ბურთულები 2 და 14, 3 და 15 და ა.შ.

ერთ ფაზაში მერხვევ ორ უახლოეს ნერტილს შორის მანძილს ტალღის სიგრძე ეწოდება.

ტალღის სიგრძეს λ (ლამბდა) ასოთი აღნიშნავენ.



სურ. 2.38

ტალლის სიგრძე შეგვიძლია სხვაგვარადაც განვმარტოთ: ეს არის მანძილი, რომელსაც ტალლა პერიოდის განმავლობაში გადის. თუ გარემოში ტალლა v სიჩქარით ვრცელდება, მაშინ:

$$\lambda = vT.$$

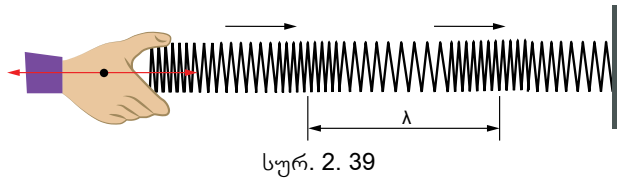
როგორც იცით, რხევის პერიოდი და სიხშირე ურთიერთშებრუნებული სიდიდეებია, ამიტომ:

$$v = \lambda\nu.$$

განსაკუთრებით უნდა აღინიშნოს, რომ ტალლის გავრცელების სიჩქარე გარემოს დრეკად თვისებებზეა დამოკიდებული. ამის გამო, ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლისას, ტალლის სიჩქარე იცვლება. მეორე მხრივ, ტალლის სიხშირე წყაროს რხევის სიხშირით განისაზღვრება და ამიტომ **ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლისას ტალლის სიხშირე არ იცვლება**. აქედან გამომდინარე, **ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლისას იცვლება ტალლის სიგრძე**.

თუ ერთი ბოლოთი დამაგრებული ზონარის მეორე ბოლო ჰარმონიულად ირხევა და მასში განივი ტალლა ვრცელდება, მაშინ, ზონარის ყველა წერტილის რხევის სიხშირე და ამპლიტუდა ერთნაირია, განსხვავებულია მხოლოდ ამ წერტილთა რხევის ფაზები.

გრძივი პერიოდული ტალღის დემონსტრირება შესაძლებელია გრძელი და მცირე სიხისტის ზამბარის გამოყენებით. თუ მის თავისუფალ ბოლოს ზამბარის გასწვრივ რხევით მოძრაობაში მოვიყვანთ, ტალღა ზამბარის გასწვრივ თანმიმდევრული შეკუმშვებისა და გაჭიმვების სახით გავრცელდება (სურ. 2.39).



სურ. 2. 39

დასკვნები:

- დრეკად გარემოში რხევითი მოძრაობის გავრცელებას პერიოდული მექანიკური ტალღა ეწოდება;
- ერთ ფაზაში მერხევ ორ უახლოეს წერტილს შორის მანძილს ტალღის სიგრძე ეწოდება;
- ტალღის გავრცელების სიჩქარე მისი სიგრძისა და რხევის სიხშირის ნამრავლის ტოლია: $v = \lambda \nu$.
- ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლისას ტალღის სიხშირე არ იცვლება, იცვლება ტალღის სიგრძე და მისი სიჩქარე.

საკონტროლო კითხვები:

1. პარაგრაფში განხილულ მოდელში გარემოს რა თვისებაა თავმოყრილი ბურთულეებში? ზამბარებში?
2. რა მანძილს გადის ტალღა რხევის ერთი პერიოდის განმავლობაში?
3. რატომ არ იცვლება ტალღის სიხშირე მისი ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლისას?
4. რა მანძილის ტოლია ტალღის სიგრძე ზამბარაში გრძივი ტალღის გავრცელებისას?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

გემი ზღვის ტალღის მიმართულებით მოძრაობისას, ყოველ 10 წამში ტალღის ბურცობებს 8-ჯერ ეჯახება, ტალღის შემხვედრი მიმართულებით მოძრაობისას კი – ყოველ 4 წამში 6-ჯერ. რისი ტოლია გემისა და ტალღის სიჩქარეები, თუ ტალღის მეზობელ ბურცობებს შორის მანძილი 6 მ-ის ტოლია?

ამოხსნა: ერთი მიმართულებით მოძრაობისას ტალღის მიმართ გემის სიჩქარის მოდული ტოლი იქნება: $v_1 - v_2 = \frac{8\lambda}{t_1} = 4,8$ მ/წმ. გემისა და ტალღის შემხვედრი მიმართულებით მოძრაობისას კი $v_1 + v_2 = \frac{6\lambda}{t_2} = 9$ მ/წმ. ამ ორი ტოლობიდან მარტივად მივიღებთ: $v_1 = 6,9$ მ/წმ და $v_2 = 2,1$ მ/წმ.

პასუხი: გემი მოძრაობს 6,9 მ/წმ სიჩქარით, ხოლო ტალღის სიჩქარეა 2,1 მ/წმ.



ამოხსენით ამოცანები:

1. რა სიხშირით ირხევა ტალღის წყარო, თუ მისგან წარმოქმნილი ტალღა გარემოში 1400 მ/წმ სიჩქარით ვრცელდება, ტალღის სიგრძე კი 35 სმ-ის ტოლია?
2. რისი ტოლია ტალღის წყაროს რხევის პერიოდი, თუ ტალღის სიგრძე 1,2 მ-ია, ტალღის გავრცელების სიჩქარე კი – 30 მ/წმ.
3. ანკესის ტივტივამ ტბის ზედაპირზე 5 წამში 4 რხევა შეასრულა. რა სიჩქარით ვრცელდება წყლის ზედაპირზე ტალღა, თუ მის მეზობელ ბურცობებს შორის მანძილი 1,5 მ-ის ტოლია?
4. ნავმა ტბის ზედაპირზე 12 წამში 8 რხევა შეასრულა. იპოვეთ ერთნაირი ფაზით მერხვევ მეზობელ წერტილებს შორის მანძილი, თუ ტალღის სიჩქარე ტბის ზედაპირზე 0,6 მ/წმ-ია.
5. ნავი ირხევა ტალღაზე, რომლის გავრცელების სიჩქარე 18 კმ/სთ-ია. მანძილი ორ მეზობელ ბურცობებს შორის კი – 15 მ. იპოვეთ ნავის რხევის პერიოდი.
6. ტბის სიგანის გასაზომად ასეთი მეთოდი გამოიყენეს: მის ერთ ნაპირზე წყალში მძიმე საგანი ჩააგდეს, რამაც ტბის ზედაპირზე ტალღები გამოიწვია. მეორე ნაპირზე მყოფმა დამკვირვებელმა დააფიქსირა, რომ ტალღამ მასთან 45 წამში მოაღწია და ტალღის ბურცობებს შორის მანძილი 0,5 მ-ის ტოლი იყო. ამასთან, 5 წამში ნაპირს 20-მა ტალღამ მოაღწია. ამ მონაცემების მიხედვით იპოვეთ ტბის სიგანე.
7. ტალღის ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლისას ტალღის სიგრძე ორჯერ გაიზარდა. როგორ შეიცვალა ტალღის გავრცელების სიჩქარე?
8. მონისძვრისას წარმოქმნილი გრძივი ტალღა დედამიწის მყარი ქანიდან ზღვაში გადადის. როგორ იცვლება ამ დროს ტალღის სიგრძე, თუ მყარ ქანსა და წყალში ამ ტალღის გავრცელების სიჩქარე, შესაბამისად 4200 მ/წმ და 1500 მ/წმ-ია.
9. როდესაც კატერი ზღვის ტალღის მიმართულებით მოძრაობს, იგი ყოველ 5 წამში ტალღის ბურცობებს 2-ჯერ ეჯახება, ტალღის შემხვედრი მიმართულებით მოძრაობისას კი – ყოველ 2 წამში 5-ჯერ. რისი ტოლია კატერისა და ტალღის სიჩქარეები, თუ ტალღის მეზობელ ბურცობებს შორის მანძილი 4 მ-ის ტოლია?
10. მონისძვრის ეპიცენტრიდან დამკვირვებლამდე განივი ტალღა გრძივ ტალღაზე 10 წამის დაგვიანებით მოვიდა. დამკვირვებლიდან რა მანძილზეა ეპიცენტრი, თუ გრძივი და განივი ტალღების გავრცელების სიჩქარე დედამიწის მყარ გრუნტში, შესაბამისად, 8000 მ/წმ და 4000 მ/წმ-ია.

§2.9 ტალღური ზედაპირები. ინტერფერენციისა და დიფრაქციის მოვლენა

ზონარში, წვრილ ღეროში, ზამბარაში ტალღები მხოლოდ მათ გასწვრივ ვრცელდება, ანუ ეს სხეულები ტალღის გავრცელების არეალს ზღუდავს. სულ სხვა სურათი იქმნება, როდესაც მერხვეი სხეული მოთავსებულია ერთგვაროვან დრეკად გარემოში, რომელშიც პერიოდული ტალღა ყველა მიმართულებით გავრცელდება და დროთა განმავლობაში გარემოს სულ უფრო მეტ წერტილს მოიყვანს რხევით მოძრაობაში. დროის მოცემულ მომენტში ეს წერტილები გარკვეულ ზედაპირს ქმნის.

ზედაპირს, რომელსაც შემოფოთება დროის მოცემულ მომენტში მიაღწევს, ტალღის ფრონტი ეწოდება.

ტალღის ფრონტი სივრცის ნაწილს, რომელშიც რხევები მიმდინარეობს, გამოყოფს იმ ნაწილისაგან, რომელშიც რხევები ჯერ არ დაწყებულა.

გარემოში, სადაც პერიოდული ტალღა გავრცელდა, იქნება ერთ ფაზაში მერხვეი წერტილები, რომლებიც გარკვეულ ზედაპირს ქმნის.

ზედაპირს, რომელიც ერთ ფაზაში მერხვეი წერტილებისგან შედგება, ტალღური ზედაპირი ეწოდება.

ცხადია, ტალღის ფრონტი ტალღური ზედაპირია, რომლის წერტილების რხევის ფაზა ნულის ტოლია.


წირს, რომელიც ტალღის წყაროდან გამოდის და ტალღური ზედაპირების მართობულია, სხივი ეწოდება. სწორედ სხივის მიმართულებაა მიჩნეული ტალღის და, შესაბამისად, ენერგიის გავრცელების მიმართულებად.

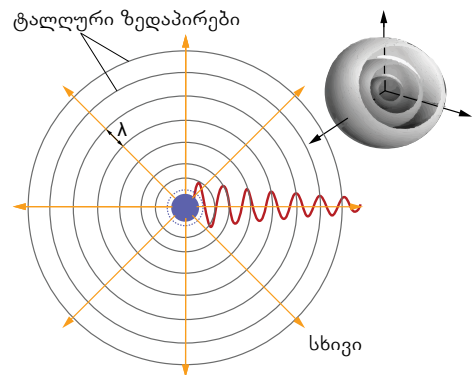
ტალღური ზედაპირის ფორმის მიხედვით განასხვავებენ **სფერულ, ცილინდრულ, ბრტყელ** და სხვა ტიპის ტალღებს.

სფერული ტალღა წარმოიქმნება, ერთგვაროვან გარემოში, როდესაც ტალღის წყაროს მფეთქავი სფერო წარმოადგენს (სურ. 2.40). ამ შემთხვევაში ტალღური ზედაპირები კონცენტრული სფეროებია, სხივები კი მფეთქავი სფეროს რადიუსების გასწვრივაა მიმართული.

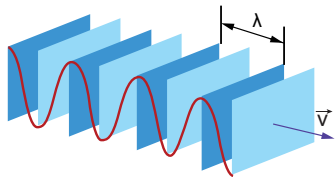
სფერულ ტალღაში მერხვეი ნაწილაკების ამპლიტუდა ტალღის წყაროდან დაშორებასთან ერთად აუცილებლად მცირდება. ამის მიზეზი ისაა, რომ წყაროს მიერ გამოსხივებული ენერგია თანაბრად ნაწილდება იმ სფეროს ზედაპირზე, რომლის რადიუსი ტალღის გავრცელებასთან ერთად უწყვეტად იზრდება. იგივე ეხება **ცილინდრულ ტალღას**, რომელსაც მაგალითად, ერთგვაროვან გარემოში მფეთქავი ღერო ქმნის.

სხვა სურათია **ბრტყელი ტალღის** შემთხვევაში. ასეთი ტალღა შეიძლება მივიღოთ, თუ დრეკად ერთგვაროვან გარემოში დიდ ფირფიტას მისი ზედაპირის მართობულად რხევით მოძრაობაში მოვიყვანთ. ამ შემთხვევაში ფართობი, რომელზეც ენერგია ნაწილდება უცვლელია, ამიტომ თუ წინააღმდეგობის ძალები მცირეა, ტალღის ამპლიტუდა არ შეიცვლება. ბრტყელი ტალღების ტალღური ზედაპირები სიბრტყეებია, სხივები კი – ფირფიტის მართობული პარალელური ნრფეები. სურ. 2.41-ზე გრძივი ბრტყელი ტალღის ტალღური ზედაპირებია ნაჩვენები, რომელზეც ლურჯად მაქსიმალური შეკუმშვის არე, ცისფრად კი მინიმალური შეკუმშვის არეა გამოსახული.

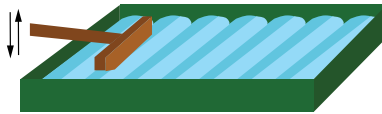
 როგორ შეიცვლება სურ. 2.42 -ზე და სურ. 2.43-ზე ნაჩვენები ტალღების ამპლიტუდები გავრცელების პროცესში? რატომ?



სურ. 2. 40



სურ. 2. 41



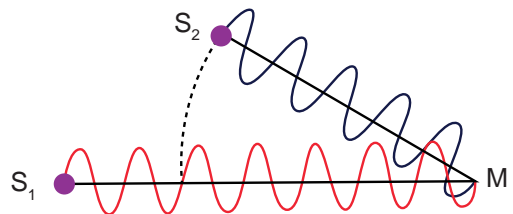
სურ. 2. 42



სურ. 2. 43

საინტერესო სურათი მიიღება გარემოს იმ ნაწილში, სადაც ერთმანეთს ორი ტალღა ხვდება. როდესაც ტალღების ამპლიტუდები დიდი არ არის, მათთვის მართებულია სუპერპოზიციის პრინციპი: თუ სივრცის რომელიღაც წერტილში ტალღები რამდენიმე წყაროდან მოდის, ადგილი აქვს ამ ტალღების ზედდებას. შედეგად, სივრცის ზოგიერთ წერტილში რხევების გაძლიერებას დავაკვირდებით, ზოგიერთში კი – შესუსტებას. გავარკვიოთ ამ მოვლენის მიზეზი.

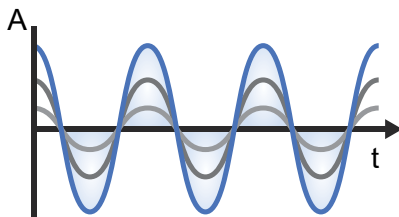
ვთქვათ, სივრცის რომელიღაც M წერტილში ერთმანეთს S_1 და S_2 წყაროდან წამოსული ტალღები ხვდება (სურ. 2.44). ამასთან, წყაროების სიხშირეები ერთნაირია და ფაზათა სხვაობა კი მუდმივია. ასეთ ტალღებს **კოჰერენტული ტალღები** ეწოდება.



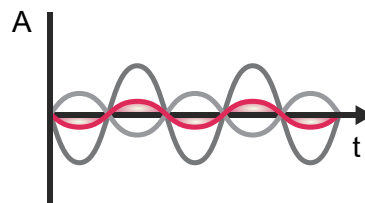
სურ. 2. 44

თუ M წერტილში მოსული ტალღების ფაზები ერთნაირია, მაშინ ამ წერტილში დაიმზირება რხევა გაზრდილი ამპლიტუდით (სურ. 2.45, ლურჯი გრაფიკი). ჯამური ამპლიტუდა ცალკეული ტალღების ამპლიტუდათა ჯამის ტოლი იქნება: $A = A_1 + A_2$.

თუ M წერტილში მოსული ტალღების ფაზები საპირისპიროა, მაშინ ამ წერტილში დაიმზირება რხევა შემცირებული ამპლიტუდით (სურ. 2.46, წითელი გრაფიკი). ჯამური ამპლიტუდა კი ტოლი იქნება: $A = A_1 - A_2$.



სურ. 2. 45

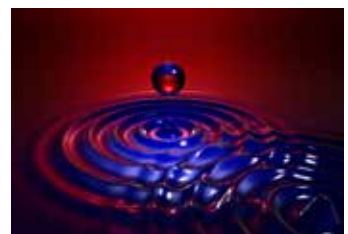


სურ. 2. 46

უნდა აღინიშნოს, რომ ზემოთ აღწერილი სურათები დროის მიხედვით არ იცვლება. **ტალღების ზედდების მოვლენას, რომლის შედეგადაც სივრცის ზოგიერთ წერტილში ჯამური რხევების დროში მდგრადი გაძლიერება ან შესუსტება დაიმზირება, ინტერფერენცია ეწოდება.**

სურ. 2.47-ზე ნაჩვენებია წყლის ზედაპირზე ორი ტალღის ინტერფერენციის შედეგი.

ვთქვათ, ტბაში მიცურავს კატარღა და წყლის ზედაპირზე წარმოქმნის ტალღას. თუ გავრცელების გზაზე ტალღას წყლიდან ამოშვერილი კლდე ან ტოტი შეხვდება, კლდის უკან „ჩრდილი“ წარმოიქმნება (უშუალოდ კლდის უკან ტალღა ვერ გავა), ხოლო ტოტის უკან „ჩრდილი“ არ წარმოიქმნება (ტალღა ტოტს გარს შემოუვლის).

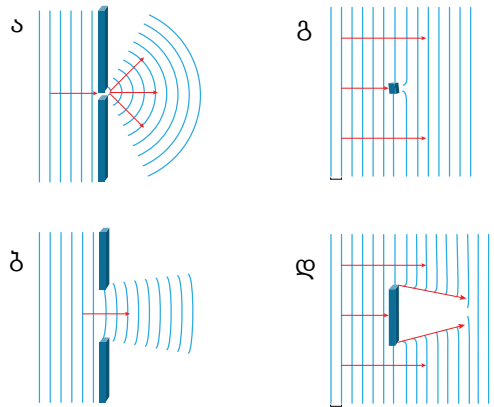


სურ. 2.47

ტალღის მიერ წინააღმდეგობის გარშემოვლის მოვლენას, დიფრაქცია ეწოდება.

მოყვანილ მაგალითში ტალლის დიფრაქციას ადგილი აქვს ტოტზე, კლდეზე კი დიფრაქცია არ დაიმზირება. თუმცა, ეს ყოველთვის ასე არ არის. თუ კლდე ნაპირიდან შორსაა, მისგან გარკვეული მანძილის შემდეგ „ჩრდილი“ გაქრება – ტალლა კლდეს გარს შემოუვლის (სურ. 2.48 დ). ამრიგად, დიფრაქციის მოვლენას ადგილი აქვს იმ შემთხვევაში, თუ დაბრკოლების (ან ხვრელის) წირითი ზომები ტალლის სიგრძეზე ნაკლებია ან იმავე თანრიგისაა. ამ დროს დიფრაქცია დაბრკოლების (ან ხვრელის) უკან ნებისმიერი წერტილიდან დაიმზირება. როდესაც დაბრკოლების (ან ხვრელის) ზომები ტალლის სიგრძეზე მეტია, დიფრაქცია დაბრკოლების (ან ხვრელის) უკან მხოლოდ ისეთ მანძილზე დაიმზირება, რომელიც დაბრკოლების ზომაზე ბევრად მეტია.

სურ. 2.48 ა,ბ-ზე და სურ. 2.48 გ,დ-ზე ნაჩვენებია დიფრაქციული სურათები, შესაბამისად, ხვრელსა და წინააღმდეგობაზე.



სურ. 2. 48

დასკვნები:

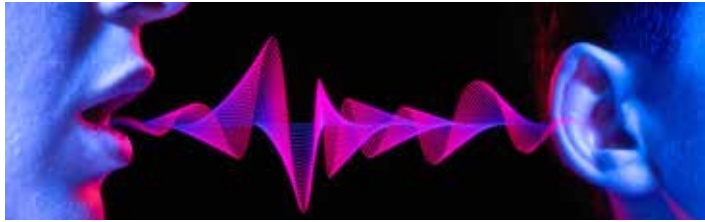
- ზედაპირს, რომელსაც შემფოთება დროის მოცემულ მომენტში მიაღწევს, ტალლის ფრონტი ეწოდება;
- ზედაპირს, რომელიც ერთ ფაზაში მერხვევი წერტილებისგან შედგება, ტალღური ზედაპირი ეწოდება;
- წირს, რომელიც ტალლის წყაროდან გამოდის და ტალღური ზედაპირების მართობულია, სხივი ეწოდება;
- ტალღების ზედდების მოვლენას, რომლის შედეგადაც სივრცის ზოგიერთ წერტილში ჯამური რხევების დროში მდგრადი გაძლიერება ან შესუსტება დაიმზირება, ინტერფერენცია ეწოდება;
- ინტერფერენციას ადგილი აქვს როდესაც ტალღების წყაროების სიხშირეები ერთნაირია და მათ შორის ფაზათა სხვაობა კი მუდმივი;
- ტალლის მიერ წინააღმდეგობის გარშემოვლის მოვლენას, დიფრაქცია ეწოდება.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა წარმოქმნის სფერულ ტალღას? ცილინდრულ ტალღას? ბრტყელ ტალღას?
2. როგორ ტალღებს ეწოდება კოჰერენტული?
3. სივრცის რომელ წერტილში აძლიერებს ტალღები ერთმანეთს?
4. როგორი უნდა იყოს ხვრელის ზომა, რომ მასზე ტალლის დიფრაქცია განხორციელდეს?

§ 2.10 ბგერითი ტალღები

ბგერები (ხმები), რომელსაც ადამიანის ყური აღიქვამს, გარე სამყაროზე ინფორმაციის მიღების ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი წყაროა. ბგერები ადამიანებს საშუალებას აძლევს დაამყარონ ურთიერთობა (სურ. 2.49), გამოხატონ ემოციები, დატკბნენ მუსიკალური ნაწარმოებებით და სხვა. ქარისა და ზღვის ხმაური, მოძრავი მანქანის ხმები, ჭექა-ქუხილი, ცხოველების ყვირილი და მრავალი სხვა, მუდმივად ცვალებად გარე პირობებთან უკეთესი ადაპტირების საშუალებას გვაძლევს. როგორ გადაიცემა ინფორმაცია ბგერით? როგორია ბგერის ძირითადი თვისებები?



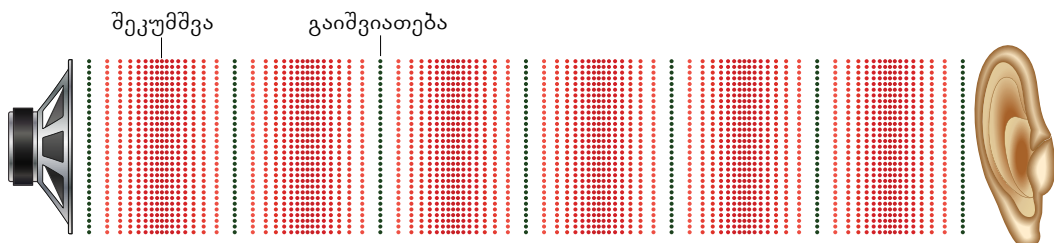
სურ. 2.49

ფართო გაგებით, ბგერა დრეკადი გარემოს ნაწილაკების რხევითი მოძრაობაა, რომელიც ტალღის სახით ვრცელდება.

გარემოში გავრცელებულ დრეკად ტალღებს, რომლებიც ადამიანში სმენით შეგრძნებებს იწვევს, ბგერითი ტალღები ეწოდება.

ახლა დეტალურად განვიხილოთ ბგერითი ტალღების წარმოქმნისა და აღქმის პროცესი.

ბგერითი ტალღის წყაროს, მაგალითად, დინამიკის, ხმის იოგების, სიმის რხევა ჰაერში შეკუმშულ და გაიშვიათებულ არეებს წარმოქმნის, რომელიც გრძივი ტალღის სახით ვრცელდება (სურ. 2.50). შეკუმშულ არეებში ჰაერის წნევა ატმოსფერულზე მეტია, გაიშვიათებულ არეებში კი – ატმოსფერულზე ნაკლები.



სურ. 2.50


მიაღწევს რა ადამიანის ყურს, ბგერითი ტალღები იწვევს დაფის აპკის იძულებით რხევებს სიხშირით, რომელიც ტალღის წყაროს სიხშირის ტოლია. შიდა ყურში განლაგებული 20 000-ზე მეტი წამწამოვანი რეცეპტორი მექანიკურ რხევებს ელექტრულ იმპულსებად გარდაქმნის. სწორედ ამ იმპულსების თავის ტვინში გადაცემისას ადამიანს უჩნდება სმენითი შეგრძნებები. ადამიანის ყური ბგერის სახით აღიქვამს ტალღებს, რომელთა სიხშირე $16 \text{ კჰც} \div 20 \text{ კჰც}$ დიაპაზონშია.

ბგერას შეისწავლის ფიზიკის ნაწილი, რომელსაც **აკუსტიკა** ეწოდება.

უმეტეს შემთხვევაში, დიდი ზომის სხეულის მაღალი სიხშირით ამოძრავება რთულია, ამიტომ, რაც უფრო მცირე ზომისაა ტალღის წყარო, მით მაღალი რხევის სიხშირისაა ბგერითი ტალღა. მილიმეტრიან წყაროებს შეუძლია აღძრას მაღალი სიხშირის ($\nu > 20 \text{ კჰც}$) ტალღები, რომლებსაც **ულტრაბგერით ტალღებს** უწოდებენ. ისეთ წყა-

როებს, რომელთა ზომები ადამიანის ყოველდღიური ცხოვრების მახასიათებელ მანძილებს აღემატება, შეუძლია აღძრას დაბალი სიხშირის ($v < 16$ ჰც) ტალღები. მათ **ინფრაბგერით ტალღებს** უწოდებენ. ასეთი ტალღები წარმოიქმნება, მაგალითად, ჭეჭა-ქუხილის, მიწისძვრის, ვულკანის ამოფრქვევის დროს. ულტრაბგერითი და ინფრაბგერითი ტალღები ადამიანში სმენით შეგრძნებებს არ იწვევს, მაგრამ ამ ტალღების აღქმა შეუძლია ზოგიერთ არსებებს. მაგალითად, დელფინს აქვს უნარი აღძრას და აღიქვას 1 მგჰც სიხშირის ულტრაბგერითი ტალღები. ბგერითი ტალღები წარმოიქმნება წყაროებით, რომელთა ზომები რამდენიმე მილიმეტრიდან ათეულობით მეტრამდე მერყეობს.

ბგერითი ტალღების გავრცელების აუცილებელი პირობა დრეკადი გარემოს არსებობაა. ამაში შეგვიძლია ცდით დავრწმუნდეთ.

 ჩავრთოთ ქსელში ელექტროზარი. გარემოში ბგერითი ტალღა გავრცელდება და ზარის ხმას გავიგებთ. შემდეგ ზარი ვაკუუმური ზარხუფის ქვეშ მოვათავსოთ, ჰაერი ამოვტუმბოთ და ზარი კვლავ ჩავრთოთ (სურ. 2.51). ზარის ხმას ვერ გავიგებთ (ან გავიგებთ ძალიან სუსტ ხმას თუ ხუფის ქვეშ ჰაერია დარჩენილი). ეს ნიშნავს, რომ ვაკუუმში ბგერითი ტალღები არ ვრცელდება. ამის მიზეზი ისაა, რომ ტალღის წყაროდან ენერჯიის გადამტანი ნაწილაკები ვაკუუმში არ არის.



სურ. 2.51

ბგერითი ტალღის გავრცელების სიჩქარე ნაწილაკებს შორის ენერჯიის გადაცემის სიჩქარით განისაზღვრება. აირებში ბგერის სიჩქარე ოდნავ ნაკლებია ნაწილაკების სითბური მოძრაობის საშუალო სიჩქარეზე და აირის ტემპერატურის ზრდასთან ერთად მატულობს. ჰაერში 20°C ტემპერატურაზე ბგერითი ტალღის გავრცელების სიჩქარე 343 მ/წმ, ანუ 1235 კმ/სთ-ია.

ბგერის სიჩქარე ჰაერში პირველად 1708 წელს ინგლისელმა მეცნიერმა უილიამ დერჰამმა გაზომა. ეკლესიის სახურავიდან ის აკვირდებოდა 19 კმ-ით დაშორებული ქვემეხის გასროლას და ზომავდა დროის შუალედს გასროლის ნათებასა და ხმის მოსვლის მომენტებს შორის.

რაც მეტია ნივთიერების ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერჯია, მით მეტია ბგერის სიჩქარე. ამის გამო, როგორც წესი, მყარ გარემოში ბგერა უფრო დიდი სიჩქარით ვრცელდება, ვიდრე – სითხეში. სითხეში კი – უფრო დიდი სიჩქარით, ვიდრე – აირში. მაგალითად, ზღვის წყალში 20°C -ზე ბგერის გავრცელების სიჩქარე 1513 მ/წმ-ია. ფოლადში გავრცელება შეუძლია როგორც განივ, ასევე გრძივ ბგერით ტალღებს, მაგრამ მათი გავრცელების სიჩქარე განსხვავებულია: განივისა – 3300 მ/წმ-ია, გრძივისა კი – 5900 მ/წმ.

ცხრილში მოცემულია ბგერის გავრცელების სიჩქარის მნიშვნელობები სხვადასხვა გარემოში, მითითებული ტემპერატურის დროს:

გარემო	t, °C	v, მ/წმ
ჰაერი	0	331
ჰაერი	20	343
წყალი	20	1490
გლიცერინი	20	1920
ვერცხლისწყალი	20	1450
ყინული	0	3280
მინა	20	5300
თუჯი	20	3580

ბგერითი ტალღები ცუდად ვრცელდება ფოროვან გარემოში (ბამბა, პარალონი, კორპი და სხვა). ასეთ გარემოში ტალღა მცირე მანძილის გავლის შემდეგ მალე მიიღევა. ამის გამო, ფოროვან მასალებს ხმის იზოლაციისა და შთანთქმისათვის იყენებენ.

ბგერითი ტალღის ძირითადი ფიზიკური მახასიათებლებია მისი ინტენსივობა და სპექტრი.

ბგერის საშუალო ინტენსივობა სივრცის მოცემულ ნერტილში ტოლია სხივის მართობულად მოთავსებულ ერთეულოვან ფართობში დროის ერთეულში გასული ენერჯისა და ვტ/მ²-ში იზომება. ადამიანის ყურის მიერ აღქმული ბგერის ინტენსივობა ძალიან დიდ დიაპაზონშია მოთავსებული – $\sim 10^{-12}$ ვტ/მ²-დან (სმენადობის ზღვარი), ~ 1 ვტ/მ²-მდე (ტკივილის შეგრძნების ზღვარი). უფრო დიდი ინტენსივობის ბგერები ტკივილს იწვევს და გარკვეული მნიშვნელობის მიღწევის შემდეგ შეიძლება ყურის ტრავმა გამოიწვიოს.

ბგერის მინიმალურ ინტენსივობას, რომლის ქვევით ადამიანის ყური ბგერას ვეღარ აღიქვამს, **სმენადობის ზღვარი** ეწოდება. ადამიანის ყური ყველაზე მგრძობიარეა დაახლოებით 3 კჰც სიხშირის ტალღების მიმართ და, შესაბამისად, მათ აღსაქმელად 10^{-12} ვტ/მ²-ინტენსივობა საკმარისია. 50 ჰც სიხშირის ბგერითი ტალღის აღსაქმელად კი, ბგერის ინტენსივობა 10^{-7} ვტ/მ² უნდა იყოს.

ბგერის კიდევ ერთი მახასიათებელია **სპექტრი**. სპექტრი ეწოდება სხადასხვა სიხშირის რხევების ბგერათა ნაკრებს, რომელიც მოცემულ ბგერით სიგნალს ქმნის. სპექტრი შეიძლება იყოს **უწყვეტი ან დისკრეტული**.

უწყვეტი სპექტრი გულისხმობს, რომ მოცემულ ბგერათა ნაკრებში არის ტალღები, რომელთა სიხშირეები მოცემულ სპექტრულ დიაპაზონს მთლიანად ავსებს, ანუ, ბგერათა ნაკრებში გვაქვს რაიმე ინტერვალიდან აღებული ნებისმიერი სიხშირის ტალღა. ამ შემთხვევაში ვიტყვით, რომ ბგერათა ამ ნაკრებს უწყვეტი სპექტრი აქვს.

დისკრეტული კი ისეთი სპექტრია, რომელშიც ბგერით სიგნალს გარკვეული სიხშირის ტალღების სასრული რაოდენობა ქმნის. დისკრეტული სპექტრის მაგალითია მუსიკალური აკორდი.

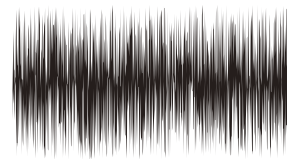
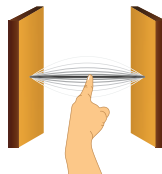
სპექტრის ტიპის მიხედვით ბგერები იყოფა **მუსიკალურ ტონებად და ხმაურად**.

მუსიკალური ტონი იქმნება ჟღერადი სხეულის პერიოდული რხევებით და ერთი სიხშირის ჰარმონიულ რხევას წარმოადგენს. ასეთ ბგერას გვაძლევს კამერტონი, დაჭიმული სიმი (სურ. 2.52) და სხვა.

ხმაური არის ბგერითი ტალღების სიხშირეების, ამპლიტუდების და სიგნალების ხანგრძლივობების უნესრიგო ცვლილება. ის ხელს გვიშლის სასარგებლო ინფორმაციის მიღებაში (სურ. 2.53). ხმაური, უწყვეტი სპექტრის მაგალითია.



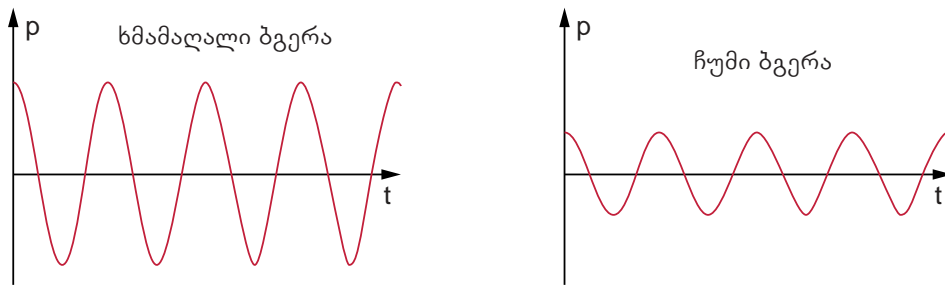
სურ. 2.52



სურ. 2.53

ბგერითი ტალღის მახასიათებელი ყველა ფიზიკური სიდიდე – ამპლიტუდა, სიხშირე, ტალღის სიგრძე, ადამიანის მიერ ბგერის აღქმის თავისებურებებზე დამოკიდებული არ არის, ამიტომ მათ ბგერის ობიექტურ ან ფიზიკურ მახასიათებლებს უწოდებენ. ბგერის სუბიექტური მახასიათებლები – **ხმამალბობა, ტონის სიმაღლე, ტემბრი** კი ადამიანის სმენის თავისებურებებითაა განპირობებული, ამიტომ მათ ფიზიოლოგიურ მახასიათებლებს უწოდებენ. ცხადია, ბგერის ფიზიკური და ფიზიოლოგიური მახასიათებლები ერთმანეთთან კავშირშია.

ბგერის ხმამაღლობა პირველ რიგში ბგერითი ტალღის ამპლიტუდით განისაზღვრება (სურ. 2.54), მაგრამ ბგერითი ტალღის სიხშირეზეცაა დამოკიდებული. ამის მიზეზი ისაა, რომ ადამიანის ყური დაბალი და მაღალი სიხშირეების ბგერებს ცუდად აღიქვამს, ყველაზე უკეთ კი – საშუალო (1-3 კჰც) სიხშირის ბგერით ტალღებს.

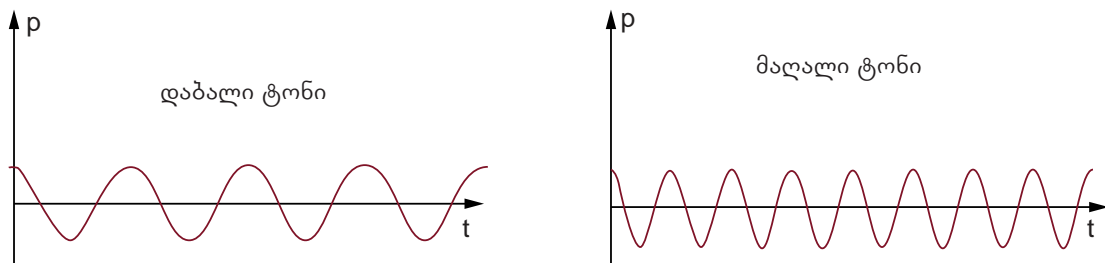


სურ. 2. 54

ბგერის ხმამაღლობას დეციბელებში (დბ) ზომავენ.

გაითვალისწინეთ! ხმამაღალმა ბგერამ შეიძლება სმენის დაქვეითება და სიყრუეც კი გამოიწვიოს. ეს განსაკუთრებით ხმამაღალი მუსიკის ყურსასმენებით მოსმენას ეხება!

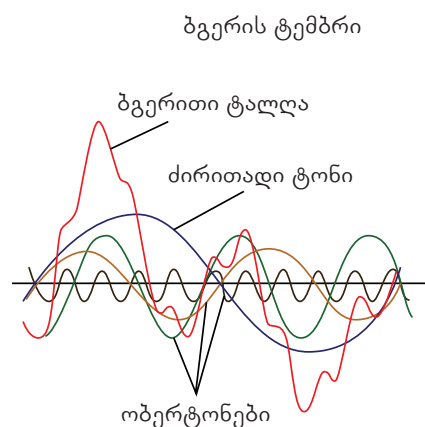
ტონის სიმაღლე ძირითადად ბგერითი ტალღის სიხშირით განისაზღვრება: რაც უფრო დიდია სიხშირე, მით მაღალი ტონისაა ბგერა (სურ. 2.55). მაგალითად, პირველი ოქტავის დო 261,62 ჰც სიხშირისაა, მეორე ოქტავის დო კი – 523,25 ჰც სიხშირის.



სურ. 2. 55

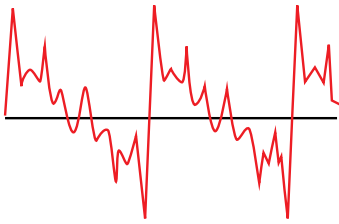
ადამიანის უნარი, ბგერები სიხშირის მიხედვით გაარჩიოს, დამოკიდებულია აგრეთვე ბგერის ინტენსივობაზე. ინტენსივობის გაზრდისას ბგერის ტონის სიმაღლე უფრო დაბალი გვეჩვენება.

ბგერის ტემბრი ბგერითი ტალღის შემადგენლობით განისაზღვრება: გარდა ძირითადი სიხშირისა, რომლის მიხედვით ტონის სიმაღლეს ვაფასებთ, ნებისმიერი ბგერა შეიცავს უფრო დაბალი და უფრო მაღალი ტონის სიხშირეებს – **ობერტონებს** (სურ. 2.56). სწორედ ტემბრის წყალობით განვასხვავებთ ადამიანს ხმით, ერთმანეთისაგან ვარჩევთ ფორტეპიანოს და ფლეიტას და ა.შ. (სურ. 2.57). ყოველ მუსიკალურ ინსტრუმენტს, ყოველ ადამიანს, თავისი განუმეორებელი ტემბრი აქვს.

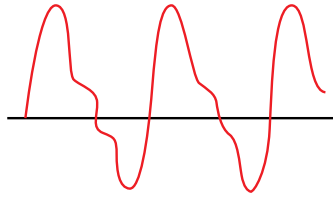


სურ. 2. 56

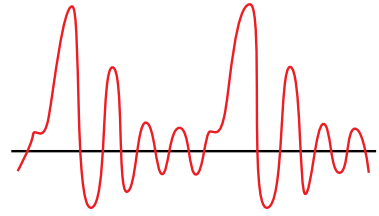
ფორტეპიანო



ფლეიტა



ადამიანის ხმა



სურ. 2. 57

<http://tiny.cc/1n87vz>



დასკვნები:

- გარემოში გავრცელებულ დრეკად ტალღებს, რომლებიც ადამიანში სმენით შეგრძნებებს ინვევს, ბგერითი ტალღები ეწოდება;
- ფიზიკის ნაწილს, რომელიც ბგერას შეისწავლის აკუსტიკა ეწოდება;
- ბგერითი ტალღა ვაკუუმში არ ვრცელდება;
- ბგერის ინტენსივობა ბგერითი ტალღის მიერ ფართობის ერთეულზე დროის ერთეულში გადატანილ ენერგიას გვიჩვენებს და ვტ/მ²-ში იზომება;
- ბგერის მინიმალურ ინტენსივობას, რომლის ქვევით ადამიანის ყური ბგერას ვეღარ აღიქვამს, სმენადობის ზღვარი ეწოდება;
- სპექტრის ტიპის მიხედვით ბგერები იყოფა მუსიკალურ ტონებად და ხმაურად;
- მუსიკალური ტონი ერთი სიხშირის ჰარმონიული რხევაა;
- ხმაური დიდი რაოდენობის, სხვადასხვა სიხშირის, მაგრამ ერთნაირი ამპლიტუდების არახანგრძლივი ბგერების ერთობლიობაა.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა დიაპაზონის ტალღებს აღიქვამს ადამიანის ყური?
2. რომელ ტალღებს უწოდებენ ულტრაბგერებს? ინფრაბგერებს?
3. რა არის ბგერის უწყვეტი სპექტრი? დისკრეტული სპექტრი?
4. რა განსაზღვრავს ბგერის ხმამაღლობას?
5. რა განსაზღვრავს ტონის სიმაღლეს?
6. რა არის ობერტონები?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

ერთმანეთისაგან დიდი მანძილით დაშორებული ორი დელფინი შემხვედრი მიმართულებით მოდულით ტოლი მუდმივი v_1 სიჩქარით წრფივად მოძრაობს. პირველი დელფინი გამოსცემს ბგერის ხანმოკლე იმპულსებს t_1 წამიანი ინტერვალით. განსაზღვრეთ დროის რა ინტერვალით მიიღებს ბგერით იმპულსებს მეორე დელფინი, თუ წყალში ბგერის გავრცელების სიჩქარე v_2 -ის ტოლია.

ამოხსნა: პირველი ბგერის იმპულსი მომდევნო იმპულსის გაშვებამდე $v_2 t_1$ მანძილს გაივლის. ამავე დროში დელფინი იმავე მიმართულებით $v_1 t_1$ მანძილზე გადაადგილ-

დება, ამიტომ მანძილი იმ წერტილიდან, რომელსაც პირველმა იმპულსმა t_1 დროში მიაღწია, მეორე იმპულსის გაშვების წერტილამდე, ტოლი იქნება: $S_1 = v_2 t_1 - v_1 t_1$. ბგერის იმპულსი და მეორე დელფინი ერთმანეთს $v_1 + v_2$ სიჩქარით უახლოვდებიან. შესაბამისად, საძიებელი ინტერვალის საპოვნელად, ერთმანეთის მომდევნო ბგერებს შორის მანძილი მეორე დელფინისა და ბგერის ფარდობით სიჩქარეზე უნდა გავყოთ. მივიღებთ: $t_2 = \frac{t_1(v_2 - v_1)}{v_2 + v_1}$;

პასუხი: დროის ინტერვალი, რომლითაც მეორე დელფინი მიიღებს ბგერით იმპულსებს, $t_2 = \frac{t_1(v_2 - v_1)}{v_2 + v_1}$ გამოსახულებით განისაზღვრება.



ამოხსენით ამოცანები:

1. როგორც ცნობილია, ადამიანის ყური ბგერის სახით აღიქვამს რხევებს, რომლებიც 16 ჰც-დან 20 კჰც დიაპაზონშია მოთავსებული. ბგერის სიჩქარე ჰაერში 340 მ/წმ-ის ტოლად მიიჩნეოდა და გამოსახეთ ეს დიაპაზონი ტალღის სიგრძით.

2. ქალის ყველაზე მაღალი ტონის სიხშირე ჰაერში 1360 ჰც-ია. რა ტალღის სიგრძისაა ეს ბგერა? ბგერის სიჩქარე ჰაერში 340 მ/წმ-ის ტოლად მიიჩნეოდა.

3. ქუხილის ხმამ დამკვირვებლამდე გაელვებიდან 18 წამის შემდეგ მოაღწია. დამკვირვებლიდან რა მანძილზე მოხდა გაელვება?

4. როგორ და რამდენჯერ შეიცვლება ბგერის ტალღის სიგრძე მისი ჰაერიდან წყალში გადასვლისას, თუ ბგერის სიჩქარე ჰაერსა და წყალში, შესაბამისად 340 მ/წმ და 1500 მ/წმ-ია?

5. მატარებლის საყვირიდან გაშვებულმა ბგერამ რკინიგზის სადგურზე მყოფ დამკვირვებლამდე 10 წმ-ში მიაღწია. რამდენ ხანში მივა მატარებელი სადგურზე სიგნალის გაშვების შემდეგ, თუ იგი მოძრაობს წრფივად მუდმივი 17 მ/წმ სიჩქარით? ბგერის გავრცელების სიჩქარე ჰაერში 340 მ/წმ-ია.

6. ტბაზე მყოფი ერთი ნავიდან მეორისაკენ ერთდროულად ორი ბგერითი სიგნალი გაუშვეს – ერთი ჰაერით, მეორე კი – წყლით. მეორე ნავზე მყოფმა დამკვირვებელმა დააფიქსირა, რომ ჰაერით ბგერა 23,2 წამით გვიან მოვიდა, ვიდრე წყლით. რა მანძილია ნავებს შორის, თუ ბგერის სიჩქარე ჰაერსა და წყალში, შესაბამისად 340 მ/წმ და 1500 მ/წმ-ია?

7. როდესაც დამკვირვებელმა ხმის მიხედვით აღიქვა, რომ თვითმფრინავი ზუსტად მის ზემოთ იყო და აიხედა, დაინახა, რომ ის ვერტიკალიდან 30° -იანი კუთხით ჩანდა. იპოვეთ თვითმფრინავის სიჩქარე, თუ ბგერის სიჩქარე ჰაერში 340 მ/წმ-ის ტოლია.

8. 720 მ სიმაღლის შახტში ჩავარდა ქვა. ჩავარდნის მომენტიდან რა დროის შემდეგ გაიგონებს შახტის ნაპირთან მდგომი დამკვირვებელი ფსკერზე ქვის დავარდნის ხმას? ბგერის სიჩქარე ჰაერში 360 მ/წმ-ის ტოლად მიიჩნეოდა.

9. 180 მ სიმაღლის მთიდან ჰორიზონტალურად 40 მ/წმ სიჩქარით გაისროლეს ჭურვი, რომელიც დაბლობზე დაცემისას აფეთქდა. გასროლიდან რა დროში გაიგონებს მსროლელი ჭურვის აფეთქების ხმას? ბგერის სიჩქარე ჰაერში 360 მ/წმ-ის ტოლად მიიჩნეოდა.

10. დიდი მანძილით დაშორებული ორი მატარებელი მოძრაობს წრფივად შემხვედრი მიმართულებით, მოდულით ტოლი, მუდმივი 30 მ/წმ სიჩქარით. პირველი მატარებელიდან უშვებენ ბგერის ხანმოკლე იმპულსებს დროის 12 წამიანი ინტერვალით. დროის რა ინტერვალით მიიღებენ ბგერით იმპულსებს მეორე მატარებელზე თუ ბგერის გავრცელების სიჩქარე ჰაერში 360 მ/წმ-ია.

§ 2.11 დოპლერის ეფექტი. აკუსტიკური რეზონანსი. ექო

ბგერითი ტალღების გავრცელებისას ადგილი აქვს მრავალ საინტერესო მოვლენას, რომელიც ყოველდღიურ ცხოვრებაში გვხვდება. ალბათ შეგიძინებიათ, როგორ იცვლება სასწრაფო დახმარების ავტომობილის გვერდზე ჩავლისას მისი სირენის უღერადობა. ხშირად, როდესაც სატვირთო ავტომობილი შენობას ჩაუვლის, მისი ფანჯრის მინები ზანზარებს. მთაში ლაშქრობისას ყველას მოგისმენიათ კლდის გამოძახილი. რა მოვლენებთან გვაქვს საქმე? როგორ აიხსნება ისინი? შევეცადოთ ამ კითხვებზე პასუხი გავცეთ.

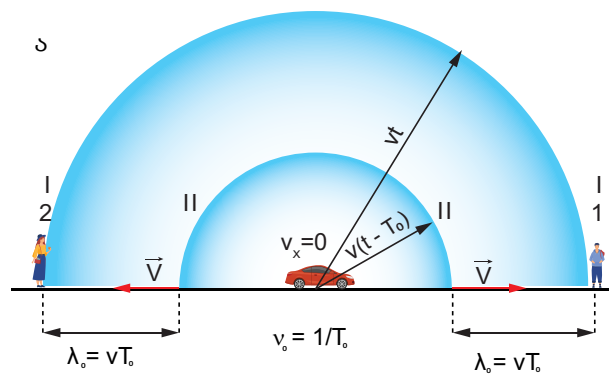
დოპლერის ეფექტი. წინა პარაგრაფიდან იცით, რომ ტონის სიმაღლე ბგერითი ტალღის წყაროს სიხშირით განისაზღვრება, მაგრამ ერთი და იმავე წყაროს სიხშირე დამკვირვებელმა შეიძლება სხვადასხვანაირად აღიქვას. ეს იმაზეა დამოკიდებული, მოძრაობს თუ არა ბგერითი ტალღის წყარო და დამკვირვებელი ერთმანეთის მიმართ. მაგალითად, როდესაც პოლიციის ავტომობილი გვიახლოვდება, მისი სირენა უფრო მაღალი ტონით აღიქმება, ვიდრე მაშინ, როდესაც ის გვშორდება. მსგავსი ეფექტი პირველად 1842 წელს ავსტრიელმა ფიზიკოსმა კრისტიან დოპლერმა თეორიულად იწინასწარმეტყველა და აღწერა.



კრისტიან დოპლერი (1803-1853)

დამკვირვებლის მიერ აღქმული ტალღის სიხშირისა და შესაბამისად, ტალღის სიგრძის ცვლილების მოვლენას, როდესაც დამკვირვებელი და ტალღის წყარო ერთმანეთის მიმართ მოძრაობს, დოპლერის ეფექტი ეწოდება.

ჯერ განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც ბგერის წყარო და დამკვირვებლები უძრავნი არიან (სურ. 2.58 ა). ამ შემთხვევაში v_0 სიხშირის წყაროს სიგნალს დამკვირვებლები იმავე v_0 სიხშირით (λ_0 ტალღის სიგრძით) აღიქვამენ. ვთქვათ, ტალღის მაღალი წნევის I არე დამკვირვებლებთან გამოსხივებიდან t დროის შემდეგ აღწევს. შემდეგი უახლოესი მაღალი წნევის არე დამკვირვებლებთან T_0 დროის დაგვიანებით მიაღწევს, სადაც T_0 ბგერითი წყაროს რხევის პერიოდია.



სურ. 2. 58 ა

ორივე დამკვირვებლის მიერ აღქმული ბგერითი ტალღის სიხშირე იქნება:

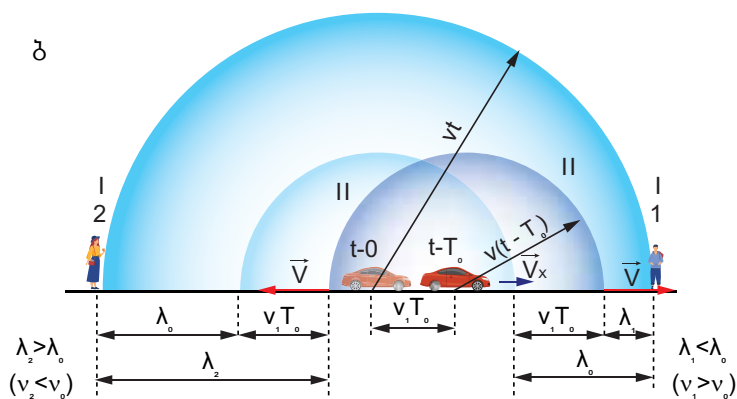
$$v_0 = \frac{1}{T_0}$$

შესაბამისად, ორ მეზობელ მაღალი წნევის არეს შორის მანძილი ტოლი იქნება:

$$\lambda_0 = vT_0,$$

რომელშიც v ბგერის სიჩქარეა.

ახლა დაფიქსირება, რომ ბგერის წყარო დამკვირვებელ 1-კენ v_1 სიჩქარით მოძრაობს (სურ. 2.58 ბ).



სურ. 2. 58 ბ

ამ მიმართულებით II ტალღის გამოსხივების მომენტისათვის, წყარო $v_1 T_0$ მანძილით გადაადგილდება და მაღალი წნევის ორ უახლოეს არეს შორის მანძილი ტოლი იქნება:

$$\lambda_1 = \lambda_0 - v_1 T_0.$$

შედეგად, II ტალღა დამკვირვებელ 1-მდე T_0 -ზე ნაკლებ დროში მივა:

$$T_1 = \frac{\lambda_1}{v} = T_0 \left(1 - \frac{v_1}{v}\right), \quad (1)$$

მოძრაობის საპირისპირო მიმართულებით კი მაღალი წნევის ორ უახლოეს არეს შორის მანძილი იქნება:

$$\lambda_2 = \lambda_0 + v_1 T_0,$$

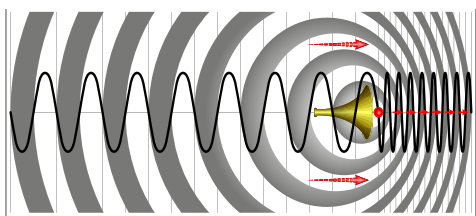
ამიტომ II ტალღა დამკვირვებელ 2-მდე T_0 -ზე მეტ დროში მივა:

$$T_2 = \frac{\lambda_2}{v} = T_0 \left(1 + \frac{v_1}{v}\right). \quad (2)$$

(1) და (2) ფორმულებიდან გამომდინარეობს, რომ დამკვირვებელ 1-ისა და დამკვირვებელ 2-ის მიერ აღქმული ბგერის სიხშირეები განსხვავებულია და განისაზღვრება ფორმულებით:

$$v_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{v_0}{1 - \frac{v_1}{v}}, \quad v_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{v_0}{1 + \frac{v_1}{v}}.$$

ეს ნიშნავს, რომ $v_1 > v_0$, ხოლო $v_2 < v_0$. ამრიგად, დამკვირვებელ 1-ს, რომელსაც ბგერის წყარო უახლოვდება, უფრო მაღალი ტონის ბგერა ესმის, ხოლო დამკვირვებელ 2-ს, რომელსაც ბგერის წყარო შორდება, ესმის უფრო დაბალი ტონის ბგერა (სურ. 2.59). დამკვირვებელთან წყაროს მიახლოებისას ტალღის სიგრძე მცირდება, დაშორებისას კი – იზრდება.



სურ. 2.59

როდესაც ბგერის წყარო ბგერის სიჩქარით მოძრაობს ($v_1 = v$), მაღალი წნევის არეები ერთმანეთს დაემთხვევა და ზედდების შედეგად ჯამური წნევა მკვეთრად იზრდება – წარმოიქმნება დარტყმითი ტალღა. სწორედ ამ მოვლენას აქვს ადგილი, თვითმფრინავის მიერ **ბგერითი ბარი-**



სურ. 2.60

ერის გადალახვისას, როდესაც ის ზებგერითი სიჩქარით იწყებს მოძრაობას (სურ. 2.60).

აკუსტიკური რეზონანსი. გარემოში გავრცელებისას ბგერით ტალღას გადააქვს ენერგია, ამიტომ ამ გარემოში მოთავსებულ ნებისმიერ სხეულზე მოქმედებს პერიოდული ძალა, რომლის სიხშირე ბგერითი ტალღის სიხშირის ტოლია. ამ ძალის მოქმედებით სხეული იძულებით რხევას იწყებს. თუ სხეულის რხევის საკუთარი სიხშირე ბგერითი ტალღის სიხშირეს დაემთხვა, მაშინ სხეულის იძულებითი რხევის ამპლიტუდა დაიწყებს

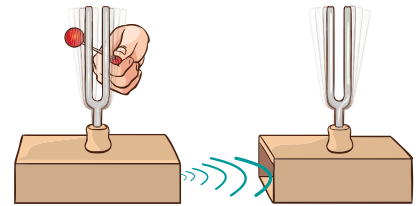
ზრდას და ის თავად გახდება ბგერითი ტალღის გამოსხივების წყარო.

ბგერითი სიგნალის ამპლიტუდის მკვეთრ ზრდას, რომელსაც აღმგზნები ბგერითი ტალღის სიხშირის სისტემის საკუთარი რხევების სიხშირესთან მიახლოება იწვევს, აკუსტიკური რეზონანსი ეწოდება.

აკუსტიკურ რეზონანსს შეგვიძლია დავაკვირდეთ ორი ერთნაირი კამერტონით ჩატარებული ცდით. **კამერტონი** წარმოადგენს U-ს მაგვარ ლითონის დრეკად სხეულს, რომელსაც ბგერითი ტალღის გამოსხივება შეუძლია. ბგერის ინტენსივობის გასაზრდელად კამერტონს ამაგრებენ ერთი მხრიდან ღია ხის ყუთზე, რომელსაც **რეზონატორს** უწოდებენ. თუ ყუთში მყოფი ჰაერის რხევის საკუთარი სიხშირე კამერტონის რხევის სიხშირის ტოლი იქნება, დამყარდება რეზონანსი და კამერტონის ხმა გაძლიერდება.



ჩავატაროთ ცდა. ორი ერთნაირი კამერტონი ერთმანეთის პირისპირ ისე დავდგათ, რომ რეზონატორების ღია ბოლოები ერთმანეთს უყურებდეს (სურ. 2.61). ერთ-ერთ კამერტონს ჩაქუჩი დავარტყათ და შემდეგ თითის დადებით გავაჩუმოთ. ჩვენ გავიგონებთ მეორე კამერტონის ხმას.



სურ. 2.61

დაიწყებს თუ არა მეორე კამერტონი ბგერითი ტალღის გამოსხივებას, თუ კამერტონების რხევის საკუთარი სიხშირეები განსხვავებული იქნება?

აკუსტიკურ რეზონანსს ბევრ მუსიკალურ ინსტრუმენტში იყენებენ. ორღანის მილბუში (სურ. 2.62 ა), არფას კორპუსში (სურ. 2.62 ბ), გიტარაში (სურ. 2.62 გ) და ა.შ., ჰაერი რეზონირებს ბგერების ტონებთან და ობერტონებთან, რომელსაც მერხევი სხეული გამოსცემს და აძლიერებს მათ.



სურ. 2.62 ა



სურ. 2.62 ბ

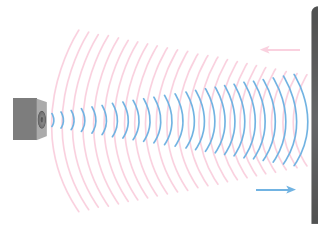


სურ. 2.62 გ

პირის ღრუც იმ ბგერითი ტალღების რეზონატორია, რომლებიც ხმის იოგების რხევის შედეგად წარმოიქმნება.

ექო. რაიმე წინააღმდეგობიდან ბგერითი ტალღების არეკვლა საკმაოდ გავრცელებული მოვლენაა. თქვენთვის კარგად ცნობილი **ექო** გამოწვეულია ბგერითი ტალღების არეკვლით შენობებიდან, მთებიდან, ტყეებიდან და ა.შ. (სურ. 2.63). თუ ჩვენამდე აღწევს ბგერითი ტალღები, რომლებიც რიგი წინააღმდეგობებიდან თანმიმდევრულად აირეკლა, მიიღება მრავალჯერადი ექო.

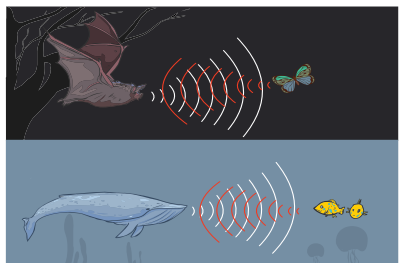
არეკლილი ტალღა დაცემულთან შედარებით ყოველთვის უფრო სუსტია, რადგან დაცემული ტალღის ენერჯის ნაწილი იმ სხეულის მიერ შთაინთქმევა, რომლიდანაც ის აირეკლა. ბგერითი ტალღები კარგად ირეკლება მყარი ზედაპირებიდან და შთაინთქმევა რბილი ზედაპირების მიერ. იმისათვის, რომ ექო კარგად გავიგონოთ, წინააღმდეგობა უნდა იყოს დიდი ზომის და ტალღის წყაროდან გარკვეულზე მეტი მანძილით დაშორებული. ამის მიზეზი ისაა, რომ ადამიანის ყურს ბგერების ცალ-ცალკე აღქმა მხოლოდ მაშინ შეუძლია, თუ მათი მოსვლის მომენტებს შორის დროის შუალედი არანაკლებ $1/15$ წამია.



სურ. 2.63



სურ. 2.64



სურ. 2.65

სწორე არეკვლის გამოა, რომ შენობაში ბგერა უცებ არ ქრება მას შემდეგაც კი, როდესაც წყარო ბგერის გამოცემას შეწყვეტს. შედეგად ადგილი აქვს ბგერის შემდგომი სმენადობის მოვლენას, რომელსაც **რევერბერაცია** ეწოდება. ცარიელ ოთახში რევერბერაცია ხანგრძლივია, რადგან ტალღის მიღევამდე, ბგერა მრავალჯერ აირეკლება. სავსე ოთახში კი ტალღა უცებ შთაინთქმევა.

ულტრაბგერების არეკვლაზე მრავალი ხელსაწყო მუშაობის პრინციპია დაფუძნებული. თუ სიგნალის გამოსხივებისას რაღაც გარკვეული დროის შემდეგ, წყალქვეშა ობიექტიდან არეკვლილ ტალღას დავაფიქსირებთ, დროის ამ შუალედით შეგვიძლია, ამ ობიექტამდე მანძილის დადგენა (სურ. 2.64). ამ მეთოდს **ექოლოკაცია** ეწოდება, ხოლო ხელსაწყო – **ექოლოგი** ან **სონარი**.

ექოლოკაციით „ხედავს“ და ნადირობს ბევრი ცოცხალი არსება, მაგალითად, ლამურები და დელფინები (სურ. 2.65).

სამედიცინო დიაგნოსტიკაში ფართოდ გამოიყენება ულტრაბგერითი ექოსკოპია, რომელიც საშუალებას გვაძლევს „ჩავიხედოთ“ ადამიანის ან ცხოველის სხვადასხვა ორგანოში.



<http://tiny.cc/en87vz>

დასკვნები:

- დამკვირვებლის მიერ აღქმული ტალღის სიხშირისა და სიგრძის ცვლილების მოვლენას, როდესაც დამკვირვებელი და ტალღის წყარო ერთმანეთის მიმართ მოძრაობენ, დოპლერის ეფექტი ეწოდება;
- ბგერითი სიგნალის ამპლიტუდის მკვეთრ ზრდას, რომელსაც აღმგზნები ბგერითი ტალღის სიხშირის სისტემის საკუთარი რხევების სიხშირესთან მიახლოება იწვევს, აკუსტიკური რეზონანსი ეწოდება;
- რაიმე წინააღმდეგობიდან არეკვლილ ბგერით ტალღას, რომელსაც დამკვირვებელი აღიქვამს, ექო ეწოდება.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა შემთხვევაში ესმის დამკვირვებელს უფრო მაღალი ტონის ბგერა?
2. რა მომენტში წარმოქმნის თვითმფრინავი ბგერით დარტყმით ტალღას?
3. რას წარმოადგენს კამერტონი?
4. რა შემთხვევაში შეგვიძლია გავიგონოთ ექო?
5. რა მოვლენას უწოდებენ რევერბერაციას?
6. რაში მდგომარეობს ექოლოკაციის პრინციპი?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

როგორც ცნობილია, ღამურა ფრენისას იყენებს ექოლოკაციას. იმისათვის, რომ მან დაბრკოლებიდან არეკლილი და დაბრუნებული ბგერების გარჩევა შეძლოს, ბგერებს შორის შუალედი $0,001$ წმ-ზე ნაკლები არ უნდა იყოს. რა მინიმალურ მანძილზე შეუძლია ღამურას დაბრკოლებასთან მიახლოება, რომ შეძლოს უსაფრთხოდ ფრენა? ღამურას ფრენის სიჩქარე, ჰაერში ბგერის გავრცელების სიჩქარესთან (340 მ/წმ) შედარებით უმნიშვნელოდ მიიჩნეეთ.

ამოხსნა: მინიმალური მანძილის გასაგებად მოცემული დროის შუალედი ორ ტოლ ნაწილად გავყოთ. $t_1 = 0,0005$ წმ დაბრკოლებამდე ბგერის მისვლას სჭირდება, ამდენივე კი – უკან დაბრუნებას. მანძილი, რომელსაც ბგერა ამ დროში გაივლის ტოლი იქნება: $S = v \cdot t_1$, $S = 0,17$ მ = 17 სმ.

პასუხი: მინიმალური მანძილი, რომელზეც ღამურას დაბრკოლებამდე მიახლოება შეუძლია 17 სმ-ია.




ამოხსენით ამოცანები:

- რატომ არ გვესმის ექო ტრიალ მინდორში?
- რა მინიმალური მანძილით უნდა ვიყოთ დაშორებული სპორტდარბაზის ყველაზე შორს მყოფ კედელს, რომ ჩვენივე ტაშის დაკვრის ექო გავიგონოთ? ბგერის გავრცელების სიჩქარე ჰაერში 330 მ/წმ-ის ტოლად მიიჩნეეთ.
- არც ისე დიდი ზომის ქვევრში ჩაძახებისას ექოს გავიგონებთ. როგორ ახსნით ამ მოვლენას?
- ექოლოტიტ განსაზღვრული ზღვის სიღრმე 2250 მ-ია. რა დროში დაბრუნდება ექოლოტიტდან ზღვის ფსკერისაკენ გაგზავნილი ულტრაბგერითი სიგნალი, თუ მისი გავრცელების სიჩქარე წყალში 1500 მ/წმ-ია?
- რა სიჩქარით ეშვება წყალქვეშა ნავი სიღრმეში, თუ ექოლოტიტდან ფსკერისკენ 5 წამიანი შუალედით გაგზავნილი ბგერები ფსკერიდან არეკვლის შემდეგ ნავზე $4,8$ წმ-ის ინტერვალით მიიღეს? ბგერის გავრცელების სიჩქარე წყალში 1500 მ/წმ-ია.
- ტბაზე მოტივტივე ერთი ნავიდან ექოლოტიტ გაგზავნილი ბგერა მეორე ნავზე ორჯერ მიიღეს: ერთი პირდაპირ, ტბის ზედაპირის გასწვრივ გავრცელებული, ხოლო მეორე ფსკერიდან არეკლილი, პირველისაგან $0,7$ წმ-ის დაგვიანებით. განსაზღვრეთ ტბის სიღრმე, თუ ნავებს შორის მანძილი 750 მ-ია. ბგერის გავრცელების სიჩქარე წყალში 1500 მ/წმ-ის ტოლად მიიჩნეეთ.
- ავტომობილი, რომელიც 380 ჰც სიხშირის ბგერებს გამოსცემს, უძრავ დამკვირვებელს მუდმივი 17 მ/წმ სიჩქარით უახლოვდება. რა სიხშირის ბგერებს გაიგონებს დამკვირვებელი, თუ ბგერის გავრცელების სიჩქარე ჰაერში მიახლოებით 340 მ/წმ-ია?
- ტბის პირას მყოფ მეთევზეს კატერი შორდება მუდმივი $16,5$ მ/წმ სიჩქარით. რა სიხშირის ბგერებს გამოსცემს კატერის ძრავი, თუ მეთევზე მას 2 კჰც სიხშირის ბგერად აღიქვამს? ბგერის გავრცელების სიჩქარე ჰაერში 330 მ/წმ-ის ტოლად მიიჩნეეთ.
- კამერტონის რხევის სიხშირე 550 ჰც-ია. რას უდრის კამერტონიდან ჰაერში გავრცელებული ბგერითი ტალღის სიგრძე, თუ ბგერის გავრცელების სიჩქარე ჰაერში 330 მ/წმ-ია?
- კუთხით გასროლილი ჭურვის ჰორიზონტალურ ზედაპირზე დაცემის ხმა გასროლის ადგილზე მყოფმა დამკვირვებელმა გასროლიდან 10 წმ-ის შემდეგ გაიგონა. იპოვეთ მაქსიმალური სიმაღლე, რომელსაც ჭურვი მიაღწია, თუ მისი ფრენის სიშორე 660 მ-ია. ბგერის გავრცელების სიჩქარე ჰაერში 330 მ/წმ-ის ტოლად მიიჩნეეთ.

§ 2.12 რხევითი კონტური

რხევითი პროცესები სამყაროში ფართოდ არის გავრცელებული. თქვენ უკვე შეისწავლეთ მექანიკური რხევები, რომლებშიც პერიოდულად იცვლებოდა მერხევი სხეულის კოორდინატი, სიჩქარე, აჩქარება, კინეტიკური და პოტენციალური ენერგია, მასზე მოქმედი ძალა. ისევე, როგორც მექანიკურ რხევით სისტემებში, ელექტრულ წრედებში დენის ძალის, ძაბვისა და სხვა ელექტრომაგნიტური სიდიდეების რხევები გარკვეულ პირობებში აღიძვრება. რა პირობებში წარმოიქმნება ეს რხევები? რაში შეიძლება გამოვიყენოთ ელექტრომაგნიტური სიდიდეების პერიოდული ცვლილება? რა ანალოგიები არსებობს სხვადასხვა ბუნების რხევებს შორის?

 გავიხსენოთ:

- კონდესატორის მუხტის მის შემონაფენებს შორის ძაბვასთან შეფარდებას კონდესანსატორის ელექტროტევადობა ეწოდება. ანუ, $C = \frac{q}{U}$. ელექტროტევადობის ერთეულია 1 ფარადა;

- დამუხტული კონდესატორის ელექტროსტატიკური ველის ენერგია ტოლია:

$$W_c = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2};$$

- დენიანი კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია ტოლია: $W_L = \frac{LI^2}{2}$, რომელშიც L კოჭის ინდუქციურობაა. ინდუქციურობის ერთეულია 1 ჰენრი.

განვიხილოთ ელექტრული წრედი, რომელიც მიმდევრობით შეერთებული C ელექტროტევადობის კონდენსატორისა და L ინდუქციურობის კოჭასაგან შედგება (სურ. 2.66 ა).

მიმდევრობით შეერთებული კონდესატორისა და კოჭასაგან შემდგარ წრედს რხევითი კონტური ან LC კონტური ეწოდება.

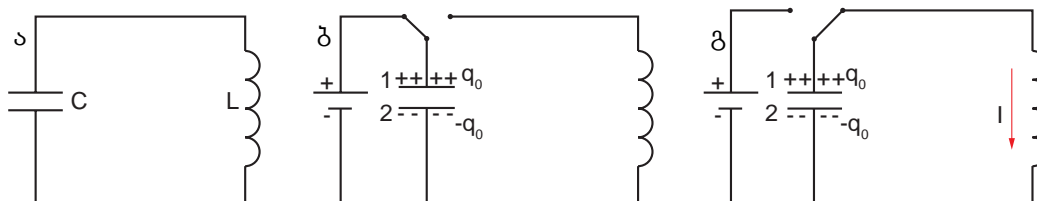
იმ შემთხვევაში, როდესაც წრედის წინააღობა ძალიან მცირეა ($R \rightarrow 0$), კონტურს **იდეალურს** უწოდებენ.

რხევითი კონტური ჩამრთველით დენის წყაროს მივუერთოთ (სურ. 2.66 ბ). კონდესატორი დაიმუხტება და მის შემონაფენებზე გაჩნდება მუხტი – შემონაფენ 1-ზე $+q_0$ მუხტი, ხოლო შემონაფენ 2-ზე $-q_0$ მუხტი. ამ დროს შემონაფენებს შორის წარმოიქმნილი ძაბვა U_0 -ით აღვნიშნოთ.

დამუხტული კონდესატორის ელექტროსტატიკური ველის ენერგია ტოლი იქნება:

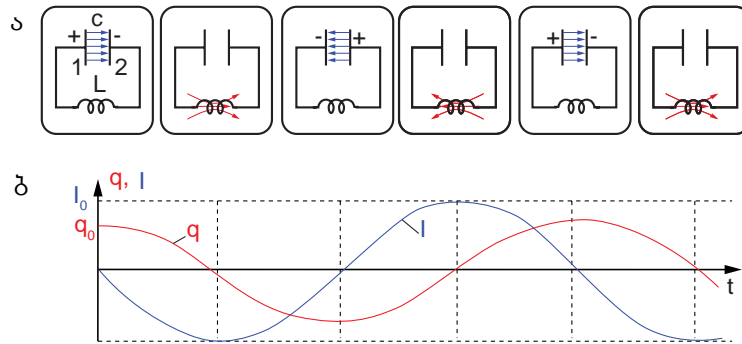
$$W_c = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{CU_0^2}{2}.$$

ჩამრთველი კოჭასაკენ გადავრთოთ (სურ. 2.66 გ). შემონაფენებს შორის არსებული ელექტრული ველის მოქმედებით, თავისუფალი ელექტრონები შემონაფენ 2-დან შემონაფენ 1-კენ ამოძრავდებიან და კონდესატორი განმუხტვას დაიწყებს. დენის მიმართულება ამ მომენტისათვის სურ. 2.66 გ-ზე წითელი ისრითაა ნაჩვენები.



სურ. 2. 66

დენის ძალა გარკვეული დროის განმავლობაში იზრდება (სურ. 2.67 ა). ცხადია, კოჭაში დენის ძალის ზრდა მასში თვითინდუქციის ემძ-ის წარმოქმნას გამოიწვევს. ლენცის წესის თანახმად, თვითინდუქციის ემძ, მისი წარმოქმნის მიზეზს, ანუ დენის ძალის მოდულის ზრდას ეწინააღმდეგება. შედეგად, კონტურში დენის ძალის მოდული დროის გარკვეული შუალედის განმავლობაში ნულიდან მაქსიმალურ I_0 მნიშვნელობამდე მდორედ იზრდება. ეს მნიშვნელობა კონდესატორის მუხტით, ელექტროტევადობით და კოჭას ინდუქციურობით განისაზღვრება (სურ. 67 ბ).



სურ. 2. 67

კონდესატორის განმუხტვისას მისი ელექტრული ველის ენერგია დენიანი კოჭას მაგნიტური ველის ენერგიად გარდაიქმნება. ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, იდეალური რხევითი კონტურის ენერგია დროის განმავლობაში არ უნდა იცვლებოდეს. შესაბამისად, მაგნიტური ველის ენერგია გაიზრდება იმდენით, რამდენითაც შემცირდება ელექტრული ენერგია, ანუ:

$$\frac{q_0^2}{2C} = \frac{q^2(t)}{2C} + \frac{LI^2(t)}{2},$$

რომელშიც $q(t)$ და $I(t)$ მუხტისა და დენის ძალის მნიშვნელობებია განმუხტვის დანეყებიდან რაღაც t დროის შემდეგ.

კონდესატორის მთლიანად განმუხტვის მომენტში დენის ძალის მოდული თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას მიაღწევს. შესაბამისად, კონდესატორის თავდაპირველი ელექტრული ენერგია მთლიანად დენიანი კოჭას მაგნიტურ ენერგიად გარდაიქმნება:

$$W_L = \frac{LI_0^2}{2}.$$

კონდესატორის განმუხტვის შემდეგ კოჭაში დენის ძალის მოდული კლებას იწყებს, რასაც მოყვება ინდუქციის ემძ-ის აღძვრა, რომელიც კოჭაში იმავე მიმართულების დენს წარმოქმნის. ეს დენი ეწინააღმდეგება არსებული დენის კლებას. შედეგად, როდესაც კოჭაში დენის ძალა ნულის ტოლი გახდება, კონდესატორზე მუხტი თავის მაქსიმალურ q_0 მნიშვნელობას მიაღწევს, მაგრამ, შემონაფენი, რომელსაც დადებითი მუხტი ჰქონდა, უარყოფითად დაიმუხტება, რომელსაც უარყოფითი მუხტი ჰქონდა – დადებითად. ამის შემდეგ პროცესი გამეორდება, ოღონდ დენს საწინააღმდეგო მიმართულება ექნება.

ამრიგად, იდეალურ რხევით კონტურში მუხტი, დენის ძალა და ძაბვა პერიოდულად ცვლილება, ანუ კონტურში აღიძვრა **თავისუფალი ელექტრომაგნიტური რხევები**.

რხევით კონტურში თავისუფალი ელექტრომაგნიტური რხევების არსებობა განპირობებულია კონდენსატორის გადამუხტვით, რომლის მიზეზი კოჭაში თვითინდუქციის ემძ-ის წარმოქმნაა. აღსანიშნავია, რომ კონდესატორის მუხტი და კოჭაში დენის

ძალა თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობებს დროის სხვადასხვა მომენტში აღწევს (სურ. 2.67 ბ).

დროის უმცირეს შუალედს, რომლის განმავლობაში რხევით კონტურში რხევის მახასიათებელი ყველა სიდიდე სანწყის მდგომარეობას უბრუნდება, კონტურში მიმდინარე თავისუფალი (საკუთარი) ელექტრომაგნიტური რხევების პერიოდი ეწოდება.

კონდენსატორის მუხტი და დენის ძალა კოჭაში, თავის მაქსიმუმებს $T/4$ დროის ნანაცვლებით აღწევენ.

გავატაროთ ანალოგია რხევით კონტურში მიმდინარე თავისუფალ ელექტრომაგნიტურ რხევებსა და ზამბარიანი ქანქარას თავისუფალ რხევებს შორის. ორივე შემთხვევისათვის დავწეროთ ენერჯის მუდმივობის კანონი:

$$W = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{LI_0^2}{2} = \frac{q^2(t)}{2C} + \frac{LI^2(t)}{2} = \text{const};$$

$$W_{\text{მექ}} = \frac{kA^2}{2} = \frac{mv_{0x}^2}{2} = \frac{kx^2(t)}{2} + \frac{mv_x^2(t)}{2} = \text{const},$$

რომელშიც k ზამბარის სიხისტეა, m – ტვირთის მასა, x – ნანაცვლება, A და v_0 – ნანაცვლებისა და სიჩქარის ამპლიტუდური მნიშვნელობები v_x – სიჩქარის გეგმილი Ox დერძზე.

თუ ამ ტოლობებს გავაანალიზებთ, ადვილად დავასკვნით, რომ კონდენსატორის ელექტრული ველის $W_e = \frac{q^2(t)}{2C}$ ენერჯია დეფორმირებული ზამბარის $W_{\text{პოტ}} = \frac{kx^2(t)}{2}$ პოტენციური ენერჯის ანალოგია. ასევე, კოჭას მაგნიტური ველის $W_L = \frac{LI^2(t)}{2}$ ენერჯია ანალოგია ტვირთის $W_{\text{კინ}} = \frac{mv_x^2(t)}{2}$ კინეტიკური ენერჯისა.

შესაბამისად, ზამბარიანი ქანქარის $x(t)$ კოორდინატის ანალოგი რხევით კონტურში კონდენსატორის $q(t)$ მუხტია, ხოლო ტვირთის $v_x(t)$ სიჩქარის გეგმილის ანალოგი – დენის ძალა კონტურში. ზამბარის სიხისტის ანალოგი კონდენსატორის ტევადობის შებრუნებული სიდიდე იქნება: $k \rightarrow \frac{1}{C}$, ტვირთის მასისა კი – კოჭას ინდუქციურობა: $m \rightarrow L$.

თუ ამ ანალოგიას მივყევით და ზამბარიანი ქანქარის პერიოდის ფორმულაში შემაჯალ სიდიდეებს ანალოგიური სიდიდეებით შევცვლით, მივიღებთ:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \rightarrow T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

რხევითი კონტურის პერიოდის ამ ფორმულას **ტომსონის ფორმულა** ეწოდება.

ელექტრომაგნიტურ რხევებზე დასაკვირვებლად ელექტრონულ ოსცილოგრაფს იყენებენ (სურ. 2.68).

კონდენსატორის მუხტის დროზე დამოკიდებულებას იგივე სახე აქვს, როგორც ჰარმონიულად მერხევი სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულებას:

$$q(t) = q_0 \cos(\omega t + \varphi_0),$$

რომელშიც $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ციკლური სიხშირეა, φ_0 – სანწყისი ფაზა.

მუხტის მსგავსად, ჰარმონიული კანონით იცვლება დენის ძალა კონტურში (ოღონდ სხვა სანწყისი ფაზით) და ძაბვა კონდენსატორის შემონაფენებზე.



სურ. 2.68

რხევით კონტურს, რომელშიც ენერგიების მიმოცვლა მხოლოდ კონდენსატორსა და კოჭას შორის მიმდინარეობს, ჩაკეტილი რხევითი კონტური ეწოდება.

დასკვნები:

- მიმდევრობით შეერთებული კონდენსატორისა და კოჭასაგან შემდგარ წრედს რხევითი კონტური ან LC კონტური ეწოდება;
- რხევით კონტურში მუხტის, დენის ძალისა და ძაბვის პერიოდული ცვლილება თავისუფალი ელექტრომაგნიტური რხევებია;
- დროის უმცირეს შუალედს, რომლის განმავლობაში რხევით კონტურში რხევის მახასიათებელი ყველა სიდიდე სანყის მდგომარეობას უბრუნდება, კონტურში მიმდინარე თავისუფალი (საკუთარი) ელექტრომაგნიტური რხევების პერიოდი ეწოდება;
- რხევით კონტურში მიმდინარე თავისუფალი ელექტრომაგნიტური რხევების პერიოდი გამოითვლება ფორმულით: $T = 2\pi \sqrt{LC}$.

საკონტროლო კითხვები:

1. როგორ რხევით კონტურს უწოდებენ იდეალურს?
2. რა მომენტში აღწევს რხევითი კონტურის კოჭაში დენის ძალა მაქსიმალურ მნიშვნელობას?
3. როგორ ახსნით რხევითი კონტურის პერიოდის ზრდას კონდენსატორის ელექტროტევადობის ზრდისას? კოჭას ინდუქციურობის ზრდისას?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

იდეალური რხევითი კონტური შედგება 20 მკფ ტევადობის კონდენსატორისა და მასთან მიმდევრობით შეერთებული 8 მჰნ ინდუქციურობის კოჭასაგან. რხევით კონტურში კონდენსატორის შემონაფენებს შორის ძაბვა დროის განმავლობაში იცვლება შემდეგი კანონით: $U(t) = 110 \cos 2000\pi t$. დაწერეთ კონდენსატორის მუხტის დროზე დამოკიდებულების ფორმულა. იპოვეთ კოჭას მაქსიმალური მაგნიტური ველის ენერგია და კოჭაში დენის ძალა იმ მომენტში, როდესაც კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგია 4-ჯერ მეტია კოჭას მაგნიტური ველის ენერგიაზე. ფორმულაში შემავალი ყველა სიდიდე გაზომილია SI ერთეულებში.

ამოხსნა: კონდენსატორზე დაგროვილი მუხტის საპოვნელად გამოვიყენოთ $q = C \cdot U$ ფორმულა. მოცემულ გამოსახულებაში ძაბვის დროზე დამოკიდებულების ფორმულის ჩასმით მივიღებთ კონდენსატორის მუხტის დროზე დამოკიდებულების გამოსახულებას: $q = 2,2 \cdot 10^{-3} \cos 2000\pi t$. კონტურის სრული ენერგია კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგიის მაქსიმალური მნიშვნელობის, ან კოჭას მაგნიტური ველის ენერგიის მაქსიმალური მნიშვნელობის ტოლია: $W_{\text{ელ}} = \frac{CU_0^2}{2}$; $W_{\text{მაგ}} = \frac{LI_0^2}{2}$; $W_{\text{სრ}} = 121 \text{ მჯ}$.

დენის ძალის მყისი მნიშვნელობის გამოსათვლელად კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია სრული ენერგიის მეხუთედ ნაწილს გაუტოლოთ: $\frac{LI^2}{2} = \frac{W_{\text{მაგ}}}{5}$; $I = \sqrt{\frac{2W_{\text{მაგ}}}{5L}} \approx 2,5 \text{ ა}$.

პასუხი: $q = 2,2 \cdot 10^{-3} \cos 2000\pi t$; $W_{\text{სრ}} = 121 \text{ მჯ}$; $I \approx 2,5 \text{ ა}$.



ამოხსენით ამოცანები:

1. როგორ შეიცვლება რხევითი კონტურის თავისუფალი ელექტრომაგნიტური რხევების პერიოდი, თუ კონდენსატორის ფირფიტებს შორის მანძილს შევამცირებთ? პასუხი დაასაბუთეთ.

2. რხევითი კონტური შედგება მიმდევრობით შეერთებული ბრტყელი ჰაერიანი კონდენსატორისა და ინდუქციურობის კოჭასგან. რამდენჯერ შეიცვლება რხევითი კონტურის თავისუფალი ელექტრომაგნიტური რხევების სიხშირე, თუ კონდენსატორის ფირფიტებს შორის სივრცეს შევავსებთ დიელექტრიკით, რომლის დიელექტრიკული შეღწევადობა 4-ის ტოლია?

3. გამოთვალეთ რხევითი კონტურის თავისუფალი ელექტრომაგნიტური რხევების სიხშირე, თუ მისი კონდენსატორის ტევადობა 8 მკფ-ია, კოჭას ინდუქციურობა კი – 20 მჰნ.

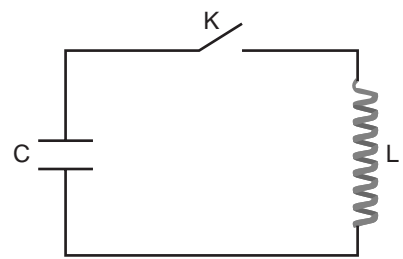
4. რხევითი კონტური, რომლის თავისუფალი ელექტრომაგნიტური რხევების პერიოდია T, შედგება C ტევადობის კონდენსატორისა და L ინდუქციურობის კოჭასგან. რისი ტოლი გახდება თავისუფალი რხევების პერიოდი, თუ კონდენსატორს პარალელურად 3C ტევადობის მეორე კონდენსატორს მივუერთებთ?

5. რხევითი კონტური შედგება C ტევადობის კონდენსატორისა და L ინდუქციურობის კოჭასგან. როგორ შეიცვლება რხევითი კონტურის თავისუფალი რხევების სიხშირე, თუ კონდენსატორთან მიმდევრობით C ტევადობის სამ კონდენსატორს მივაერთებთ?

6. რხევითი კონტურის თავისუფალი ელექტრომაგნიტური რხევების პერიოდი $\pi \cdot 10^{-5}$ წმ-ია. გამოთვალეთ მისი კონდენსატორის ტევადობა, თუ კოჭას ინდუქციურობა 2,5 მჰნ-ია.

7. იდეალურ რხევით კონტურში 100 ვ ძაბვამდე დამუხტული 30 მკფ ტევადობის კონდენსატორი მიერთებულია 50 მჰნ ინდუქციურობის კოჭასთან. თავისუფალი ელექტრომაგნიტური რხევებისას კონტურში იპოვეთ კოჭაში დენის ძალის მაქსიმალური მნიშვნელობა.

8. 50 ვ ძაბვამდე დამუხტული 10 მკფ ტევადობის კონდენსატორი მიერთებულია 20 მჰნ ინდუქციურობის კოჭასთან ისე, როგორც სურ. 2.69- ზეა ნაჩვენები. სანყის მომენტში K ჩამრთველი გამორთულია. იპოვეთ კოჭაში გამავალი დენის ძალა K-ს ჩართვის შემდეგ იმ მომენტში, როდესაც კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგია კოჭას მაგნიტური ველის ენერგიას გაუტოლდება. მიმყვანი სადენებისა და კოჭას წინააღობა უგულებელყავით.



სურ. 2. 69


9. რხევით კონტურში კონდენსატორზე მუხტი

დროის განმავლობაში იცვლება შემდეგი კანონით: $q = q_{\text{მაქს}} \cos \frac{2\pi}{T} t$. რხევების დაწყებიდან პერიოდის რა ნაწილის გავლის შემდეგ იქნება პირველად კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია 3-ჯერ მეტი კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგიაზე?

10. რხევით კონტურში კონდენსატორზე მუხტი დროის განმავლობაში იცვლება შემდეგი კანონით: $q = q_{\text{მაქს}} \cos \frac{2\pi}{T} t$. რხევების დაწყებიდან პერიოდის რა ნაწილის გავლის შემდეგ იქნება პირველად კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგიის ტოლი?

§ 2.13 იძულებითი ელექტრომაგნიტური რხევები. ცვლადი დენი, ცვლადი დენის გენერატორი

რხევითი კონტურის წრედის წინააღმდეგობის გამო, მასში აღძრული ელექტრომაგნიტური რხევები სწრაფად მიიღევა. გაიხსენეთ: მიუღევადი იძულებითი მექანიკური რხევების მისაღებად, სისტემაზე პერიოდულად ცვლადი ძალით ვმოქმედებდით. ანალოგიურად, თუ ცვლადი ემ ძალის მქონე წყაროს რხევით კონტურს მივუერთებთ, მასში შეიძლება აღიძრას იძულებითი ელექტრომაგნიტური რხევები, რომლებიც დროის განმავლობაში არ მიიღევა. ისმის კითხვა: როგორ მივიღოთ ცვლადი ემ ძალა? რა გამოყენება შეიძლება ჰქონდეს იძულებით ელექტრომაგნიტურ რხევებს?

 გავიხსენოთ: S ფართობის მქონე ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის ნაკადი (მაგნიტური ნაკადი) ეწოდება სიდიდეს, რომელიც ტოლია მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდულის, S ფართობისა და \vec{B} და \vec{n} ვექტორებს შორის არსებული α კუთხის კოსინუსის ნამრავლის $-\Phi = BS\cos\alpha$. ამასთან, ჩაკეტილ კონტურში ინდუქციის ემძ მაშინ აღიძვრება, როდესაც კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი იცვლება. ინდუქციის ემ ძალა ტოლია კონტურით შემოსაზღვრული ზედაპირის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სიჩქარისა საწინააღმდეგო ნიშნით:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

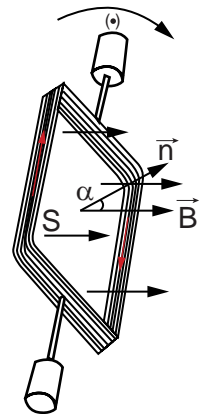
სწორედ ეს პრინციპი უდევს საფუძვლად ცვლადი ემ ძალის წყაროს შექმნას, რომლის ელექტრულ წრედში მიმდინარე იძულებით ელექტრომაგნიტურ რხევებს **ცვლადი ელექტრული დენი** ეწოდება.

დენს, რომლის ძალა და მიმართულება პერიოდულად იცვლება, ცვლადი დენი ეწოდება.

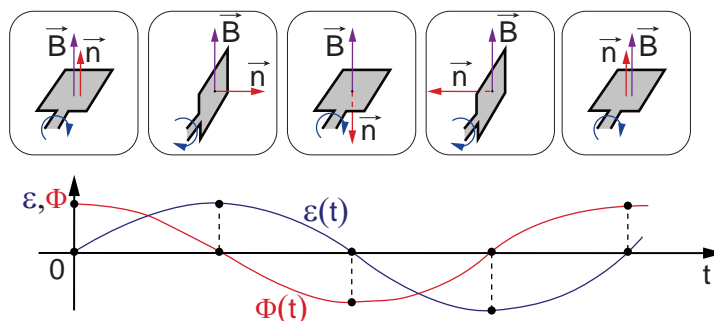
ელექტროტექნიკურ დანადგარს, რომელშიც მექანიკური ენერგია ცვლადი ელექტრული დენის ენერგიად გარდაიქმნება, **ცვლადი დენის გენერატორი** ეწოდება.

ვთქვათ, S ფართობის მქონე გამტარი ჩარჩო, \vec{B} ინდუქციის ველში ω კუთხური სიჩქარით ბრუნავს. ჩარჩოს ბრუნვის ღერძი მაგნიტური ინდუქციის წირების მართობულია (სურ. 2.70).

ჩარჩოს თანაბარი ბრუნვისას, კუთხე მაგნიტური ინდუქციის ვექტორსა და ჩარჩოს ნორმალს შორის წრფივად იცვლება: $\alpha = \omega t$. შედეგად, ჩარჩოში სინუსოიდური კანონით ცვლადი ინდუქციის ემძ აღიძვრება (სურ. 2.71):



სურ. 2.70



სურ. 2.71

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t,$$

რომელშიც $\mathcal{E}_0 = BS\omega$ ემძის ამპლიტუდური მნიშვნელობაა.

თუ ჩარჩოს სადენების გამომყვანებს ელექტრული ენერჯის მომხმარებელს მივუერთებთ (მაგალითად, ჩარჩოს r წინალობასთან შედარებით საკმაოდ დიდ R წინალობას), მასში ცვლადი ელექტრული დენი გაივლის. ცვლადი დენის მყისიერი მნიშვნელობის საპოვნელად გამოვიყენოთ ომის კანონი სრული წრედისათვის. მივიღებთ:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{BS\omega}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t,$$

რომელშიც $I_0 = \frac{BS\omega}{R}$ დენის ძალის მაქსიმალური მნიშვნელობაა.

ემ ძალისა და დენის ძალის ფორმულებიდან ჩანს, რომ წრედში, რომელიც ჩარჩოს გარდა მხოლოდ აქტიურ* წინალობას შეიცავს, ძაბვისა და დენის ძალის რხევები ერთნაირ ფაზაში მიმდინარეობს, ანუ ერთდროულად აღწევენ მაქსიმუმებს და მინიმუმებს.

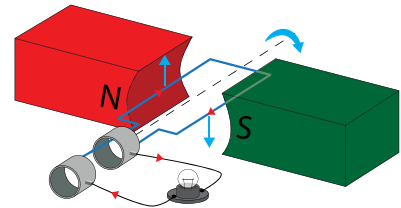
თუ წრედი კონდესატორს და (ან) კოჭას შეიცავს, მასში დენის ძალისა და კონდესატორის შემონაფენებსა ან კოჭას ბოლოებზე ძაბვის რხევა ერთნაირი სიხშირით, მაგრამ სხვადასხვა ფაზით მიმდინარეობს:

$$U = U_0 \sin(\omega t + \Delta\varphi),$$

რომელშიც U_0 კონდესატორზე ან კოჭაზე ძაბვის ამპლიტუდური მნიშვნელობაა, ხოლო $\Delta\varphi$ ძაბვისა და დენის ძალის რხევებს შორის ფაზათა სხვაობაა.

უნდა აღინიშნოს, რომ ჩარჩოს ნახევარბრუნის განმავლობაში წრედში დენი ერთი მიმართულებით გადის, შემდეგი ნახევარბრუნის განმავლობაში კი – საპირისპირო მიმართულებით.

ცვლადი დენის გენერატორის აგებულება ისეთივეა, როგორც მუდმივი დენის გენერატორისა, რომელიც §1.19-ში იყო აღწერილი. განსხვავება მხოლოდ კოლექტორშია – მუდმივი დენის გენერატორში კოლექტორი ნახევარრგოლებს წარმოადგენს, რის გამოც აღძრული დენის მიმართულება არ იცვლება, ცვლადი დენის გენერატორში კი ისინი მთლიანი რგოლებია (სურ. 2.72), ამიტომ, დენის მიმართულება იცვლება.



სურ.2.72

მსოფლიოში გამოიყენებული ელექტროენერჯის ძირითადი ნაწილი სწორედ ცვლადი დენის გენერატორებზე მოდის. მძლავრი გენერატორები 15-20 კვ ძაბვას გამოიმუშავენ და მათი მქ კოეფიციენტი დაახლოებით 98%-ია.

რა იცვლება ელექტრულ წრედში, რომელშიც მუდმივი დენის წყაროს ნაცვლად, ცვლადი დენის წყაროა ჩართული? როგორი სახის კანონზომიერებებია ასეთ წრედში?

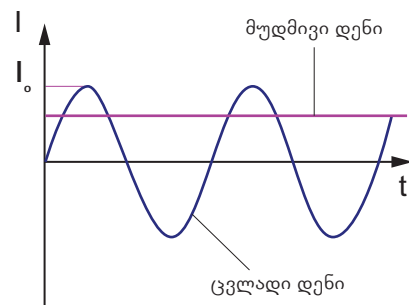
ვთქვათ, ცვლადი დენის წყარო დროის მიხედვით ჰარმონიულად ცვლად ძაბვას იძლევა:

$$U(t) = U_0 \sin \omega t.$$

ომის კანონის თანახმად, ასეთ ძაბვის წყაროსთან მიერთებულ R წინალობის რეზისტორში დენის ძალაც ჰარმონიულად შეიცვლება:

$$I(t) = \frac{U(t)}{R} = \frac{U_0}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t.$$

ამ დენის ძალის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი სურ. 2.73-ზეა გამოსახული.



სურ. 2.73

* აქტიურ წინალობას უწოდებენ ცვლადი დენის წრედში ჩართულ წინალობას, რომელიც ელექტრულ ენერჯიას სხვა სახის ენერჯიად გარდაქმნის.

ძაბვისა და დენის ძალის ფორმულებით შეგვიძლია ვიპოვოთ მათი მყისიერი მნიშვნელობები დროის მოცემულ მომენტში და, შესაბამისად, გამოვთვალოთ ცვლადი დენის მყისიერი სიმძლავრე, რომელიც მუდმივი დენის სიმძლავრისაგან განსხვავებით, დროის განმავლობაში იცვლება:

$$P(t) = U(t)I(t) = I^2(t)R = I_0^2 R \sin^2(\omega t).$$

მყისიერ სიმძლავრეს ხანგრძლივად მიმდინარე პროცესების მახასიათებლად ვერ გამოვიყენებთ, ამიტომ ასეთი პროცესების მახასიათებლად საჭიროა ავიღოთ ცვლადი დენის სიმძლავრის საშუალო მნიშვნელობა დროის დიდი შუალედისათვის, რომელიც რხევის პერიოდს ბევრად აღემატება. სიმძლავრის ეს მნიშვნელობა შეიძლება გამოვთვალოთ შემდეგი ფორმულით:

$$\bar{P} = \frac{U_0 I_0}{2} = \frac{I_0^2 R}{2}.$$

ამ ფორმულიდან ჩანს, რომ სიდიდე $\frac{I_0^2}{2}$ არის დენის ძალის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობა პერიოდის განმავლობაში:

$$\overline{I^2(t)} = \frac{I_0^2}{2}.$$

სიდიდეს, რომელიც ტოლია დენის ძალის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობიდან კვადრატული ფესვის, ცვლადი დენის ძალის ეფექტური (მოქმედი) მნიშვნელობა ეწოდება. განმარტების თანახმად:

$$I_{\text{ეფ}} = \sqrt{\overline{I^2(t)}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}.$$

აღსანიშნავია, რომ ეს ფორმულა მართებულია მხოლოდ ჰარმონიულად ცვლადი სიდიდეებისათვის პერიოდის ჯერადი დროის განმავლობაში.

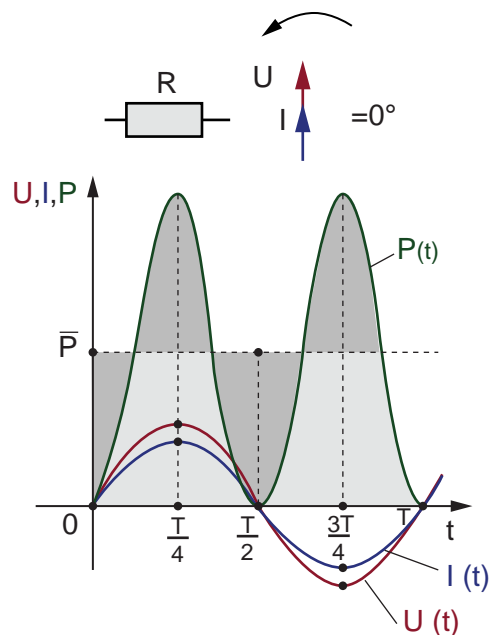
ცვლადი დენის ძალის ეფექტური (მოქმედი) მნიშვნელობა იმ მუდმივი დენის ძალის ტოლია, რომელიც გამტარში ისეთივე სითბოს რაოდენობას გამოყოფს, რამდენსაც ცვლადი დენი იმავე დროის განმავლობაში.

ცვლადი დენის ძაბვის ეფექტური მნიშვნელობაც ანალოგიურად განისაზღვრება:

$$U_{\text{ეფ}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}.$$

ცვლადი დენის, ძაბვის და სიმძლავრის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკები სურ. 2. 74-ზეა მოცემული.

ელექტრული რხევების მიმდინარეობისას, ნაკლებად საინტერესოა დენის ძალის, ძაბვის და სხვა სიდიდეების მყისიერი მნიშვნელობები. მნიშვნელოვანია რხევების ისეთი ზოგადი მახასიათებლების ცოდნა, როგორიცაა: ამპლიტუდა, პერიოდი, დენის ძალისა და ძაბვის ეფექ-



სურ. 2. 74

ტური მნიშვნელობები. სწორედ დენის ძალისა და ძაბვის ეფექტურ მნიშვნელობებს ზომავს წრედში ცვლადი დენის ამპერმეტრი და ვოლტმეტრი. საშუალო სიმძლავრე კი მათი ნამრავლით გამოითვლება.

საქართველოში ელექტრულ ქსელებში ცვლადი დენის ძაბვის ეფექტური მნიშვნელობაა $U_{\text{ეფ}} = 220$ ვ, ხოლო სიხშირე – 50 ჰც.

დენის ძალისა და ძაბვის სინუსოიდური კანონით ცვლილება საშუალებას გვაძლევს ყველაზე მარტივად და ეკონომიურად გადავცეთ, გავანაწილოთ და მოვიხმაროთ ელექტრული ენერგია.

დასკვნები:

- დენს, რომლის ძალა და მიმართულება პერიოდულად იცვლება, ცვლადი დენი ეწოდება;
- ელექტროტექნიკურ დანადგარს, რომელშიც მექანიკური ენერგია ცვლადი ელექტრული დენის ენერგიად გარდაიქმნება, ცვლადი დენის გენერატორი ეწოდება;
- სიდიდეს, რომელიც ტოლია დენის ძალის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობიდან კვადრატული ფესვის, ცვლადი დენის ძალის ეფექტური (მოქმედი) მნიშვნელობა ეწოდება: $I_{\text{ეფ}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$;
- ცვლადი დენის ძაბვის ეფექტური მნიშვნელობა ტოლია: $U_{\text{ეფ}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა გზით შეიძლება რხევით კონტურში იძულებითი, არამილევადი ელექტრომაგნიტური რხევების მიღება?
2. რა ფორმულით გამოითვლება ცვლადი დენის ემ ძალის მაქსიმალური მნიშვნელობა?
3. რომელ ძაბვას ზომავს ვოლტმეტრი ცვლადი დენის წრედში?
4. რამდენჯერ აღემატება ცვლადი დენის (ძაბვის) ამპლიტუდური მნიშვნელობა ეფექტურ მნიშვნელობას?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

ქსელში ძაბვა იცვლება შემდეგი კანონით: $U=310\sin\omega t$. რა სითბოს რაოდენობა გამოიყოფა სახურებლის სპირალში 2 წთ-ის განმავლობაში, თუ მისი წინალობა 50 ომია.

ამოხსნა: სახურებელში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობის დასადგენად მასში გავალი დენის ძალის ეფექტური მნიშვნელობა ვიპოვოთ. $I_0 = \frac{U_0}{R}$; $I_{\text{ეფ}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$; $Q=I_{\text{ეფ}}^2 R t$; $Q=115,32$ კჯ.

პასუხი: სახურებელში $115,32$ კჯ სითბოს რაოდენობა გამოიყოფა.



ამოხსენით ამოცანები:

1. გამოთვალეთ $0,5$ ტლ ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში 1200 ბრ/წთ სიხშირით მბრუნავ ჩარჩოში აღძრული ემ ძალის ამპლიტუდა, თუ ჩარჩოს ფართობი 200 სმ²-ია.
2. ცვლადი ძაბვის წრედში მისი მნიშვნელობა დროის განმავლობაში იცვლება $U=150\sin 100\pi t$ ფორმულის მიხედვით. იპოვეთ ძაბვის მაქსიმალური მნიშვნელობა და მისი რხევის სიხშირე.
3. 20 ომი წინალობის რეზისტორზე მოდებული ცვლადი ძაბვა დროის განმავლობაში იცვლება $U=100\sin 120\pi t$ ფორმულის მიხედვით. იპოვეთ რეზისტორში დენის ძალის მაქსიმალური მნიშვნელობა.
4. 50 ომი წინალობის რეზისტორზე მოდებული ცვლადი ძაბვა დროის განმავლობაში იცვლება $U=200\sin 50\pi t$ ფორმულის მიხედვით. დაწერეთ რეზისტორში დენის ძალის მყისიერი მნიშვნელობის დროზე დამოკიდებულების ფორმულა.
5. ცვლადი დენის წრედში ჩართული ვოლტმეტრის ჩვენება 220 ვ-ია. მიზანშეწონილია, თუ არა ამ ქსელში ისეთი კონდენსატორის ჩართვა, რომლის გარღვევის ძაბვა 250 ვ-ია? პასუხი დაასაბუთეთ.
6. ცვლადი დენის წრედში ჩართულ 10 ომი წინალობის რეზისტორთან მიერთებული ამპერმეტრმა 10 ა დენის ძალა აჩვენა. გამოთვალეთ რეზისტორის ბოლოებზე მოდებული ძაბვის მაქსიმალური მნიშვნელობა.
7. ცვლადი ძაბვის წრედში ჩართულ $R=3$ ომი წინალობის რეზისტორთან პარალელურად მიერთებულმა ვოლტმეტრმა $4,2$ ვ ძაბვა აჩვენა. დაადგინეთ რეზისტორში დენის ძალის მაქსიმალური მნიშვნელობა.
8. 60 ომი წინალობის ნათურაზე მოდებული ცვლადი ძაბვა დროის განმავლობაში იცვლება $U=120\sin 100\pi t$ ფორმულის მიხედვით. განსაზღვრეთ ნათურაში გამოყოფილი მაქსიმალური სიმძლავრე.
9. ცვლადი დენის ძალა დროის განმავლობაში იცვლება $I=I_0\sin \omega t$ ფორმულის მიხედვით. რხევების დაწყებიდან პერიოდის რა ნაწილის გავლის შემდეგ გახდება პირველად დენის ძალის მყისიერი მნიშვნელობა ეფექტური მნიშვნელობის ტოლი?
10. ძაბვა ქსელში დროის განმავლობაში იცვლება $U=210\sin \omega t$ ფორმულის მიხედვით. რა სითბოს რაოდენობა გამოიყოფა სახურებლის სპირალში $0,5$ წთ-ის განმავლობაში, თუ მისი წინალობა 35 ომია.

§ 2.14 ცვლადი დენის გარდაქმნა. ტრანსფორმატორი

ყოფა-ცხოვრებასა და წარმოებაში ცვლადი დენის გამოყენების დროს გასათვალისწინებელია თითოეული მომხმარებლის მოთხოვნილება, რისთვისაც საჭიროა ცვლადი დენის პარამეტრების შეცვლა. ამისათვის შექმნილია სპეციალური ხელსაწყოები, რომლებიც, ელექტრულ წრედში ძაბვის გაზრდის ან შემცირების საშუალებას იძლევა, პრაქტიკულად ენერგეტიკული დანაკარგების გარეშე. როგორ არის მოწყობილი და რა პრინციპით მუშაობს ასეთი ხელსაწყოები?

ცვლადი დენის გენერატორები გარკვეული ძაბვის ცვლად დენს გამოიმუშავენ. სხვადასხვა მომხმარებელი კი ელექტრული ენერჯის პრაქტიკული გამოყენებისათვის განსხვავებული ძაბვის ცვლად დენს მოიხმარს. ე.ი. საჭიროა ცვლადი დენის გარდაქმნა. სწორედ ამისათვის გამოიყენება მოწყობილობა, რომელსაც **ტრანსფორმატორი** ეწოდება (ლათ. *transformo* – გარდაქმნი).

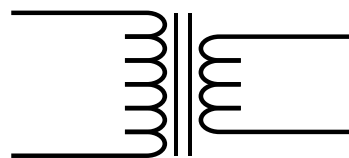
პირველი ტრანსფორმატორი 1831 წელს მაიკლ ფარადეიმ შექმნა. ის წარმოადგენდა რკინის რგოლზე დახვეულ ორ იზოლირებული კოჭას. ამ ხელსაწყოს ფარადეი თავის ექსპერიმენტებში იყენებდა.

ტრანსფორმატორი ელექტრომაგნიტური მოწყობილობაა (სურ. 2.75), რომელიც ერთი ძაბვის ცვლად დენს, იმავე სიხშირის შენარჩუნებით, სხვა ძაბვის ცვლად დენში გარდაქმნის.

ტრანსფორმატორს, რომელიც ძაბვას ზრდის, **ამამალლებელი ტრანსფორმატორი** ეწოდება, რომელიც ამცირებს – **დამადაბლებელი ტრანსფორმატორი**. ელექტრულ სქემებში ტრანსფორმატორის აღნიშვნა ნაჩვენებია სურ. 2.76-ზე.



სურ. 2.75



სურ. 2.76

ყველაზე მარტივი ტრანსფორმატორი ფოლადის ფირფიტებისაგან აწყობილ შეკრულ გულარზე დახვეული ორი გრაგნილისაგან შედგება. ტრანსფორმატორის გრაგნილს, რომელიც ცვლადი დენის წყაროსთანაა მიერთებული, **პირველადი** გრაგნილი ეწოდება, ხოლო გრაგნილს, რომლიდანაც გარდაქმნილი ძაბვა მიიღება – **მეორეული**.

ტრანსფორმატორის მოქმედების პრინციპი ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენაზეა დაფუძნებული. დენი ქმნის მაგნიტურ ველს, რომელიც ფოლადის გულარის მეშვეობით მეორეული გრაგნილის ხვებსაც განმსჭვალავს. მაგნიტური ნაკადი პრაქტიკულად მხოლოდ გულარის შიგნითაა კონცენტრირებული და ამიტომ მის ყველა კვეთაში ერთნაირია. ეს კი საშუალებას გვაძლევს მაგნიტური ნაკადის მყისიერი მნიშვნელობა გულარის ყველა კვეთაში ერთნაირად მივიჩნიოთ.

ვთქვათ, ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილი ცვლადი ემ ძალის დენის წყაროსთანაა მიერთებული და მასზე U_1 ძაბვაა მოდებული. რადგან გულარის ყველა კვეთაში მაგნიტური ნაკადი ერთნაირია, ამიტომ ფარადეის კანონის თანახმად, პირველადი და მეორეული გრაგნილის თითოეულ ხვიაში ერთნაირი ინდუქციის ემძ აღიძვრება. თუ ერთ ხვიაში აღძრულ ემძ-ს e -თი აღვნიშნავთ, შეგვიძლია დავწეროთ:

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილში ხვეების რაოდენობა N_1 -ით აღვნიშნოთ, მეორეულში კი N_2 -ით. მაშინ პირველად და მეორეულ გრაგნილებში აღძრული ემ ძალები, შესაბამისად, ტოლი იქნება: $\mathcal{E}_1 = N_1 e$ და $\mathcal{E}_2 = N_2 e$. მათი შეფარდებით კი მივიღებთ:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1 e}{N_2 e} = \frac{N_1}{N_2}.$$

გრაგნილების ელექტრული წინააღობის სიმცირის გამო, დაბვა მათ ბოლოებზე ემ ძალების ტოლია. შესაბამისად: $U_1 \approx \mathcal{E}_1$, $U_2 \approx \mathcal{E}_2$, ამიტომ:

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1.$$

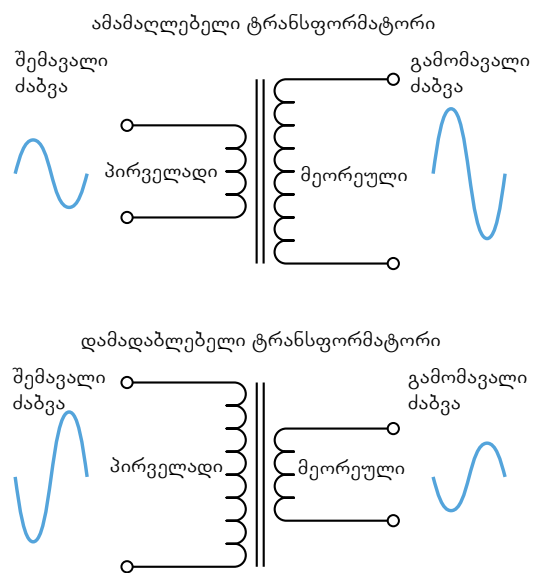
ამრიგად, მეორეულ გრაგნილზე დაბვის U_2 მნიშვნელობა, პირველად გრაგნილზე დაბვის U_1 მნიშვნელობის პროპორციულია.

როგორც ფორმულიდან ჩანს, ხვიათა რიცხვების თანაფარდობის მიხედვით U_2 დაბვა შეიძლება იყოს U_1 დაბვაზე მეტი (ამაღლებელი ტრანსფორმატორი), ან მასზე ნაკლები (დამადაბლებელი ტრანსფორმატორი).

ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ხვეების რაოდენობის შეფარდებას მეორეული გრაგნილის ხვეების რაოდენობასთან, **ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი** ეწოდება და მას K ასოთი აღვნიშნავენ:

$$K = \frac{N_1}{N_2}$$

თუ $K > 1$, მაშინ $U_2 < U_1$ – ტრანსფორმატორი დამადაბლებელია. როდესაც $K < 1$, მაშინ $U_2 > U_1$ – ტრანსფორმატორი ამაღლებელია (სურ. 2.77).



სურ. 2.77

თუ მეორეული გრაგნილის ბოლოებს ელექტროენერჯიის რაიმე მომხმარებელს მივუერთებთ, მაშინ მასში ცვლადი ელექტრული დენი გაივლის. ეს დენი გრაგნილში საკუთარ ცვლად მაგნიტურ ნაკადს შექმნის, რომელიც გულარში მაგნიტური ნაკადის ცვლილებას შეამცირებს.

ჯამური მაგნიტური ნაკადის რხევის ამპლიტუდის შემცირებამ თითქოს პირველად გრაგნილში ინდუქციის ემძ-ის შემცირება უნდა გამოიწვიოს, მაგრამ, რადგან $U_1 \approx \mathcal{E}_1$, ემძ არ შემცირდება. შედეგად, მეორეული გრაგნილის დატვირთვისას პირველად გრაგნილში დენის ძალა ავტომატურად გაიზრდება და მისი ამპლიტუდა ისე მოიმატებს, რომ ჯამური მაგნიტური ნაკადის რხევის ამპლიტუდა სანყის მნიშვნელობას დაუბრუნდეს.


ტრანსფორმატორის მეორეულ გრაგნილზე მიერთებულ წრედზე ენერჯიის გაცემას თან სდევს პირველადი გრაგნილის წრედიდან იმავე ენერჯიის მოხმარება. ტრანსფორმატორის დატვირთვისას პირველადი წრედის სიმძლავრე დაახლოებით მეორეული წრედის სიმძლავრის ტოლია:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2,$$

ანუ

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$$

ეს ტოლობა ნიშნავს, რომ ტრანსფორმატორი რამდენჯერაც ზრდის ძაბვას, იმდენჯერ ამცირებს დენის ძალას (და პირიქით).

 რატომ არის დამადაბლებელ ტრანსფორმატორში მეორეული გრაგნილის ხვევები უფრო დიდი განიკვეთის?

თანამედროვე ტრანსფორმატორები უნიკალური მონოკობილობებია, რადგან ძალიან მაღალი მქკ (99%-მდე) აქვს, ანუ პრაქტიკულად დანაკარგების გარეშე მუშაობენ.



<http://tiny.cc/mn87vz>

დასკვნები:

- ტრანსფორმატორი ელექტრომაგნიტური მონოკობილობაა, რომელიც ერთი ძაბვის ცვლად დენს, იმავე სიხშირის შენარჩუნებით, სხვა ძაბვის ცვლად დენში გარდაქმნის;
- ტრანსფორმატორს, რომელიც ძაბვას ზრდის, ამამალლებელი ტრანსფორმატორი ეწოდება, რომელიც ამცირებს – დამადაბლებელი ტრანსფორმატორი;
- ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ხვევების რაოდენობის შეფარდებას მეორეული გრაგნილის ხვევების რაოდენობასთან, ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი ეწოდება;
- ტრანსფორმატორით რამდენჯერაც ზრდის ძაბვას იმდენჯერ ამცირებს დენის

ძალას (და პირიქით): $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$.

საკონტროლო კითხვები:

1. რომელ გრაგნილს უწოდებენ პირველადს? მეორეულს?
2. რატომ აღიძვრება პირველადი და მეორეული გრაგნილის თითოეულ ხვიაში ერთნაირი ინდუქციის ემძ?
3. რა ტიპისაა ტრანსფორმატორი, თუ $K > 1$?



ერთად ამოხსნათ ამოცანა

დამადაბლებელი ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილზე მოდებულია 3000 ვ ძაბვა. რისი ტოლია ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი, თუ მეორეული გრაგნილის ბოლოებზე ძაბვა 220 ვ-ია. მეორეული გრაგნილის წინალობაა 5 ომი, მასში გამავალი დენი კი – 6ა. პირველადი გრაგნილის წინალობას ნუ გაითვალისწინებთ.

ამოხსნა: რადგან პირველადი გრაგნილის წინალობა უმნიშვნელოა $\mathcal{E}_1 = U_1$; მეორეული გრაგნილში აღძრული ემძ ვიპოვოთ შემდეგი ფორმულით: $\mathcal{E}_2 = U_2 + I_2 R_2$. ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი $K = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2}$, $K=12$.

პასუხი: ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი 12-ის ტოლია.



ამოხსენით ამოცანები:

1. ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილზე ხვების რაოდენობაა 100, მეორეულ გრაგნილზე კი – 200. რა ტიპისაა ტრანსფორმატორი?
2. ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილზე ხვების რაოდენობაა 300, მეორეულ გრაგნილზე კი – 60. იპოვეთ ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი.
3. ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილზე მოდებული ძაბვა 3,3 კვ-ია, მეორეული გრაგნილის ბოლოებზე კი 220 ვ. გამოთვალეთ ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი.
4. განსაზღვრეთ ემ ძალის მნიშვნელობა ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილში, თუ მეორეულ გრაგნილში აღძრული ემძ 720 ვ-ია. ხვების რაოდენობა პირველად და მეორეულ გრაგნილებში, შესაბამისად $N_1=50$ და $N_2=300$ -ია.
5. ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილზე მოდებული ძაბვა და დენის ძალა მასში, შესაბამისად 110 ვ და 5 ა-ია. იპოვეთ დენის ძალა მეორეულ გრაგნილში, თუ ძაბვა მის ბოლოებზე 2,2 კვ-ია.
6. ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი 10-ის ტოლია. იპოვეთ დენის სიმძლავრე პირველად გრაგნილში, თუ ძაბვა მის ბოლოებზე 360 ვ-ია, ხოლო დენის ძალა მეორეულ გრაგნილში 20 ა-ის ტოლია.
7. 5 კვტ სიმძლავრის დენის გარდაქმნა ხდება ტრანსფორმატორით, რომლის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი 0,01-ია. იპოვეთ ძაბვა პირველადი გრაგნილის ბოლოებზე, თუ დენის ძალა მეორეულ გრაგნილში 0,5 ა-ია.
8. გადამცემ ხაზზე სიმძლავრის დანაკარგის შესამცირებლად გამოიყენეს $K=0,25$ ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის მქონე ტრანსფორმატორი. რამდენჯერ შემცირდება სიმძლავრის დანაკარგი გადამცემ ხაზზე?
9. გამომუშავებული სიმძლავრის გადაცემისას, გადამცემ ხაზში სიმძლავრის დანაკარგის შესამცირებლად ძაბვა გაზარდეს 5-ჯერ. რამდენი პროცენტით გაიზრდება სასარგებლო სიმძლავრე, თუ თავდაპირველად დანაკარგი სრული სიმძლავრის 50% იყო?
10. დამადაბლებელი ტრანსფორმატორის პირველად გრაგნილზე მოდებული ძაბვა 5100 ვ-ია. რისი ტოლია ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი, თუ მეორადი გრაგნილის ბოლოებზე ძაბვა 250 ვ-ია. მეორადი გრაგნილის წინალობა 10 ომია, მასში გამავალი დენის ძალა კი – 5ა. პირველადი გრაგნილის წინალობას ნუ გაითვალისწინებთ.

§ 2.15 ელექტროენერჯის წარმოება, გადაცემა და განაწილება

თანამედროვე ცხოვრება წარმოუდგენელია ელექტროენერჯის გამოყენების გარეშე. სად და როგორ წარმოებს ელექტროენერჯის გამომუშავება? როგორ მიეწოდება ის მომხმარებელს? რამდენად დიდია ელექტროენერჯის დანაკარგები მისი გადაცემისას და განაწილებისას?

ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენის აღმოჩენამ და ელექტრული დენის გენერატორის გამოგონებამ შესაძლებელი გახადა მექანიკური ენერჯის ელექტრულ ენერჯად გარდაქმნა. ელექტროენერჯია სხვადასხვა ტიპის დიდ და მცირე ელექტროსადგურებში გამომუშავდება. ეს ელექტროსადგურები ერთმანეთისაგან ძირითადად იმ მონყობილობებით განსხვავდებიან, რომლებიც გენერატორის როტორს აბრუნებს. განვიხილოთ ელექტროსადგურების ძირითადი ტიპები და მათი მახასიათებლები.

თბოელექტროსადგურები იყენებენ იმ სითბურ ენერჯას, რომელიც ქვანახშირის, ნავთობის, მახუთის, ბუნებრივი აირის და სხვა საწვავი წიაღისეულის დანვისას გამოიყოფა (სურ. 2.78). დიდ თბოელექტროსადგურებში როტორებს ორთქლის ან აირის ტურბინები აბრუნებს, მცირეში კი შეიძლება გამოყენებულ იქნას შიგანვის ძრავა. ორთქლის ტურბოგენერატორი საკმაოდ სწრაფად ბრუნავს – ის წუთში რამდენიმე ათას ბრუნს ასრულებს. თბოელექტროსადგურების მქვ საშუალოდ 40%-ია.



სურ. 2.78

ატმოსფეროში წვის პროდუქტების (პირველ რიგში ნახშირორჟანგი) გამოტყორცნისა და სითბოს გამოყოფით გამონვეული ბუნებრივი სითბური ბალანსის დარღვევის გამო, თბოელექტროსადგურები ეკოლოგიურად საკმაოდ საზიანოა. მიუხედავად ამისა, მსოფლიოში გამომუშავებული ელექტროენერჯის 60%-ზე მეტი თბოელექტროსადგურებზე მოდის.

ჰიდროელექტროსადგურებში მოძრავი წყლის მექანიკური ენერჯია ელექტრულ ენერჯად გარდაიქმნება (სურ. 2.79). მათში გენერატორის როტორს ჰიდრავლიკური ტურბინა აბრუნებს. მსოფლიოში გამომუშავებული ელექტროენერჯის დაახლოებით 20% სწორედ ჰიდროელექტროსადგურებზე მოდის. მათი მქვ საშუალოდ 90-93%-ია.



სურ. 2.79

მძლავრი ჰიდროელექტროსადგურების მუშაობისათვის, წყლის პოტენციალური ენერჯის გასაზრდელად და მისი მარაგის შესაქმნელად, დიდ წყალსაცავებს აშენებენ. ასეთი წყალსაცავები კლიმატის ცვლილებას, ეკოლოგიური ნონასწორობის დარღვევას და

სასოფლო-სამეურნეო ფართობების შემცირებას იწვევს.

ატომურ ელექტროსადგურებში გამოიყენება ურანის ან პლუტონიუმის ბირთვების გახლეჩის შედეგად გამოყოფილი ენერჯია. ამ ენერჯის ხარჯზე მუშაობს ორთქლის ტურბინა, რომელიც გენერატორის როტორის აბრუნებს (სურ. 2.80). ატომური ელექტროსადგურების წილი მთელ ელექტროენერჯეტიკაში დაახლოებით 17%-ია, მათი მქვ 33-37%-ია.



სურ. 2.80

ეკოლოგიური თვალსაზრისით ატომური ელექტროსადგურები ყველაზე სუფთაა, თუმცა ავარიის შემთხვევაში რადიოაქტიური ნარჩენების გაფანტვა დიდ საშიშროებას წარმოადგენს. ასევე პრობლემურია რადიოაქტიური ნარჩენების დამარხვა.

ენერგომომხმარების ზრდა და ეკოლოგიური პრობლემები მეცნიერებსა და ინჟინრებს აიძულებს, ეძებონ ენერჯის ისეთი ალტერნატიული წყაროები, რომლებიც განახლებადი იქნება, ანუ დროის განმავლობაში თავისთავად აღდგება.

ბოლო ათწლეულებში მოიმატა ქარის, მზის, მიქცევა-მოქცევისა და გეოთერმული ელექტროსადგურების მშენებლობამ. საქართველოში უკვე მუშაობს ქარის ელექტროსადგურები (სურ. 2.81). მიმდინარეობს აქტიური სამუშაოები მზის პანელების მშენებლობისათვის.

ელექტროსადგურებზე გამომუშავებული ელექტროენერჯია მომხმარებელს უნდა მიენოდოს. უმეტეს შემთხვევაში მომხმარებელი ელექტროენერჯის გამომუშავების ადგილიდან დაშორებულია. ამის გამო ელექტროენერჯის დიდ მანძილებზე ტრანსპორტირების საჭიროება იქმნება.

ელექტროგადამცემი ხაზების სადენებში ელექტრული დენის გავლა მათ გათბობას იწვევს, ამიტომ ელექტროენერჯის გადაცემა საგრძნობ ენერგეტიკულ დანაკარგებთან არის დაკავშირებული. ჯოულ-ლენცის კანონის თანახმად, ეს დანაკარგები გამოითვლება ფორმულით:



სურ. 2.81

$$Q = \frac{I_0^2}{2} R t,$$

რომელშიც R გადამცემი სადენების წინააღობაა, I_0 კი – მათში დენის ძალის ამპლიტუდური მნიშვნელობა.

მართალია, ეს დანაკარგები გარდაუვალია, მაგრამ შეიძლება მათი შემცირება. ფორმულიდან ჩანს, რომ ამის მიღწევა წინააღობის და (ან) დენის ძალის შემცირებითაა შესაძლებელი. $R = \rho \frac{l}{S}$ ფორმულის თანახმად, წინააღობის შემცირება მხოლოდ სადენების განივი კვეთის ფართობის გაზრდით შეიძლება, მაგრამ ეს სადენების მასის მნიშვნელოვან ზრდას გამოიწვევდა, რაც ხელსაყრელი არ არის. ვინაიდან დენის ძალის n -ჯერ შემცირებით დანაკარგები n^2 -ჯერ მცირდება, ამიტომ ყველაზე ეფექტიანია ელექტროენერჯის გადაცემა დენის ძალის მინიმალური მნიშვნელობით განხორციელდეს.

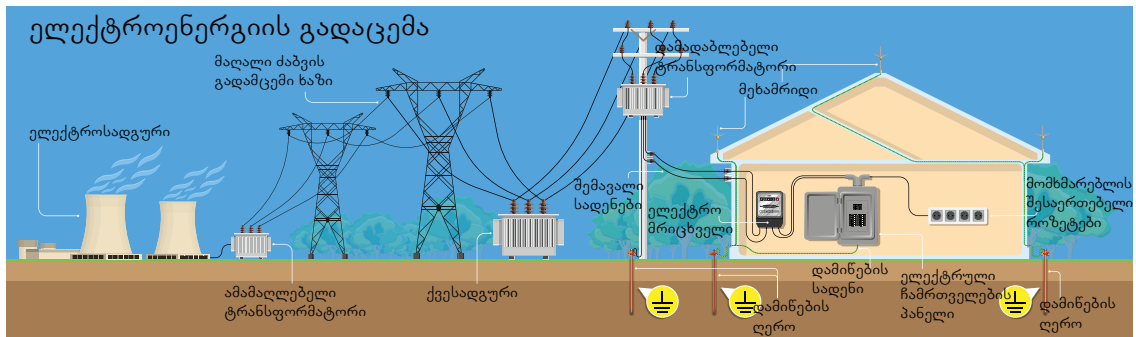
$P = UI$ ფორმულის თანახმად, დენის ძალის შემცირებისას სიმძლავრის მნიშვნელობა უცვლელი რომ დარჩეს, საჭიროა ძაბვა გავზარდოთ. ამით, სადენების გათბობით გამოწვეული დანაკარგები შემცირდება, მაგრამ მაღალი ძაბვა და მცირე დენის ძალა საყოფაცხოვრებო ხელსაწყოების მუშაობისას მიუღებელია. უსაფრთხოებიდან გამომდინარე და ხელსაწყო კონსტრუქციის სიმარტივისთვის, მათში ძაბვა მცირე უნდა იყოს. ამრიგად, ელექტრული ენერჯის დიდ მანძილებზე გადაცემისთვის საჭიროა გამოვიყენოთ მაღალი ძაბვა, ხოლო ყოფა-ცხოვრებაში მისი მოხმარებისას – მცირე ძაბვა.

სადენებით გადასაცემი ელექტროენერჯის სიმძლავრის შენარჩუნებისათვის, ძაბვის მნიშვნელობას იმდენჯერ ზრდიან, რამდენჯერაც ამცირებენ დენის ძალას. ძაბვის ზრდა შეზღუდულია სანდო იზოლაციის შესაძლებლობებით და სადენებზე გვირგვინისებრი განმუხტვის წარმოქმნის გამო. გადამცემ ხაზებზე (სურ. 2.82) მაქსიმალური ძაბვა შეიძლება 1000 კვ-ს აღემატებოდეს, მაშინ, როდესაც ელექტროსადგურებ-



სურ. 2.82

ზე მიღებული დაბვა 16-20 კვ-ს არ აღემატება. სწორედ ამიტომ, დასაწყისში ამამალლებელ ტრანსფორმატორს იყენებენ.



სურ. 2.83

განვიხილოთ ელექტროენერჯის გადაცემის სქემა: ცვლადი დენის გენერატორი (10 – 20 კვ) ⇒ ამამალლებელი ტრანსფორმატორი (ქსელის მიხედვით 110 კვ, 330 კვ, 500 კვ, 750 კვ, 1150 კვ-მდე) ⇒ მაღალი დაბვის ელექტროგადამცემი ხაზი ⇒ დაბვის კასკადური შემცირება (35 კვ-მდე, 5 კვ-მდე) ⇒ დამაბაბლებელი ტრანსფორმატორი (220 ვ-მდე, 380 ვ-მდე, 660 ვ-მდე) ⇒ მომხმარებელი (სურ.2.83).



<http://tiny.cc/kn87vz>

დასკვნები:

- ცვლადი დენი ძირითადად გამოიყენება თბოელექტროსადგურებში, ჰიდროელექტროსადგურებსა და ატომურ ელექტროსადგურებში;
- ენერჯის განახლებადი წყაროებია: წყლის, ქარის, მზის, გეოთერმული, მიქცევა-მოქცევის ენერჯია;
- დიდ მანძილზე ელექტროენერჯის გადაცემისას დანაკარგების შესამცირებლად დაბვას ამალლებენ.

საკონტროლო კითხვები:

1. რატომ ამცირებენ დენის ძალას გადამცემ ხაზში?
2. რით არის შეზღუდული გადამცემ ხაზზე დაბვის ამალლება?
3. როგორი ტრანსფორმატორები დგას ელექტროსადგურებთან?
4. როგორი ტრანსფორმატორები დგას ელექტრული ენერჯის მომხმარებლებთან?

II თავის შემაჯამებელი ამოცანები

1. ერთმა სხეულმა 1 წთ-ში 120 რხევა შეასრულა. რამდენ რხევას შეასრულებს მეორე სხეული 4 წთ-ში, თუ მისი რხევის სიხშირე პირველისას 2-ჯერ აღემატება?
2. მერხვეი სხეულის რხევის ამპლიტუდა A -ს ტოლია. რა მანძილს გაივლის სხეული 10 რხევის განმავლობაში?
3. ჩონგურის სიმის ნერტილი რხევისას 5 წმ-ში 3 მ მანძილს გადის. გამოთვალეთ სიმის რხევის სიხშირე, თუ ამ ნერტილის რხევის ამპლიტუდა 1,5 მმ-ია.
4. მერხვეი სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების განტოლებას აქვს შემდეგი სახე: $x=0,05\sin 40\pi t$. გამოთვალეთ რხევისას სხეულის მაქსიმალური სიჩქარე და აჩქარება. ფორმულაში შემავალი ყველა სიდიდე SI ერთეულებშია გაზომილი.
5. მერხვეი სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების განტოლებას აქვს შემდეგი სახე: $x=0,4\sin 5\pi t$. განსაზღვრეთ სხეულის კოორდინატი რხევების დაწყებიდან 1,25 წმ-ის შემდეგ. ფორმულაში შემავალი ყველა სიდიდე SI ერთეულებშია გაზომილი.
6. 50 ნ/მ სიხისტის ზამბარაზე მიმაგრებული 100 გ მასის სხეული ასრულებს ჰარმონიულ რხევებს. გამოთვალეთ სხეულის აჩქარების მოდული იმ მომენტში, როდესაც ის წონასწორობის მდებარეობიდან 4 სმ-ითაა წანაცვლებული.
7. k სიხისტის ზამბარისა და მასზე ჩამოკიდებული m მასის სხეულის თავისუფალი რხევის სიხშირე 2 ჰც-ია. რისი ტოლი იქნება სისტემის რხევის პერიოდი, თუ ზამბარას შუაზე გავჭრით და მასზე $8m$ მასის სხეულს დავკიდებთ?
8. 200 ნ/მ სიხისტის ზამბარაზე მიმაგრებულია 2 კგ მასის სხეული. გამოთვალეთ ამ სისტემის თავისუფალი რხევისას სხეულის მაქსიმალური სიჩქარე და აჩქარება, თუ რხევის ამპლიტუდა 5 სმ-ია.
9. ერთი მათემატიკური ქანქარას რხევის პერიოდი 5 წმ-ია, მეორესი კი – 4 წმ. იპოვეთ იმ მათემატიკური ქანქარას რხევის პერიოდი, რომლის სიგრძე მოცემული მათემატიკური ქანქარების სიგრძეთა სხვაობის ტოლია.
10. რამდენ რხევას შეასრულებს 100 სმ სიგრძის მათემატიკური ქანქარა 2 წთ-ში, თუ მას დედამიწის ზედაპირიდან რადიუსზე 2-ჯერ მეტ სიმაღლეზე ავიტანთ.
11. გამოთვალეთ 1,5 მ სიგრძის მათემატიკური ქანქარას რხევის სრული მექანიკური ენერგია, თუ მასზე დაკიდებული 300 გ მასის მცირე ზომის ბურთულა 4 სმ ამპლიტუდით ირხევა (მცირე კუთხით გადახრის გამო ქორდა ამპლიტუდის ტოლად მიიჩნეოთ).
12. 3,6 მ სიგრძის მათემატიკური ქანქარა წონასწორული მდებარეობიდან 60° -იანი კუთხით გადახარეს და შემდეგ გაათავისუფლეს. იპოვეთ სხეულის სიჩქარე და აჩქარება წონასწორობის მდებარეობის გავლისას.
13. მატარებლის ჭერზე მიმაგრებულია ზამბარა, რომლის სიხისტე 40 ნ/მ-ია. მასზე ჩამოკიდებულია 400 გ მასის სხეული. რელსების გადაბმის ადგილზე გადასვლისას ბორბლის ჩარტყმის გამო ვაგონი ვერტიკალურ რხევებს ასრულებს. რა სიჩქარით უნდა მოძრაობდეს მატარებელი, რომ ქანქარას ვერტიკალური რხევის ამპლიტუდა მაქსიმალური იყოს, თუ რელსის სიგრძე 31,4 მ-ია?
14. ნავმა ტბის ზედაპირზე 16 წამში 10 რხევა შეასრულა. იპოვეთ ერთნაირი ფაზით მერხვე მეზობელ ნერტილებს შორის მანძილი, თუ ტალღის გავრცელების სიჩქარე ტბის ზედაპირზე 0,5 მ/წმ-ია.

15. როდესაც ტალღა ერთი გარემოდან მეორეში გადავიდა, ტალღის გავრცელების სიჩქარე 500 მ/წმ-დან 4500 მ/წმ-დე გაიზარდა. როგორ შეიცვალა ტალღის სიგრძე?

16. 180 მ სიმაღლის შახტში ჩავარდა ქვა. ჩავარდნის მომენტიდან რა დროის შემდეგ გაიგონებს შახტის ნაპირთან მდგომი დამკვირვებელი ფსკერზე ქვის დავარდნის ხმას? ბგერის სიჩქარე ჰაერში 300 მ/წმ-ის ტოლად მიიჩნეთ.

17. თევზსაჭერი გემის საყვირიდან გაშვებულმა ბგერითმა სიგნალმა სანაპიროზე მყოფ დამკვირვებელამდე 20 წმ-ში მიაღწია. რამდენ ხანში მივა გემი ნაპირთან სიგნალის გაშვების შემდეგ, თუ იგი მოძრაობს წრფივად მუდმივი 18 მ/წმ სიჩქარით? ბგერის გავრცელების სიჩქარე ჰაერში 360 მ/წმ-ია.

18. რა სიჩქარით ეშვება ღამურა დედამიწის ზედაპირისკენ, თუ მის მიერ 2 წამიანი შუალედით გაგზავნილი ბგერები ნიადაგიდან არეკვლის შემდეგ ღამურას 1,92 წმ-ის ინტერვალით უბრუნდება? ბგერის გავრცელების სიჩქარე ჰაერში 360 მ-წმ-ია.

19. ავტომობილი, რომლის ძრავაც 1800 ჰც სიხშირის ბგერებს გამოსცემს, უძრავ დამკვირვებელს მუდმივი 34 მ/წმ სიჩქარით უახლოვდება. რა სიხშირის ბგერებს გაიგონებს დამკვირვებელი, თუ ბგერის გავრცელების სიჩქარე ჰაერში 340 მ/წმ-ია?

20. C ტევადობის კონდენსატორისა და L ინდუქციურობის კოჭასგან შედგენილი რხევითი კონტურის თავისუფალი ელექტრომაგნიტური რხევების პერიოდი 1 მკწმ-ის ტოლია, შედგება. რისი ტოლი იქნება თავისუფალი რხევების პერიოდი, თუ კონდენსატორს პარალელურად 8C ტევადობის მეორე კონდენსატორს მიუერთებთ?

21. რხევით კონტურში მიმდინარე ელექტრომაგნიტური რხევების პერიოდი 32 მკწმ-ია. თავისუფალი რხევების დაწყებიდან პირველად რა დროის შემდეგ იქნება კონდენსატორის ელექტრული და კოჭას მაგნიტური ველის ენერგიები ერთმანეთის ტოლი? რხევების დაწყების მომენტში კონდენსატორის მუხტი მაქსიმალურია.

22. რხევით კონტურში კონდენსატორზე მუხტი იცვლება შემდეგი კანონით: $q=q_{max} \cos \omega t$. რხევების დაწყებიდან რა დროის შემდეგ იქნება პირველად კოჭას მაგნიტური ველის ენერგია 3-ჯერ ნაკლები კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგიაზე, თუ რხევის პერიოდი 24 მკწმ-ია.

23. 80 ომი წინააღობის ნათურაზე მოდებული ცვლადი ძაბვა დროის მიხედვით იცვლება შემდეგი კანონით: $U=240 \sin 100 \pi t$. განსაზღვრეთ ნათურაში გამოყოფილი მაქსიმალური სიმძლავრე და დენის ძალის ეფექტური მნიშვნელობა.

24. ძაბვა ქსელში დროის მიხედვით იცვლება შემდეგი კანონით: $U=400 \sin \omega t$. რა დროში აადუღდება 20°C-იან 2 ლ წყალს ამ ქსელში ჩართული ელექტრო ჩაიდან, თუ მისი სპირალის წინააღობა 40 ომია. სითბურ დანაკარგებს ნუ გაითვალისწინებთ.

25. 15 კვტ სიმძლავრის დენის გარდაქმნა ხდება ტრანსფორმატორით, რომლის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი 0,05-ია. იპოვეთ ძაბვა მეორეული გრაგნილის ბოლოებზე, თუ დენის ძალა პირველად გრაგნილში 5 ა-ია.

26. დამადაბლებელი ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი 20-ის ტოლია. განსაზღვრეთ ძაბვა პირველადი გრაგნილის ბოლოებზე, თუ მეორეული გრაგნილის ბოლოებზე ძაბვა 310 ვ-ია. მეორეული გრაგნილის წინააღობაა 5 ომი, მასში გამავალი დენი კი – 8ა. პირველადი გრაგნილის წინააღობას ნუ გაითვალისწინებთ.

27. გამომუშავებული სიმძლავრის გადაცემისას გადამცემ ხაზში სიმძლავრის დანაკარგის შესამცირებლად ძაბვას 5-ჯერ ზრდიან. რამდენჯერ მცირდება დანაკარგი გადამცემ ხაზში?

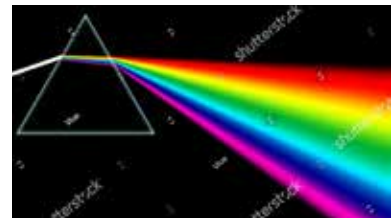
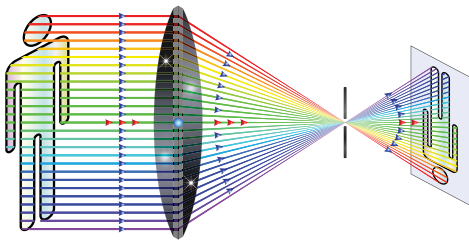
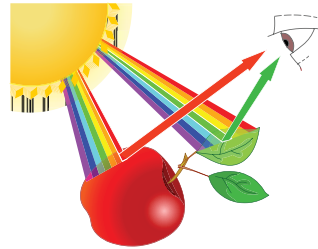
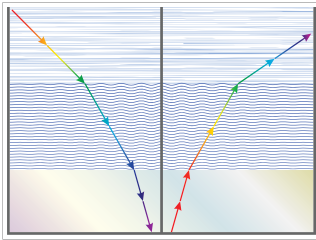
28. გამომუშავებული სიმძლავრის გადაცემისას გადამცემ ხაზში სიმძლავრის დანაკარგის შესამცირებლად ძაბვას 3-ჯერ ზრდიან. რამდენი პროცენტით გაიზრდება სასარგებლო სიმძლავრე, თუ დანაკარგი თავდაპირველად სრული სიმძლავრის 27% იყო?

29. სადაზვერვო პუნქტიდან რა მანძილზე იმყოფება დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრი, თუ თანამგზავრიდან გამოგზავნილი რადიოსიგნალი სადგურზე 0,1 ნმ-ში მიიღეს?

30. მთვარეზე გაგზავნილი რადიოსიგნალი მისი ზედაპირიდან აირეკლა და დედამიწის ზედაპირზე გაგზავნიდან 2,55 ნმ-ის შემდეგ დაბრუნდა. ამ მონაცემით განსაზღვრეთ მანძილი დედამიწიდან მთვარემდე.

თავი III

გეომეტრიული ოპტიკა



ამ თავში თქვენ გაეცნობით:

- სინათლის წრფივ გავრცელებას და ჩრდილების წარმოქმნას;
- სინათლის არეკვლას და ბრტყელ სარკეს;
- სინათლის გარდატეხის მოვლენას და ოპტიკურ ილუზიებს;
- ფერების წარმოქმნას ბუნებაში;
- ლინზებს და მათ გამოყენებას ოპტიკურ ხელსაწყოებში;
- თვალს, ახლომხედველობასა და შორსმხედველობას;
- გრავიტაციის გავლენას სინათლის გავრცელებაზე.

§ 3.1 სინათლის ორგვარი ბუნება. სინათლის სიჩქარე

ყველა თქვენგანი აღრფრთოვანებული ბუნების მრავალფეროვნებით (სურ. 3.1), მთვარიანი ღამის სილამაზით (სურ. 3.2), ფოიერვერკების ფერთა სიმრავლით (სურ. 3.3) და ა.შ.



სურ. 3.1



სურ. 3.2



სურ. 3.3

გარემომცველ სამყაროზე ინფორმაციის უდიდეს ნაწილს – დაახლოებით 90%-ს ადამიანი მხედველობით იღებს. გარდა იმისა, რომ სინათლე ინფორმაციის მატარებელია, ის ინვესს სხვადასხვა მოვლენას: ქიმიურ რეაქციებს (მაგალითად, ფოტოსინთეზი, ფოტოფირზე დაცემისას ქიმიური ცვლილებები), ელექტრული დენის აღძვრას (მაგალითად, მზის ბატარეები) და სხვა. რაც მთავარია, სიცოცხლე სინათლის გარეშე შეუძლებელია. სინათლის მოქმედება განაპირობებს ფოტოსინთეზს, D ვიტამინის წარმოქმნას, ბიოლოგიურ საათს და სხვა.

ბუნებრივია, ადამიანს ოდითგანვე აწუხებდა კითხვა – რა არის სინათლე? მკვლევართა წარმოდგენები სინათლის ბუნების შესახებ საკმაოდ განსხვავებული იყო და დროთა განმავლობაში იცვლებოდა. ძველ ბერძნებს მიაჩნდათ, რომ სინათლე განსაკუთრებული ნივთიერებაა, რომელიც თვალებიდან გამოედინება. მათი აზრით, ადამიანი ხედავდა იმ საგნებს, რომელთა მიმართულებით ამ ნივთიერების ნაკადს უშვებდა. შემდგომში, პითაგორამ გამოთქვა საინინაალმდეგო ვარაუდი: სხეულები გამოტყორცნიან უმცირეს ნაწილაკებს, რომელთა თვალში მოხვედრის შედეგად ადამიანი აღიქვამს გარემომცველ სხეულებს. მრავალი საუკუნის შემდეგ, ეს ჰიპოთეზა, მნიშვნელოვნად შეცვალა ისააკ ნიუტონმა. ნიუტონის მოდელის მიხედვით სინათლე შედგება უმცირესი დრეკადი ნაწილაკებისაგან – კორპუსკულებისაგან. ნიუტონის სინათლის კორპუსკულური თეორია კარგად ხსნიდა იმ დროისათვის ცნობილ ექსპერიმენტულ ფაქტებს. მაგალითად, სინათლის არეკვლა განიხილებოდა როგორც სიბრტყეზე დარტყმისას დრეკადი ბურთულების არეკვლა. ეს მოდელი ასევე ადვილად ხსნიდა გაუმჭირვალე საგნების ჩრდილის წარმოქმნას.

ნიუტონი აგრძელებდა სინათლის ექსპერიმენტულ კვლევებს, მაგრამ ზოგიერთი ცდის შედეგის ახსნა სინათლის კორპუსკულური თეორიით შეუძლებელი იყო. მაგალი-

თად, გაუგებარი იყო, რატომ არ მოქმედებდა ერთმანეთზე სივრცეში გადაკვეთისას სინათლის ნაკადები – სინათლის ნაწილაკები ერთმანეთთან დაჯახებისას უნდა გაფანტულიყვნენ (სურ. 3.4).



სურ. 3.4

სინათლის ბუნებაზე წარმოდგენა რადიკალურად შეცვალეს ნიუტონის თანამედროვე მეცნიერებმა – რობერტ ჰუკმა და ქრისტიან ჰიუგენსმა. ამ უკანასკნელს მიაჩნდა, რომ სინათლე მექანიკური ტალღაა. ის ვრცელდება განსაკუთრებულ, ჰიპოთეტურ დრეკად გარემოში – ეთერში, რომელიც ავსებს მთელ სივრცეს და აღწევს სხეულებში.

ერთი მხრივ, ტალღური თეორიით მარტივად იხსნებოდა, რატომ არ მოქმედებდა ერთმანეთზე სივრცეში გადაკვეთილი სინათლის ნაკადები – ისევე როგორც ტალღები წყლის ზედაპირზე, ისინი თავისუფლად გადიან ერთმანეთში. მეორეს მხრივ, სინათლის წრფივი გავრცელება (რომელსაც შემდეგ პარაგრაფში განვიხილავთ), ძნელია სინათლის ტალღური თეორიით ავხსნათ, მაშინ, როდესაც კორპუსკულური თეორიით ის უბრალოდ ინერციის კანონის შედეგს წარმოადგენს.

ასეთი გაურკვეველი მდგომარეობა გაგრძელდა XIX საუკუნის დასაწყისამდე, ვიდრე სინათლის დიფრაქციის (სინათლის მიერ წინააღმდეგობის შემოვლა) და ინტერფერენციის (სინათლის ნაკადების ზედდებისას სინათლის შესუსტება და გაძლიერება) მოვლენებს აღმოაჩინდნენ. ისინი მხოლოდ ტალღებისთვისაა დამახასიათებელი.

XIX საუკუნის მეორე ნახევარში ჯეიმს კლარკ მაქსველმა დაამტკიცა, რომ სინათლეც ელექტრომაგნიტური ტალღაა. ჰერცის მიერ ელექტრომაგნიტური ტალღების ექსპერიმენტული აღმოჩენის შემდეგ, სინათლის ტალღურმა თეორიამ თითქოს საბოლოოდ გაიმარჯვა, ვინაიდან ამ თეორიით კარგად იხსნებოდა სინათლის გავრცელებასთან დაკავშირებული ყველა მოვლენა.



რობერტ ჰუკი



ქრისტიან ჰიუგენსი



ჯეიმს კლარკ მაქსველი

გავრცელებისას სინათლე ისე იქცევა, როგორც ტალღა.

მიუხედავად ამისა, XX საუკუნის დასაწყისში აღმოაჩინეს მოვლენები, რომლებიც ამტკიცებდნენ, რომ სინათლის გამოსხივება და შთანთქმა ხდება არა უწყვეტად, არა-

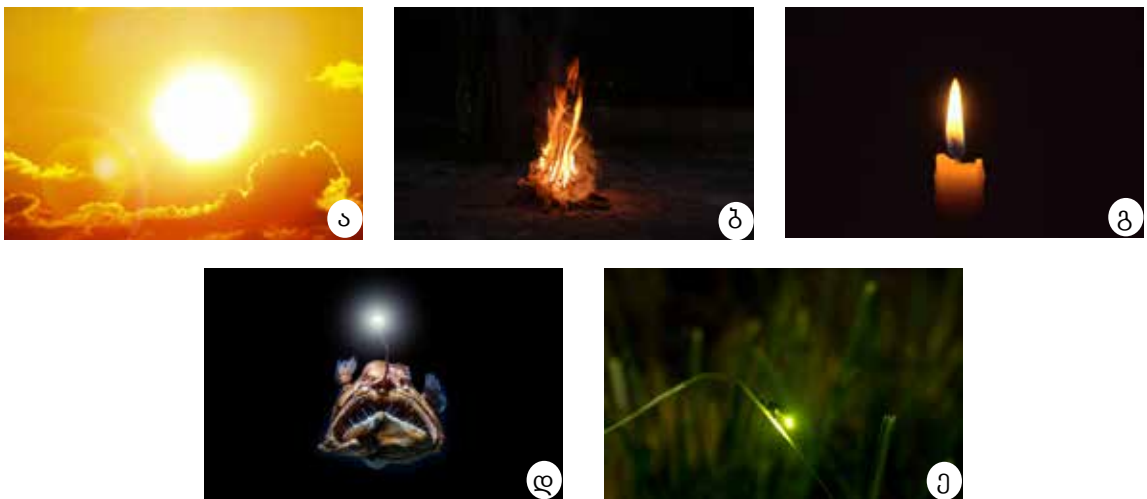
მედ ცალკეული პორციებით. ამის ახსნა კი სინათლის ტალღური თეორიით შეუძლებელი იყო. სინათლის შთანთქმისა და გამოსხივების მოვლენებს, მომდევნო კლასში გაეცნობით.

გამოსხივებისა და შთანთქმის დროს სინათლე ისე იქცევა, როგორც ნაწილაკების ნაკადი.

ამრიგად, შეიქმნა უცნაური სიტუაცია: სინათლის გამოსხივებისა და შთანთქმის მოვლენები აიხსნებოდა სინათლის კორპუსკულური, ხოლო ინტერფერენციისა და დიფრაქციის მოვლენები – ტალღური წარმოდგენებით. სინათლის ბუნებაზე ეს ორი, თითქოს შეუთავსებელი თეორია XX საუკუნის 30-იან წლებში გაერთიანდა ფიზიკის ახალ თეორიაში – კვანტურ ელექტროდინამიკაში. შემდგომში გაირკვა, რომ ორმაგი ბუნება – დუალიზმი არა მარტო სინათლეს, არამედ მატერიის ნებისმიერ სხვა ფორმასაც ახასიათებს.


ფიზიკის ნაწილს, რომელიც სინათლის თვისებებს შეისწავლის, **ოპტიკა** (ძვ. ბერძნული **ὀπτική** – მხედველობითი) ეწოდება.

სხეულს, რომელიც სინათლეს ასხივებს, **სინათლის წყარო** ეწოდება. მათ მიეკუთვნება მზე (სურ. 3.5 ა) და სხვა ვარსკვლავები, კოცონი (სურ. 3.5 ბ), ანთებული სანთელი (სურ. 3.5 გ), ვარვარების ნათურა და სხვა. ესენი სითბური სინათლის წყაროებია. ასევე სინათლის წყაროებია სხვადასხვა მანათობელი ორგანიზმები: თევზები (სურ. 3.5 დ), ციციანთელები (სურ. 3.5 ე), სოკოები და სხვა. მათ სინათლის ცივი წყაროებს უწოდებენ.



სურ. 3.5

XX საუკუნის მეორე ნახევარში, მეცნიერებმა შექმნეს სინათლის განსხვავებული წყარო – ლაზერი. ლაზერული გამოსხივება ხასიათდება სინათლის მიმართული ვიწრო კონით და დიდი ინტენსივობით.

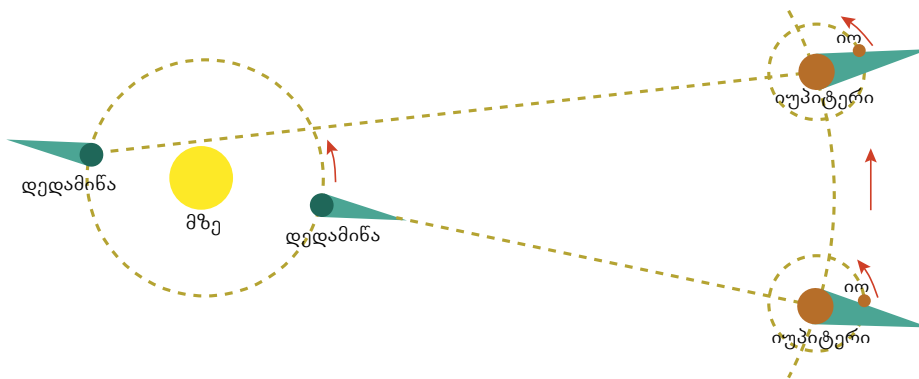
 დაფიქრდით და შეეცადეთ უპასუხოთ კითხვას: ზემოთ ჩამოთვლილთაგან რომელია სინათლის ბუნებრივი წყაროები და რომელი – ხელოვნური?

უნდა აღინიშნოს, რომ ყველა სინათლის წყაროში სინათლის ენერგიად გარდაიქმნება ენერგიის რომელიმე სხვა სახე: სითბური, ელექტრული, ქიმიური და სხვა.

სხეულთა უმეტესობა, რომლებსაც ჩვენ ვხედავთ, სინათლეს არ ასხივებს. ისინი ირეკლავენ მათზე დაცემულ სინათლეს. ასეთი სხეულებია, მაგალითად: მთვარე, ხეები, სახლები და ა.შ.

სინათლის ბუნების შესწავლაში დიდი როლი შეასრულა მისი სიჩქარის დადგენის ცდებმა. მოვიყვანოთ რამდენიმე მათგანი.

რიომერის ცდა. XVII საუკუნის ბოლოს დანიელმა მეცნიერმა ო. რიომერმა გაზომა სინათლის სიჩქარე ასტრონომიული მეთოდით. ის აკვირდებოდა იუპიტერის ერთ-ერთ თანამგზავრს – იოს. რიომერი ხედავდა, რომ იო გადიოდა იუპიტერის წინ, შემდეგ შედიოდა მის ჩრდილში და გარკვეული დროის შემდეგ კვლავ გამოჩნდებოდა (სურ. 3.6).



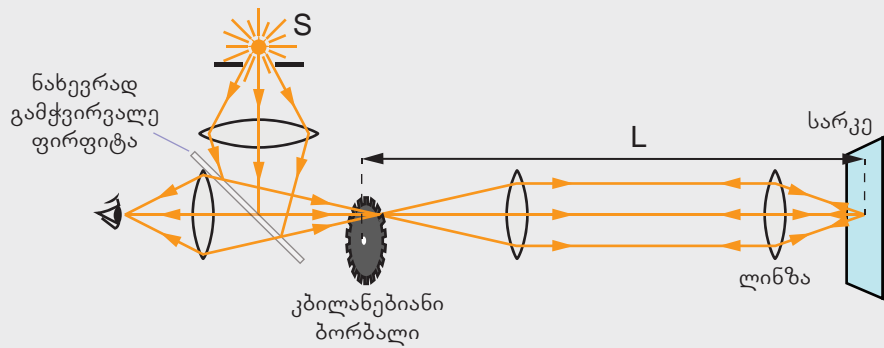
სურ. 3.6

დროის შუალედი იოს ორ მომდევნო გამოჩენას შორის, ანუ იუპიტერის გარშემო იოს ბრუნვის პერიოდი აღმოჩნდა 42 საათი და 28 წუთი. ეს გაზომვები ჩატარდა მაშინ, როდესაც დედამიწა მზის გარშემო მოძრაობისას ყველაზე ახლოს იყო იუპიტერთან. იცოდა რა იოს ბრუნვის პერიოდი, რიომერმა წინასწარ გამოთვალა ჩრდილიდან მისი გამოსვლების მომენტები, ანუ შეადგინა ამ მომენტების კალენდარი. რამდენიმე თვის შემდეგ, როდესაც დედამიწა და იუპიტერი მაქსიმალური მანძილით დაშორდნენ ერთმანეთს, რიომერმა აღმოაჩინა, რომ იომ ჩრდილიდან გამოსვლა წინასწარ გამოთვლილ დროის მომენტთან შედარებით 22 წუთით (1320 წმ) დააგვიანა. რიომერმა ეს იმით ახსნა, რომ სინათლე, რომელსაც სასრული სიჩქარე აქვს, დედამიწასა და იუპიტერს შორის გაზრდილი მანძილის გავლას მეტ დროს ანდომებს. ამ მანძილის მაქსიმალური მნიშვნელობა დედამიწის ორბიტის დიამეტრის – $3 \cdot 10^{11}$ მ-ის ტოლია. ამ დაკვირვებებით რიომერმა გამოთვალა სინათლის სიჩქარე:

$$c = \frac{3 \cdot 10^{11} \text{ მ}}{1320 \text{ წმ}} \approx 2,27 \cdot 10^8 \text{ მ/წმ.}$$

რიომერის მიერ დაგვიანების დროის ნაკლები სიზუსტით განსაზღვრის გამო, მიღებული შედეგი საგრძნობლად განსხვავდება დღეისათვის ცნობილი სინათლის სიჩქარის მნიშვნელობისგან. ამის მიუხედავად, რიომერის დაკვირვებას უდიდესი მნიშვნელობა ჰქონდა – დადგინდა, რომ სინათლე ძალიან დიდი, მაგრამ სასრული სიჩქარით ვრცელდება.

ფიზოს ცდა. 1849 წელს ა. ფიზომ სინათლი სიჩქარის დადგენისათვის შემდეგი ცდა ჩაატარა. S წყაროდან გამოსული სინათლე ფოკუსირდებოდა და ეცემოდა ნახევრად გამჭვირვალე ფირფიტას. მისგან არეკვლილ ვიწრო კონას მიმართავდნენ კბილანებიანი ბორბლის ნაპირისაკენ. კბილანებს შორის გავლის შემდეგ სინათლე ირეკლებოდა რამდენიმე კილომეტრით დაშორებული სარკიდან, კვლავ გადიოდა კბილანებს შორის და ხვდებოდა დამკვირვებლის თვალს (სურ. 3.7). როდესაც კბილანებიან ბორბალს ნელა აბრუნებდნენ, დამკვირვებელი სინათლეს ხედავდა. ბრუნვის სიხშირის ზრდასთან ერთად, სინათლე თანდათან ქრებოდა. რა იყო ამის მიზეზი?



სურ. 3.7

თუ სარკიდან არეკვლილ სინათლის სხივს ჭრილის ადგილზე კბილანა დახვდება, მაშინ დამკვირვებელი სინათლეს ვეღარ დაინახავს. დავუშვათ ბორბალს N რაოდენობის კბილანა აქვს და მისი სიგანე ჭრილის სიგანის ტოლია. სინათლე სარკისკენ და უკან მანძილის გავლას $t_1 = \frac{2L}{c}$ დროს ანდომებს, ხოლო კბილანებიანი ბორბალი ერთი ჭრილით შემოტრიალებას $t_2 = \frac{T}{2N} = \frac{1}{2Nv}$ დროს. თუ $t_1 = t_2$, მაშინ დამკვირვებელი სინათლეს ვერ ხედავს. $\frac{2L}{c} = \frac{1}{2Nv}$ ტოლობიდან მივიღებთ:

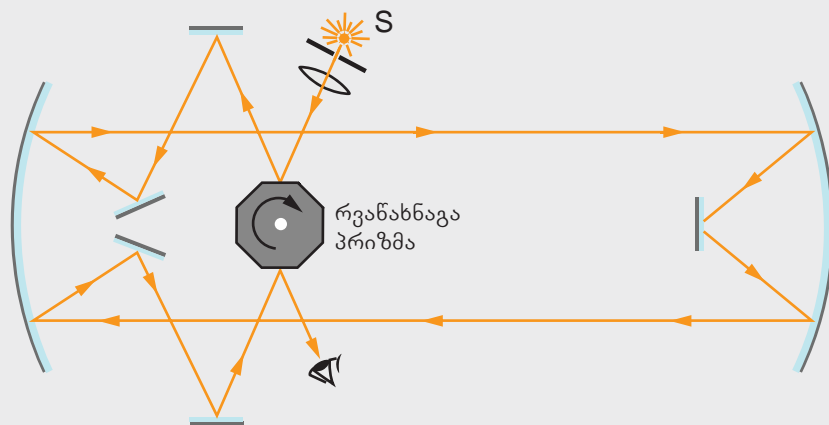
$$c = 4LNv.$$

ამ ფორმულეებში L ბორბლიდან სარკემდე მანძილია, T – კბილანებიანი ბორბლის ბრუნვის პერიოდი, ხოლო v – ბრუნვის სიხშირე.

ფიზოს ცდით მიღებული სინათლის სიჩქარის მნიშვნელობა – $c = 3,13 \cdot 10^8$ კმ/წმ, იმ დროისათვის კარგი შედეგი იყო.

მაიკელსონის ცდა. მაიკელსონის ცდა ფიზოს ცდისაგან იმით განსხვავდებოდა, რომ კბილანებიანი ბორბლის ნაცვლად გამოყენებული იყო ფოლადის რვანახნაგა მბრუნავი პრიზმა ამრეკლი ზედაპირებით (სურ. 3.8). მისგან სინათლის ამრეკლი სარკე დაშორებული იყო 35,4 კმ-ით. მაიკელსონის მიერ სინათლის სიჩქარისათვის მიღებულ იქნა შემდეგი მნიშვნელობა:

$$c = 299796 \text{ კმ/წმ.}$$



სურ. 3.8

დღეისათვის სინათლის სიჩქარის მნიშვნელობა დაზუსტებულია და ის ტოლია:

$$c = 299\,792\,458 \text{ მ/წმ.}$$

ამოცანების ამოხსნისას მივიჩნევთ, რომ სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში არის 300 000 კმ/წმ. აღსანიშნავია, რომ ვაკუუმში იმავე სიჩქარით ვრცელდება ელექტრომაგნიტური ტალღა, რაც ასევე ასაბუთებს სინათლის ტალღურ ბუნებას.

დასკვნები:

- გავრცელებისას სინათლე ტალღურ ბუნებას ამჟღავნებს;
- გამოსხივებისა და შთანთქმის დროს სინათლე ისე იქცევა, როგორც ნაწილაკების ნაკადი;
- ფიზიკის ნაწილს, რომელიც სინათლის თვისებებს შეისწავლის, ოპტიკა ეწოდება;
- სხეულს, რომელიც სინათლეს ასხივებს, სინათლის წყარო ეწოდება;
- სინათლე სასრული სიჩქარით ვრცელდება. ვაკუუმში სინათლე მიახლოებით 300 000 კმ/წმ სიჩქარით ვრცელდება.

საკონტროლო კითხვები:

1. რაში მდგომარეობდა ნიუტონის სინათლის კორპუსკულური თეორიის არსი?
2. ჰუკისა და ჰიუგენსის მოსაზრებით, რას წარმოადგენდა სინათლე?
3. რომელმა თეორიამ გააერთიანა სინათლის ტალღური და კორპუსკულური ბუნება?
4. რამ გამოიწვია იოს ჩრდილიდან გამოსვლის დაგვიანება წინასწარ გამოთვლილ დროის მომენტთან შედარებით?
5. რა უმცირესი კუთხით უნდა შემობრუნდეს მაიკელსონის ცდაში პრიზმა, რომ სარკიდან არეკლილი სინათლე კვლავ დამკვირვებლის თვალს მოხვდეს?



საშინაო ცდა.

ცდის მიზანი: კამერა-ობსკურას დამზადება. სინათლის წრფივ გავრცელებაზე დაკვირვება.

ცდისთვის საჭიროა: მუყაოს კოლოფი, ნახევრად გამჭვირვალე ქალაღი (პერგამენტი), ჭიკარტი, წებო, მაკრატელი, სანთელი.

ცდის აღწერა: კოლოფის ერთ კედელზე (უკანა კედელზე) ამოჭერით პატარა ფანჯარა და მასში პერგამენტი ჩაანებეთ. მის მოპირდაპირე კედელზე (წინა კედელი) ჭიკარტის საშუალებით გააკეთეთ დაახლოებით 1 მმ დიამეტრის ნახვრეტი. მიიღებთ უმარტივეს კამერა-ობსკურას.

ჩაბნელებულ ოთახში კამერის წინა კედელი მიუშვირეთ ანთებულ სანთელს და მიიღეთ მისი გამოსახულება ეკრანზე (უკანა კედელზე). გააფართოეთ ნახვრეტის დიამეტრი (დაახლოებით 5 მმ-მდე) და ცდა გაიმეორეთ.

- როგორი გამოსახულება მიიღება ეკრანზე – პირდაპირი თუ შებრუნებული? გადიდებული თუ შემცირებული?
- როგორ შეიცვალა გამოსახულების სიმკვეთრე ნახვრეტის ზომის გაზრდით? თქვენი დასკვნები ჩაწერეთ რვეულში.

§ 3.2 სინათლის ნრფივი გავრცელება

როგორ ვრცელდება სინათლე სივრცეში? ვიდრე ამ კითხვას ვუპასუხებთ, საჭიროა შემოვიღოთ რამდენიმე ცნება და გავაკეთოთ გარკვეული დაშვებები.

სინათლის გამტარიანობის მიხედვით არსებობს ორგვარი გარემო: გამჭვირვალე, რომელიც ატარებს სინათლეს და გაუმჭვირვალე, რომელიც სინათლეს არ ატარებს.

თუ ბნელ, დაკვამლიანებულ ოთახში, დარაბაში გაკეთებული მცირე ნახვრეტიდან შემოსულ მზის სინათლეს დავაკვირდებით, დავინახავთ რომ იგი ვრცელდება ვიწრო, მცირე სისქის სწორხაზოვანი ზოლის სახით, რომელსაც **სინათლის კონას** უწოდებენ (სურ. 3.9).



სურ. 3.9

შეიძლება ვიფიქროთ, რომ ხვრელის თანდათან შემცირებით, ეს კონა ხაზამდე დავიწროვდება და შევძლებთ სინათლის გავრცელების მიმართულების ძალიან ზუსტად განსაზღვრას. სინამდვილეში, სინათლის კონა

ვიწროვდება იქამდე, ვიდრე ხვრელის დიამეტრი სინათლის ტალღის სიგრძეზე ბევრად დიდია. როცა ხვრელის დიამეტრი თანრიგით სინათლის ტალღის სიგრძეს გაუტოლდება, კონა გაგანიერდება – სინათლე გარს შემოუვლის ნახვრეტის კიდეებს, მსგავსად ტალღებისა წყლის ზედაპირზე. ამის გამო შეუძლებელია იმდენად წვრილი სინათლის კონის მიღება, რომელსაც სინათლის სხივს დავარქმევდით. მაშ, რას ვუწოდოთ სინათლის სხივი? **სინათლის სხივი ის მიმართულებაა, საითაც სინათლეს ენერგია გადააქვს.** ამ მიმართულების დასადგენად, საჭიროა, გამოვყოთ სინათლის ვიწრო კონები და შემდგომ შევცვალოთ ისინი ხაზებით, რომლებიც ამ კონების ღერძებს წარმოადგენს. **სინათლის სხივი გეომეტრიული ობიექტია,** ის ფიზიკური მოდელი არ არის.

ასეთი მიახლოება იმითაა მოსახერხებელი, რომ სივრცეში სინათლის სხივების სვლა შეიძლება მარტივი კანონებით – **გეომეტრიული ოპტიკის** კანონებით ანუ, სინათლის სხივზე წარმოდგენის საფუძველზე აღინეროს.



პიერ ფერმა
1601-1665

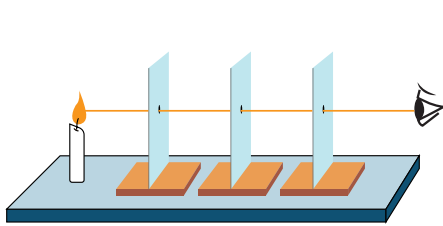
1660 წელს ფრანგმა მეცნიერმა პიერ ფერმამ ჩამოაყალიბა პრინციპი, რომელიც გეომეტრიული ოპტიკის კანონების საფუძველს წარმოადგენს. უმარტივესი ფორმულირებით ეს პრინციპი შეიძლება ჩამოვყალიბოთ შემდეგნაირად: **ორ წერტილს შორის სივრცეში სინათლე ვრცელდება იმ გზით, რომლის გასწვრივ მისი გავლის დრო მინიმალურია.**

ფერმას პრინციპის გამოყენებით, შესაძლებელია მივიღოთ სინათლის ნრფივად გავრცელების კანონი. **ერთგვაროვან გარემოში სინათლე ერთი წერტილიდან მეორეში ვრცელდება უმოკლესი გზით. ასეთ გარემოში ოპტიკური უმოკლესი გზა სწორი ხაზია.**

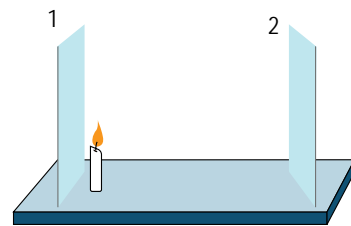
ერთგვაროვან გარემოში სინათლის ნრფივად გავრცელებაში შეიძლება ცდითადაც დავრწმუნდეთ: მაგიდაზე დავდგათ ზუსტად ერთნაირი, ნახვრეტიანი სამი გაუმჭვირვალე ფირფიტა (სურ. 3.10). მათგან ერთ მხარეს, ნახვრეტის დონეზე დავდგათ ანთებული სანთელი და ფირფიტების გადაადგილებით შევეცადოთ დავინახოთ სინათლე ნახვრეტში. თუ წვრილ, სწორ ღეროს ნახვრეტებში გავუყრივთ, დავრწმუნდებით, რომ ისინი ერთ ნრფეზე მდებარეობს. ერთ-ერთი ფირფიტის გადაადგილებისას, სინათლეს ვეღარ დავინახავთ. ეს კი იმაზე მიუთითებს, რომ სინათლე ნრფივად ვრცელდება.

სინათლის წრფივი გავრცელებით აიხსნება **ჩრდილის წარმოქმნა**. ჩრდილი ის არეა, სადაც სინათლის ენერგია ვერ აღწევს. იმის მიხედვით, თუ როგორ ზომისაა სინათლის წყარო, განსხვავებული სურათი მიიღება.

ჯერ ავიღოთ ისეთი სინათლის წყარო, რომლის ზომები მოცემულ პირობებში შეიძლება უგულებელვყოთ. ასეთ სინათლის წყაროს წერტილოვანი ეწოდება. წერტილოვნად შეიძლება მივიჩნიოთ ისეთი სინათლის წყარო, რომლის ზომები გაცილებით მცირეა იმ მანძილზე, რომელზეც სინათლის გავრცელებას ვიხილავთ. სინათლის წერტილოვან წყაროებად შეიძლება მივიჩნიოთ ვარსკვლავები, ქუჩის განათების ლამპიონები და სხვა. სურ. 3.11-ზე გამოსახული სანთელი ეკრანი 1-სთვის წერტილოვანი სინათლის წყარო არ არის, ხოლო ეკრან 2-სთვის ის შეიძლება წერტილოვანი წყარო იყოს.



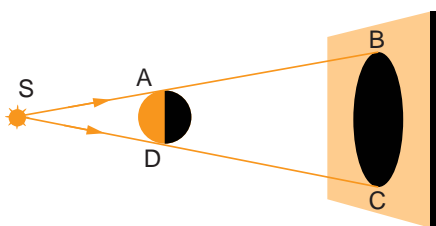
სურ. 3.10



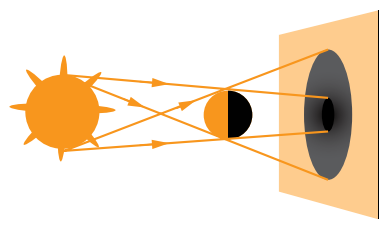
სურ.3.11

სინათლის წერტილოვანი წყაროს შემთხვევაში მიიღება მკვეთრი კონტურის მქონე ჩრდილი (სურ. 3.12). თუ S წერტილოვან სინათლის წყაროსა და გაუმჭირვალე ბურთის განაპირა A წერტილზე გავავლებთ წრფეს, მასზე აღმოჩნდება ჩრდილის განაპირა B წერტილი. სინათლე წრფივად რომ არ ვრცელდებოდეს, ჩრდილი შეიძლება არც კი მიგველო – სინათლე შემოუვლიდა ბურთს.

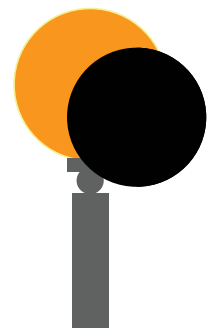
როდესაც სინათლის წყარო არაწერტილოვანია, ეკრანზე ჩრდილის გარშემო მიიღება ნაწილობრივ განათებული არე – არამკვეთრი ჩრდილი (სურ. 3.13). საქმე ისაა, რომ მანათობელი სხეულის სხვადასხვა წერტილიდან გავრცელებული სინათლე ქმნის ჩრდილის განსხვავებულ არეებს, რომელთა ზედდება წარმოქმნის არათანაბარი სიმკვეთრის ჩრდილს. სრული ჩრდილი მიიღება ეკრანის მხოლოდ იმ უბნებში, სადაც სინათლე საერთოდ არ აღწევს. სრული ჩრდილის კიდეებში მდებარეობს უფრო ნათელი არე – **ნახევარჩრდილი**. რაც უფრო ვშორდებით სრული ჩრდილის არეს, ნახევარჩრდილი უფრო ბაცი ხდება. სრული ჩრდილის არედან თვალი საერთოდ ვერ დაინახავს სინათლის წყაროს, ხოლო ნახევარჩრდილის არედან დაინახავს მხოლოდ მისი ზედაპირის ნაწილს (სურ. 3.14).



სურ. 3.12



სურ. 3.13



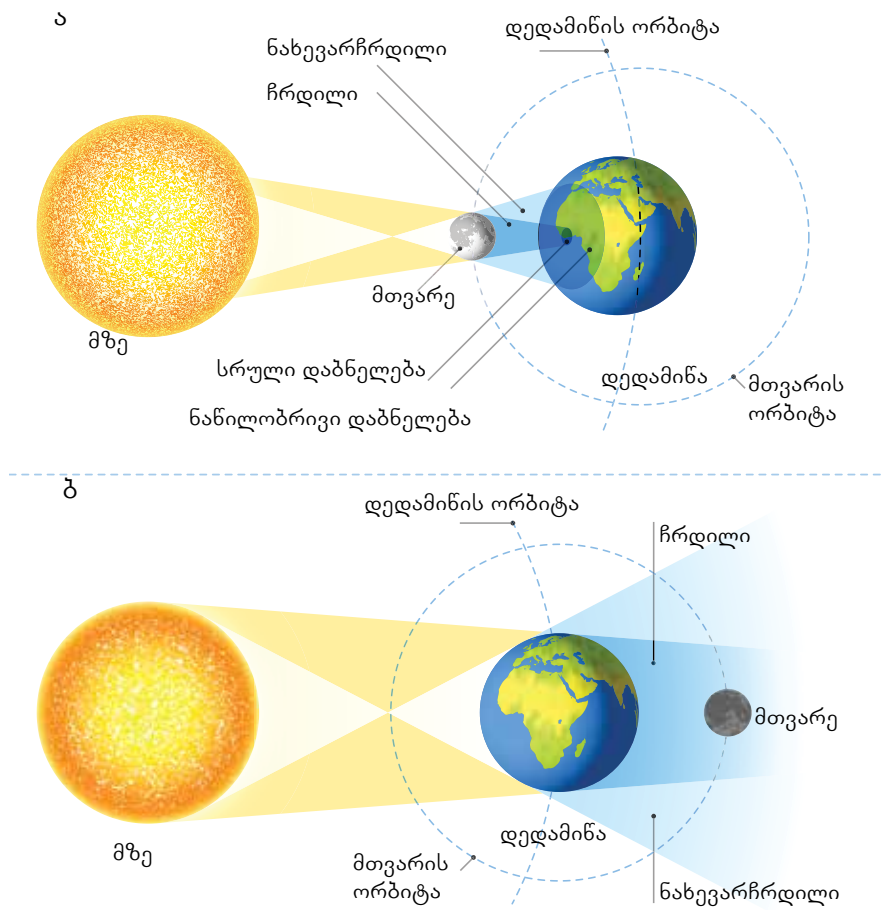
სურ.3.14

ზოგიერთ შემთხვევაში ჩრდილი საერთოდ არ წარმოიქმნება. მაგალითად, საოპერაციოში ქირურგიული მაგიდის განათება ისეა მოწყობილი, რომ ჩრდილი არ წარმოიქმნება, რათა ოპერაციის დროს ექიმებს ხელი არ შეეშალოთ (სურ. 3.15). ახსენით, როგორ მიიღწევა ეს?



სურ. 3.15

კოსმოსური მასშტაბის ჩრდილებისა და ნახევარჩრდილების წარმოქმნა მზისა და მთვარის დაბნელების მიზეზია. როდესაც მთვარე მზესა და დედამიწას შორის მოექცევა, დაიმზირება მზის დაბნელება (სურ. 3.16 ა), ხოლო მთვარის დაბნელება დაიმზირება მაშინ, როდესაც დედამიწა მზესა და მთვარეს შორის აღმოჩნდება (სურ. 3.16 ბ). ჩრდილის არეში ადგილი აქვს სრულ დაბნელებას, ნახევარჩრდილის არეში კი – ნაწილობრივ დაბნელებას.



სურ. 3.16 ა,ბ

დასკვნები:

- სინათლის სხივი ის მიმართულებაა, საითაც ვრცელდება სინათლის ენერგია;
- ოპტიკის ნაწილს, რომელშიც შეისწავლება გამჭვირვალე გარემოში სინათლის ენერგიის გავრცელების კანონები, სინათლის სხივზე წარმოდგენის საფუძველზე, გეომეტრიული ოპტიკა ეწოდება;
- ფერმას პრინციპი შემდეგში მდგომარეობს: ორ წერტილს შორის სივრცეში სინათლე ვრცელდება იმ გზით, რომლის გასწვრივ მისი გავლის დრო მინიმალურია;
- ჩრდილი ის არეა, სადაც სინათლის ენერგია ვერ აღწევს;
- სინათლის წყაროს, რომლის ზომები მოცემულ პირობებში შეიძლება უგულებელვყოთ, სინათლის წერტილოვანი წყარო ეწოდება;
- წერტილოვანი სინათლის წყარო იძლევა ჩრდილს, არაწერტილოვანი კი – ჩრდილსა და ნახევარჩრდილს.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა მოვლენას აქვს ადგილი, როდესაც ხვრელის ზომა სინათლის ტალღის სიგრძის თანრიგს მიაღწევს?
2. რატომაა ერთგვაროვან გარემოში ოპტიკური უმოკლესი გზა სწორი ხაზი?
3. ჩანს თუ არა სინათლის წყარო ჩრდილის არედან? ნახევარჩრდილის არედან?



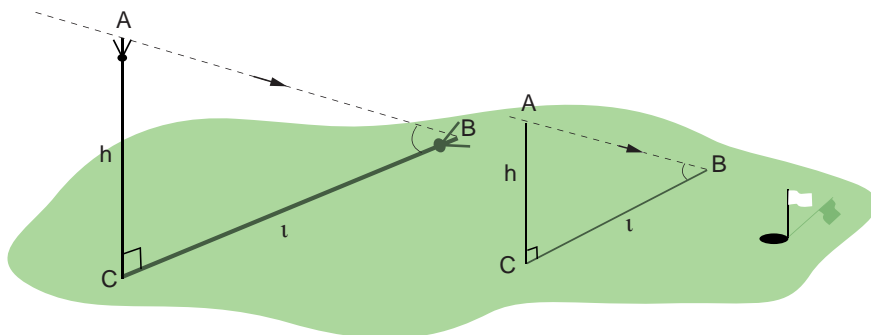
ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

მზის სხივებით განათებულ გოლფის მოედანზე მესამრიდის ჩრდილის სიგრძე 42 მ-ია, 0,9 მ სიმაღლის ჯოხისა კი – 2,7 მ. გამოთვალეთ მესამრიდის სიმაღლე.

მოცემულია: $l_1=42$ მ; $h_2=0,9$ მ; $l_2=2,7$ მ.

$h_1=?$

ამოხსნა: რადგან მზის სხივები პარალელურია, ისინი ერთნაირ კუთხეს ადგენენ მოედნის ზედაპირთან ყოველ წერტილში. სწორედ ამიტომ, ABC და $A_1B_1C_1$ მართკუთხა სამკუთხედები მსგავსია (სურ. 3.17). ე.ი. $\frac{h_1}{h_2} = \frac{l_1}{l_2}$, საიდანაც $h_1 = h_2 \cdot \frac{l_1}{l_2}$ და $h_1=14$ მ.



სურ. 3.17

პასუხი: მესამრიდის სიმაღლე 14 მ-ია.



ამოხსენით ამოცანები:

1. სინათლის ნერტილოვან წყაროსა და ეკრანს შორის არაგამჭვირვალე საგანია მოთავსებული. როგორ შეიცვლება ეკრანზე მიღებული ჩრდილის ზომა, თუ საგანს წყაროს დავაშორებთ? პასუხი დაასაბუთეთ.
2. გამოთვალეთ მანძილი დედამიწიდან მზემდე, თუ ცნობილია, რომ მზის სხივი ამ მანძილის გავლას დაახლოებით 8 წუთს ანდომებს.
3. გამოთვალეთ 51 მ სიმაღლის შენობის ჩრდილის სიგრძე დედამიწის ჰორიზონტალურ ზედაპირზე, თუ მზის სხივები ჰორიზონტთან 60° -იან კუთხეს ადგენს.
4. განსაზღვრეთ მზის სხივის ჰორიზონტალურ ზედაპირზე დაცემის კუთხე, თუ 3 მ სიმაღლის ვერტიკალური ბოძის ჩრდილის სიგრძე 3 მ-ია.
5. 18 მ სიმაღლის ალვის ხე დედამიწის ჰორიზონტალურ ზედაპირზე 27 მ სიგრძის ჩრდილს იძლევა. რა სიგრძის ჩრდილს მოგვცემს მის გვერდით მდგარი 14 მ სიმაღლის ნაძვის ხე?
6. დარბაზის განათების ნათურა იატაკიდან 3,8 მ სიმაღლეზეა. ზუსტად მის ქვეშ მდგომმა 1,9 მ სიმაღლის სპორტსმენმა დაიწყო წრფივი მოძრაობა და 3 მ მანძილი გაიარა. რა მანძილზე გადაადგილდა ამ დროს სპორტსმენის თავის ჩრდილი?
7. სინათლის ნერტილოვან წყაროსა და ეკრანს შორის მანძილი 2,2 მ-ია. ეკრანსა და სინათლის წყაროს შორის, ეკრანიდან 110 სმ მანძილზე მოათავსეს 40 სმ რადიუსის მქონე ბირთვი. გამოთვალეთ ბირთვის ჩრდილის დიამეტრი ეკრანზე.
8. სინათლის ნერტილოვან წყაროსა და ეკრანს შორის მანძილი 2 მ-ია. ეკრანსა და სინათლის წყაროს შორის, სინათლის წყაროდან 125 სმ მანძილზე მოათავსეს 35 სმ რადიუსის მქონე ბირთვი. გამოთვალეთ ბირთვის ჩრდილის რადიუსი ეკრანზე.
9. ქუჩის განათების ნათურა დედამიწის ზედაპირიდან 4,5 მ სიმაღლეზეა. ზუსტად მის ქვეშ მდგომმა 1,5 მ სიმაღლის ბავშვმა დაიწყო წრფივი თანაბარი მოძრაობა 1 მ/წმ სიჩქარით. ბავშვიდან რა მანძილზე იქნება მისი თავის ჩრდილი მოძრაობის დაწყებიდან 7 წმ-ის შემდეგ?
10. 10 სმ დიამეტრის სინათლის წყაროსა და ეკრანს შორის, წყაროდან 15 სმ მანძილზე მოთავსებულია 12 სმ რადიუსის მქონე გაუმჭვირვალე ბურთულა. ბურთულიდან რა მანძილზე უნდა იყოს მოთავსებული ეკრანი, რომ მასზე 120 სმ დიამეტრის ნახევარჩრდილი მივიღოთ?

ეს საინტერესოა

ახლა დედამიწაზე სეზონების ცვლილების საკითხი განვიხილოთ.

როდესაც ჩრდილო ნახევარსფეროში ზაფხულია, სამხრეთ ნახევარსფეროში ზამთარი დგას და პირიქით. რა განაპირობებს ამას? რატომ ვერ გრძნობენ სეზონურ კონტრასტს ეკვატორზე მდებარე ქვეყნებში? რატომ იცვლება დღისა და ღამის ხანგრძლივობა წელიწადის დროების მიხედვით?

როგორც იცით, დედამიწის ორბიტა არა წრიული, არამედ ელიფსურია. ამ ორბიტის მზესთან უახლოესი ნერტილი (პერიჰელიუმი) მისგან დაახლოებით 147 მლნ კმ მანძილზეა, ხოლო უშორესი (აფელიუმი) – 152 მლნ კმ-ზე. მანძილის ეს 3%-იანი განსხვავება დედამიწის მიერ მზიდან მიღებული ენერჯიის 7%-იან სხვაობას იძლევა, მაგრამ ეს დედამიწაზე სეზონების ცვლილების მიზეზი არ არის. ამის დასტური ის ფაქტია,

რომ იანვარში დედამიწა პერიპელიუმში იმყოფება, ივლისში კი – აფელიუმში. მაშ რა ინვევს სეზონების ცვლილებას?

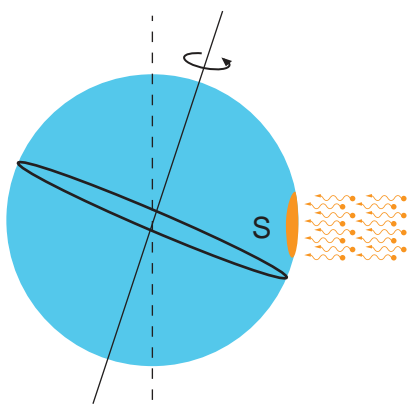
ორბიტაზე მოძრაობისას მზისკენ დედამიწის ხან ჩრდილოეთ, ხან კი სამხრეთ ნახევარსფეროა მიმართული. ზაფხული დგება იმ ნახევარსფეროზე, რომელიც მზისკენაა მიმართული, შესაბამისად, მეორე ნახევარსფეროზე დგება ზამთარი (სურ. 3.18). იმ ნახევარსფეროზე, სადაც ზაფხულია, მზის სხივების დაცემის კუთხე უფრო მცირეა, ვიდრე მეორეზე. დადგენილია, რომ ზაფხულში ნახევარსფერო ზამთართან შედარებით დაახლოებით 3-ჯერ მეტ სითბურ ენერგიას იღებს.



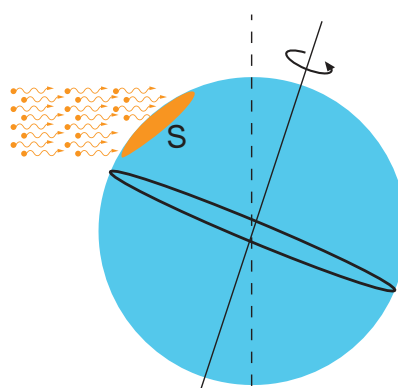
სურ. 3.18

ამ თავის პირველ პარაგრაფში აღვნიშნეთ, რომ სინათლე განსაკუთრებული ბუნების ნაწილაკების – ფოტონების ნაკადს წარმოადგენს. სწორედ მზიდან წამოსულ ფოტონებს მოაქვს დედამიწამდე ენერგია. როდესაც მზის სხივი ზედაპირს მართობულად ეცემა (დაცემის კუთხე 0° -ია), მაშინ დროის ერთეულში რაიმე ფართობზე დაცემული ფოტონების რიცხვი მაქსიმალურია (სურ. 3.19 ა). დაცემის კუთხის ზრდისას, ფოტონების იგივე რიცხვი დედამიწის ზედაპირის უფრო დიდ ფართობზე ნაწილდება – $S_2 > S_1$ (სურ. 3.19 ბ).

დედამიწის ეკვატორულ სარტყელში სეზონებს შორის მზის სხივების დაცემის კუთხის ცვლილება შედარებით მცირეა, ამიტომ სეზონური კონტრასტიც უმნიშვნელოა. დედამიწის ბრუნვის ღერძის გადახრის ცვლილებით, აიხსნება დღისა და ღამის ხანგრძლივობის ცვლილებაც.




სურ. 3.19 ა

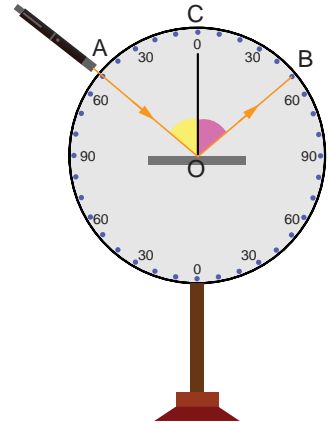


სურ. 3.19 ბ

§ 3.3 სინათლის არეკვლა

რატომ ვერ ვხედავთ საგნებს ღამით, როდესაც არ არის განათება? რატომ დავინახავთ იმავე საგნებს, თუ, მაგალითად, მობილური ტელეფონის განათებას ჩავრთავთ? რითია გამოწვეული, რომ საგნებს ფერის მიხედვით ვასხვავებთ? რატომ ვხედავთ საკუთარ გამოსახულებას მხოლოდ სარკეში და, ამასთან, თითქმის ვერ ვხედავთ თვით სარკეს? ამ ყველაფრის მიზეზი საგნებიდან სინათლის არეკვლის მოვლენაა.

 ჩავატაროთ ცდა ოპტიკური დისკოს გამოყენებით. ის წარმოადგენს დანაყოფებიან წრეს, რომლითაც შესაძლებელია კუთხის გაზომვა. დისკოს ცენტრში დავამაგროთ სარკე (გლუვი გაპრიალებული ზედაპირი) (სურ. 3.20). სინათლის წყაროდან (ლაზერიდან) სარკისკენ AO სხივის გასწვრივ მივმართოთ სინათლის ვიწრო კონა. სარკიდან სინათლის კონა აირეკლება OB სხივის მიმართულებით. AO სხივის სარკეზე დაცემის წერტილში მისი ზედაპირისადმი გავავლოთ CO მართობი.



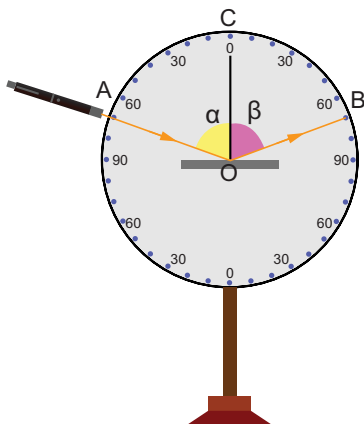
სურ. 3.20

კუთხეს დაცემულ სხივსა და დაცემის წერტილში ზედაპირისადმი გავლებულ მართობს შორის, დაცემის კუთხე ეწოდება, ხოლო კუთხეს არეკლილ სხივსა და იმავე მართობს შორის – არეკვლის კუთხე.

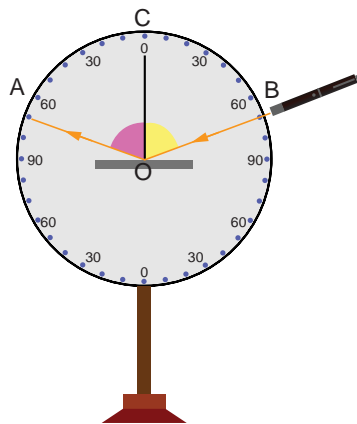
დაცემის კუთხე აღვნიშნოთ α ასოთი, არეკვლის კუთხე კი – β -თი. ცდით დავინახავთ, რომ **დაცემისა და არეკვლის კუთხეები ტოლია: $\alpha = \beta$.**

თუ ლაზერის სხივის სარკეზე დაცემის კუთხეს შევცვლით და არეკვლის შესაბამის კუთხეს გავზომავთ, დავრწმუნდებით, რომ დაცემისა და არეკვლის კუთხეები ყოველთვის ტოლი იქნება (სურ. 3.21).

ახლა სხივის მიმართულება შევაბრუნოთ: სარკეზე სინათლის კონა არეკლილის გასწვრივ B-დან O-სკენ მივმართოთ. დავინახავთ, რომ სარკიდან არეკლილი სინათლე მანამდე დაცემულის საპირისპირო მიმართულებით O-დან A-სკენ გავრცელდება (სურ. 3.22), ანუ, დაცემულმა და არეკლილმა სხივებმა ადგილები გაცვალეს. სხივების ამ თვისებას **სხივთა შექცევადობა** ეწოდება.



სურ. 3.21



სურ. 3.22

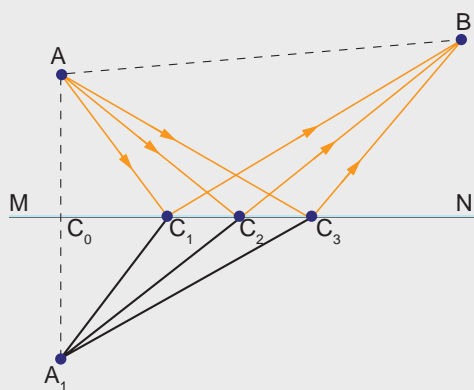
ოპტიკურ დისკოზე ჩანს როგორც დაცემული სხივი, ასევე არეკლილი სხივი, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ორივე მათგანი დისკოს სიბრტყეშია განთავსებული.

ამ ცდების საფუძველზე შეიძლება ჩამოვყალიბოთ **არეკვლის კანონი**:

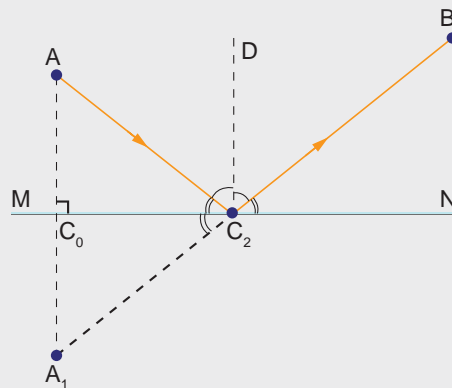
დაცემული სხივი, არეკლილი სხივი და დაცემის წერტილში ამრეკლი ზედაპირისადმი გავლებული მართობი ერთ სიბრტყეშია განთავსებული; დაცემის კუთხე არეკვლის კუთხის ტოლია.

სინათლის არეკვლის კანონის თეორიულად დასაბუთება შეიძლება წინა პარაგრაფში მოყვანილი ფერმას პრინციპის გამოყენებით:

ვთქვათ, MN ორი გარემოს გამყოფი სარკული ზედაპირია (სურ.3.23). დავუშვათ, რომ სინათლის სხივი გამოდის A წერტილიდან და ზედაპირიდან არეკვლის შემდეგ ხვდება B წერტილში. კონკრეტულად რომელი გზით განხორციელდება ეს? დავხაზოთ რამდენიმე შესაძლო გზა: AC_1B , AC_2B და AC_3B . რადგან სინათლე არეკვლამდეც და არეკვლის შემდეგაც ერთგვაროვან გარემოში ვრცელდება, ამიტომ სინათლის გავრცელების მინიმალურ დროს მინიმალური გავლილი მანძილი შეესაბამება. ე.ი. უნდა ვიპოვოთ მინიმალური მანძილი A-დან B წერტილამდე სარკის გავლით. მის საპოვნელად საჭიროა MN ზედაპირის მიმართ A წერტილის სიმეტრიული A_1 წერტილი ავაგოთ. ცხადია, $AC_0 = A_1C_0$ და $AA_1 \perp MN$. თუ C_1 , C_2 და C_3 წერტილებს A_1 წერტილთან შევადრებთ, ადვილად დავრწმუნდებით, რომ $AC_1 = A_1C_1$, $AC_2 = A_1C_2$ და $AC_3 = A_1C_3$. ამიტომ A-დან B წერტილში სხივის გადასვლისას გავლილი მანძილის გამოთვლისას, AC_1 მონაკვეთი შეგვიძლია A_1C_1 მონაკვეთით შევცვალოთ, AC_2 მონაკვეთი – A_1C_2 -ით, AC_3 მონაკვეთი კი – A_1C_3 -ით. ანუ, ვიპოვოთ უმოკლესი გზა სხივისათვის A წერტილიდან B წერტილამდე იგივეა, რაც ვიპოვოთ მინიმალური მანძილი A_1 წერტილიდან B წერტილამდე. ეს კი A_1B მონაკვეთის სიგრძეა. აქედან გამომდინარე, ცხადია, რომ საძიებელი უმოკლესი გზა სხივისათვის გადის ამრეკლი ზედაპირის იმ C_2 წერტილზე, რომელიც A_1B წრფეზე მდებარეობს.



სურ. 3.23



სურ. 3.24

ახლა დავასაბუთოთ, რომ C_2 წერტილიდან არეკვლისას სხივის დაცემის α და არეკვლის β კუთხეები ტოლია (სურ. 3.24). რადგან $\Delta AC_2C_0 = \Delta A_1C_2C_0$ (მართკუთხე სამკუთხედები ტოლი კათეტებით), ამიტომ $\angle AC_2C_0 = \angle A_1C_2C_0$. მეორე მხრივ, $\angle A_1C_2C_0 = \angle BC_2N$ (ვერტიკალური კუთხეები). მაშასადამე, $\angle AC_2C_0 = \angle BC_2N$, რაც ნიშნავს, რომ

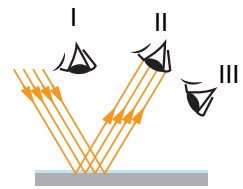
$$\alpha = \beta.$$

ადვილი მისახვედრია, რომ, თუ AC_2 , C_2B სხივები და C_2D მართობი ერთ სიბრტყეში არ იქნებოდა განთავსებული, მაშინ მანძილი A წერტილიდან MN ზედაპირამდე და შემდგომ მისგან B წერტილამდე არ იქნებოდა უმოკლესი.

გავარკვიოთ, როგორ ირეკლება სინათლე სხვადასხვა ზედაპირიდან.

თუ ზედაპირზე დაცემული პარალელურ სხივთა კონა არეკვლის შემდეგაც პარალელური რჩება, ასეთ არეკვლას **სარკული არეკვლა** ეწოდება, ხოლო ზედაპირს – **სარ-**

კული ზედაპირი. სარკული ზედაპირიდან სინათლის პარალელური კონის არეკვლის შემდეგ ის თვალში მოხვდება მხოლოდ მაშინ, როდესაც თვალი II მდებარეობაში იქნება, I და III მდებარეობებში კი სინათლეს ვერ დავინახავთ (სურ. 3.25).



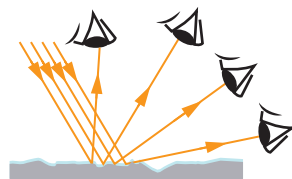
სურ. 3.25

უძრავი წყლის ზედაპირიდან სინათლე სარკულად ირეკლება (სურ. 3.26).

თუ ზედაპირზე დაცემული პარალელურ სხივთა კონა არეკვლის შემდეგ პარალელური არ რჩება და სხვადასხვა მიმართულებით გაიბნევა, ასეთ არეკვლას **დიფუზური არეკვლა** ეწოდება (სურ. 3.27). დიფუზურ არეკვლას ადგილი აქვს უსწორმასწორო (მქისი) ზედაპირიდან: ასეთი ზედაპირის სხვადასხვა უბანზე პარალელური სხივების დაცემის კუთხე სხვადასხვაა, ამიტომ განსხვავებულია მათი არეკვლის კუთხეებიც. დიფუზური არეკვლისას ამრეკლი ზედაპირი ჩანს თვალის ნებისმიერი მდებარეობისას. სწორედ არეკვლის წყალობით ვხედავთ საგნებს, რომლებიც თვითონ არ ასხივებენ სინათლეს.



სურ. 3.26



სურ. 3.27



<http://tiny.cc/9o87vz>

დასკვნები:

- კუთხეს დაცემულ სხივსა და დაცემის წერტილში ზედაპირისადმი გავლებულ მართობს შორის, დაცემის კუთხე ეწოდება, ხოლო კუთხეს არეკლილ სხივსა და იმავე მართობს შორის – არეკვლის კუთხე;
- დაცემული სხივი, არეკლილი სხივი და დაცემის წერტილში ამრეკლი ზედაპირისადმი გავლებული მართობი ერთ სიბრტყეშია განთავსებული; დაცემის კუთხე არეკვლის კუთხის ტოლია;
- დაცემული და არეკლილი სხივები ურთიერთშექცევადია;
- სარკულ ზედაპირზე დაცემული პარალელურ სხივთა კონა მისგან არეკვლის შემდეგაც პარალელურია;
- უსწორმასწორო (მქის) ზედაპირზე დაცემული პარალელურ სხივთა კონა მისგან სხვადასხვა მიმართულებით აირეკლება.

საკონტროლო კითხვები:

1. რას წარმოადგენს ოპტიკური დისკო?
2. რით გამოიხატება სხივების შექცევადობის თვისება?
3. რისი ტოლია დაცემის კუთხე, თუ სხივი ზედაპირის მართობულია?
4. რის გამო ვხედავთ იმ საგნებს, რომლებიც თავად არ ასხივებენ სინათლეს?
5. რატომ აირეკლება დიფუზურად (სხვადასხვა მიმართულებით) მქის ზედაპირზე დაცემული პარალელურ სხივთა კონა?

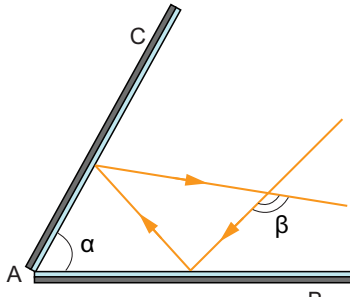


ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

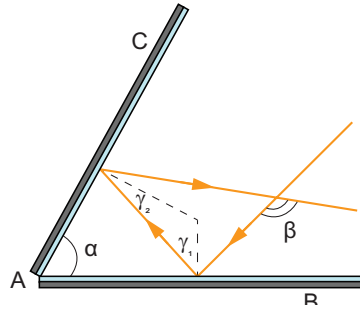
სურათ 3.28-ზე გამოსახულია სხივის თანმიმდევრული არეკვლა ორი ბრტყელი AB და AC სარკიდან, რომელთა შორის α კუთხე 60° -ის ტოლია. იპოვეთ დაცემულ და არეკლილ სხივებს შორის β კუთხე.

მოცემულია: $\alpha = 60^\circ$.

$\beta = ?$



სურ. 3.28



სურ. 3.29

ამოხსნა: პირველი სარკიდან არეკვლის კუთხე აღვნიშნოთ γ_1 -ით, მეორე სარკეზე დეცემისკუთხე კი γ_2 -ით. როგორც სურ. 3.29-დან ჩანს $(90^\circ - \gamma_1) + (90^\circ - \gamma_2) + \alpha = 180^\circ$. საიდანაც $\gamma_1 + \gamma_2 = \alpha$. მათემატიკის კურსიდან თქვენთვის ცნობილია, რომ სამკუთხედის გარე კუთხე მისი არამოსაზღვრე შიგა კუთხეების ჯამის ტოლია: $2\gamma_1 + 2\gamma_2 = \beta$, ანუ $\beta = 2\alpha = 120^\circ$.

პასუხი: დაცემულ და არეკლილ სხივებს შორის კუთხე 120° -ის ტოლია.



ამოხსენით ამოცანები:

1. იპოვეთ სხივის დაცემის კუთხე, თუ არეკვლის კუთხე 25° -ია?
2. სხივის დაცემის კუთხე 40° -ია. იპოვეთ არეკლილი სხივის ზედაპირთან შექმნილი კუთხე.
3. დაცემულ და არეკლილ სხივებს შორის კუთხე 60° -ია. იპოვეთ არეკვლის კუთხე*.
4. დაცემული სხივი ზედაპირთან 33° -იან კუთხეს ქმნის. იპოვეთ დაცემულ და არეკლილ სხივებს შორის კუთხე.
5. არეკლილი სხივის ზედაპირთან შექმნილი კუთხე 2-ჯერ აღემატება დაცემის კუთხეს. იპოვეთ კუთხე დაცემულ და არეკლილ სხივებს შორის.
6. კუთხეს, რომელსაც მზის სხივი ჰორიზონტთან ქმნის, მზის სიმაღლეს უწოდებენ. იპოვეთ კუთხე დაცემულ და არეკლილ სხივებს შორის, თუ ცნობილია, რომ მზის სიმაღლე ამ კუთხის $1/8$ ნაწილია.
7. როგორ შეიცვლება დაცემულ და არეკლილ სხივებს შორის კუთხე, თუ დაცემის კუთხეს 10° -ით შევამცირებთ?
8. როგორ შეიცვლება კუთხე არეკლილ სხივსა და ზედაპირს შორის, თუ დაცემულ და არეკლილ სხივებს შორის კუთხე 28° -ით გაიზრდება?
9. სხივის დაცემის კუთხის 20% -ით შემცირება დაცემულ და არეკლილ სხივებს შორის კუთხეს 16° -ით ცვლის. იპოვეთ სხივის დაცემის კუთხე შემცირებამდე.
10. მზის სიმაღლე 44° -ია. რა კუთხეს უნდა ქმნიდეს ჰორიზონტთან ამრეკლი ზედაპირი, რომ მისგან სინათლე ვერტიკალურად ზევით აირეკლოს?

* ამ და სხვა ამოცანებში დაცემულ და არეკლილ სხივებს შორის კუთხეში იგულისხმება კუთხე, რომელიც სხივის დაცემის ნერტილიდან ზედაპირისადმი აღმართულ მართობს მოიცავს.

§ 3.4 გამოსახულება ბრტყელ სარკეში

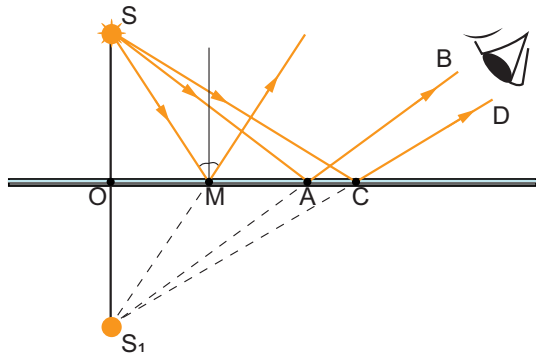
ყოველდღიურად თქვენ იყენებთ სარკეს, რათა დაინახოთ თქვენივე ზუსტი გამოსახულება (სურ. 3.30). როგორ მიიღება გამოსახულება სარკეში? როგორი სარკე იძლევა საგნის გამოსახულებას უცვლელად და როგორი ცვლის მას?

ალბათ დაკვირვებისათვის, რომ თქვენ მიერ გამოყენებული სარკე უმეტესწილად ბრტყელია. **ბრტყელ სარკეს უწოდებენ ისეთ ბრტყელ ზედაპირს, რომელიც სინათლეს სარკულად ირეკლავს.** ნებისმიერი საგანი წერტილთა ერთობლიობაა, ამიტომ ბრტყელ სარკეში საგნის გამოსახულების ასაგებად უპირველესად საჭიროა შევისწავლოთ წერტილის გამოსახულების აგება.

ვთქვათ, მნათი S წერტილი მდებარეობს ბრტყელი სარკის წინ. სად დავინახავთ ამ წერტილის გამოსახულებას, თუ სარკეში ჩავიხედავთ? ამ კითხვაზე პასუხის გასაცემად S წერტილიდან გამომავალი რამდენიმე, SM , SA და SC სხივის სვლა ავაგოთ (სურ. 3.31). სარკიდან არეკვლის შემდეგ ეს სხივები განიბნევა. მათგან AB და CD დამკვირვებლის თვალში მოხვედრილი განაპირა სხივებია. დამკვირვებელს ეჩვენება, რომ ისინი გამოდის არა S , არამედ S_1 წერტილიდან, რომლის მდებარეობა შეიძლება ვიპოვოთ, თუ არეკვლილ სხივებს სარკის უკანა მხარეს მათ გადაკვეთამდე გავაგრძელებთ.



სურ. 3.30



სურ. 3.31

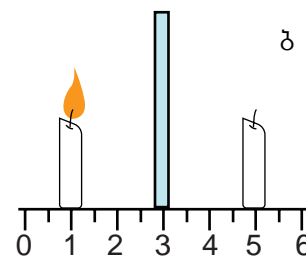
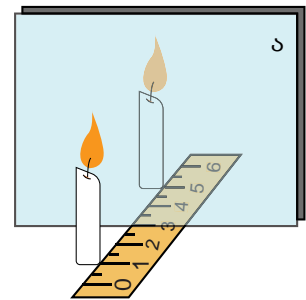
შესაბამისად, S_1 წერტილი იქნება S წერტილის გამოსახულება ბრტყელ სარკეში. რადგან S_1 წერტილში იკვეთება არა თავად არეკვლილი სხივები, არამედ მათი გაგრძელებები, ამიტომ ასეთ გამოსახულებას **წარმოსახვითი ეწოდება** – სინათლის ენერგია ამ წერტილში არ მიდის.

განვიხილოთ $\triangle SAC$ და $\triangle S_1AC$. ამ სამკუთხედებს საერთო AC გვერდი აქვს. არეკვლის კანონის გამოყენებით შეიძლება დავამტკიცოთ, რომ სამკუთხედებში ამ გვერდის მიმდებარე შესაბამისი კუთხეები ტოლია, ანუ ეს სამკუთხედები ტოლია და თუ ნახაზს სარკის ხაზზე გადავკეცავთ, ისინი ერთმანეთს დაემთხვევა. ეს ნიშნავს, რომ S_1 და S წერტილები სარკის სიბრტყის მიმართ ერთმანეთის სიმეტრიულია: $SO = S_1O$

ამრიგად, ბრტყელ სარკეში წერტილის გამოსახულების ასაგებად საკმარისია მისგან დავუშვათ მართობი სარკის სიბრტყეზე და გავაგრძელოთ ის სარკის მეორე მხარეს იმავე მანძილზე.



მიღებული დასკვნა შეიძლება დავადასტუროთ ცდით. სადგამზე ვერტიკალურ მდგომარეობაში დავამაგროთ მინის ბრტყელი ნაჭერი და მის წინ ანთებული სანთელი დავდგათ (სურ. 3.32 ა). მინაში, როგორც სარკეში, დავინა-



სურ. 3.32

ხავთ სანთლის გამოსახულებას. ახლა ავიღოთ ასეთივე მეორე, ოღონდ ჩამქრალი სანთელი, მოვათავსოთ ის მინის მეორე მხარეს და გადაადგილებით ვიპოვოთ მისი ისეთი მდებარეობა, რომელშიც სანთელი ანთებული მოგვეჩვენება (სურ. 3.32 ბ). ეს ნიშნავს, რომ ჩამქრალი სანთელი მდებარეობს იმავე ადგილზე, სადაც ვხედავთ ანთებული სანთლის გამოსახულებას. სანთლიდან და მისი გამოსახულებიდან მინამდე მანძილების გაზომვით დავრწმუნდებით, რომ ისინი ტოლია.

ცდა ასევე გვიჩვენებს, რომ სანთლისა და მისი გამოსახულების სიმაღლეებიც ტოლია. ეს ნიშნავს, რომ **ბრტყელ სარკეში საგნისა და მისი გამოსახულების ზომები ერთნაირია.**

ამრიგად, **ბრტყელ სარკეში საგნის გამოსახულება წარმოსახვითია და ის სარკის მიმართ საგნის სიმეტრიულია.**

სწორედ ამიტომაც, რომ ნიკაპთან მიტანილი მარჯვენა ხელის სარკული გამოსახულება აღიქმება ისე, თითქოს ნიკაპთან მარცხენა ხელი იყოს მიტანილი (სურ. 3.33).

ბრტყელ სარკეებს ყოფა-ცხოვრებაში ფართო გამოყენება აქვს. მაგალითად, სარკეების გამოყენებით მძლოლი აკონტროლებს ავტობუსის სალონს. ბრტყელი სარკეები გამოიყენება სხვადასხვა ოპტიკურ ხელსაწყოებში, ისრიანი გამზომი ხელსაწყოების სკალებში და მრავალი სხვა.



სურ. 3.33

დასკვნები:

- ბრტყელ ზედაპირს, რომელიც სინათლეს სარკულად ირეკლავს, ბრტყელი სარკე ეწოდება;
- ბრტყელ სარკეში საგნის გამოსახულება წარმოსახვითია;
- ბრტყელ სარკეში საგანი და მისი გამოსახულება სარკის მიმართ სიმეტრიულია.

საკონტროლო კითხვები:

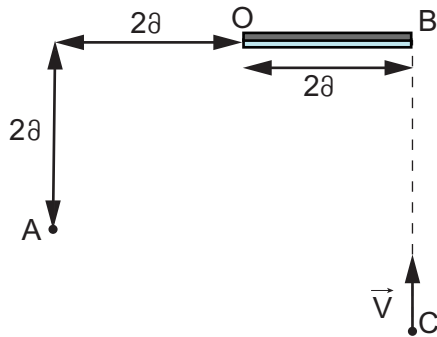
1. რატომ არის წერტილის გამოსახულება ბრტყელ სარკეში წარმოსახვითი?
2. რატომ არის საგნისა და ბრტყელ სარკეში მისი გამოსახულების ზომები ერთნაირი?
3. როგორ შეიცვლება მანძილი საგანსა და ბრტყელ სარკეში მის გამოსახულებას შორის, თუ საგანს სარკეს დავუახლოვებთ?



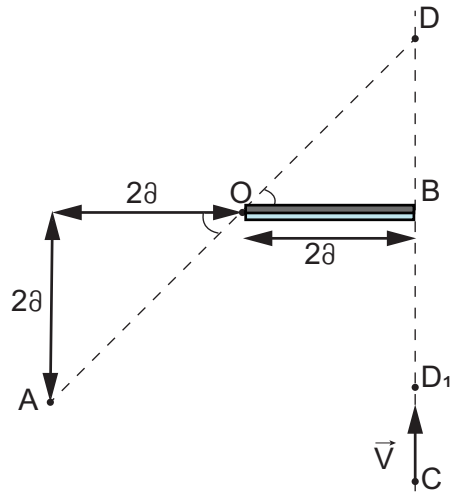
ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

A წერტილში მყოფი დამკვირვებელი (სურ. 3.34) რა დროის შემდეგ დაინახავს OB სარკეში მისი მართობული BC წრფის გასწვრივ, 2 მ/წმ სიჩქარით მფრინავ ციცინათელას, თუ დროის ათვლის დასაწყისში ციცინათელა B წერტილიდან 10 მეტრით დაშორებულ C წერტილშია?

მოცემულია: $v=2\text{მ/წმ}$; $BC= 10\text{ მ}$;
 $t=?$



სურ. 3.34



სურ. 3.35

ამოხსნა: დამკვირვებელი ციცინათელას დაინახავს მაშინ, როდესაც მისი გამოსახულება D_1 წერტილის სარკისადმი სიმეტრიულ D წერტილში აღმოჩნდება (იხ.სურ. 3.35). $\angle D_1OB = 45^\circ$, ამიტომ $OB=BD=2\text{ მ}$. ციცინათელას D_1 წერტილში მისვლამდე გასავლელი აქვს 8 მ-ის ტოლი მანძილი, რომელსაც ის 4 წმ-ში დაფარავს.

პასუხი: დამკვირვებელი ციცინათელას 4 წმ-ის შემდეგ დაინახავს.



ამოხსენით ამოცანები:

- განსაზღვრეთ მანძილი ბრტყელ სარკესა და მის წინ მოთავსებულ მნათ წერტილს შორის, თუ ამ წერტილსა და მის გამოსახულებას შორის მანძილი 30 სმ-ია.
- მნათი წერტილი ბრტყელი სარკის წინ 20 სმ მანძილზეა მოთავსებული. რისი ტოლი იქნება წერტილსა და მის გამოსახულებას შორის მანძილი, თუ წერტილს სარკეს 4 სმ-ით მივუახლოვებთ?
- როგორ შეიცვლება მანძილი მნათ წერტილსა და ბრტყელ სარკეში მის გამოსახულებას შორის, თუ სარკეს გამოსახულებისაკენ პარალელურად გადავიტანთ 5 სმ-ით?
- მნათი წერტილი ბრტყელ სარკეს 3 მ/წმ სიჩქარით შორდება. უახლოვდება თუ შორდება მნათი წერტილი მის გამოსახულებას? რა სიჩქარით?
- 3,4 მ სიმაღლის განათების ბოძის წვერში ნათურაა დამაგრებული. ბოძიდან 12 მ-ის დაშორებით დგას 170 სმ სიმაღლის ადამიანი. დედამიწის ზედაპირზე ბოძიდან რა მანძილზე უნდა მოვათავსოთ ჰორიზონტალურად მცირე ზომის ბრტყელი სარკე, რომ ადამიანმა მასში ნათურის დანახვა შეძლოს?

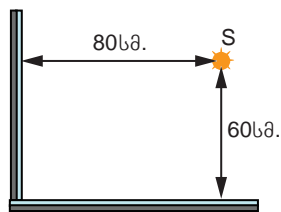
6. ოთახში დგას 2 მ სიმაღლის კარადა. სულ მცირე რა სიმაღლე უნდა ჰქონდეს ოთახის კედელზე მიმაგრებულ ბრტყელ სარკეს, რომ მასში კარადა მთლიანად გამოჩნდეს?

7. ოთახის კედლებზე ერთმანეთის მოპირდაპირედ ორი ბრტყელი სარკეა მიმაგრებული. შეიცვლება თუ არა სარკეებს შორის მოთავსებული სანთლის გამოსახულებებს შორის მანძილი, თუ მის დაშორებას ერთ-ერთი სარკიდან გავანახევრებთ? პასუხი დაასაბუთეთ.

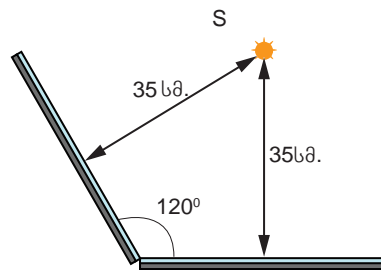
8. ციცინათელა მიფრინავს ჰორიზონტალურად მუდმივი 3 სმ/წმ სიჩქარით. მოდულით რა სიჩქარით იმოძრაებს მისი გამოსახულება დედამიწის მიმართ, თუ ვერტიკალურად დაკიდებულ ბრტყელ სარკეს ავამოძრაებთ ჰორიზონტალური მიმართულებით ციცინათელას მოძრაობის საპირისპიროდ 2 სმ/წმ სიჩქარით?

9. მნათი წერტილი მოთავსებულია ორ ურთიერთმართობული ბრტყელი სარკის წინ, ერთი მათგანიდან 60 სმ, ხოლო მეორისგან 80 სმ მანძილზე. (იხ. სურ. 3.36) იპოვეთ მანძილი სარკეებში მნათი წერტილის პირველ გამოსახულებებს შორის.

10. მნათი წერტილი მოთავსებულია ერთმანეთისადმი 120° -იანი კუთხით განლაგებული ორი ბრტყელი სარკის წინ, თითოეულისაგან 35 სმ მანძილზე (იხ. სურ. 3.37). იპოვეთ მანძილი სარკეებში მნათი წერტილის პირველ გამოსახულებებს შორის.



სურ. 3.36



სურ. 3.37



საშინაო ცდა.

ცდის მიზანი: ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლისას სინათლის გავრცელებაზე დაკვირვება.

ცდისთვის საჭიროა: გამჭვირვალე ჭიქა, მონეტა, წყალი.

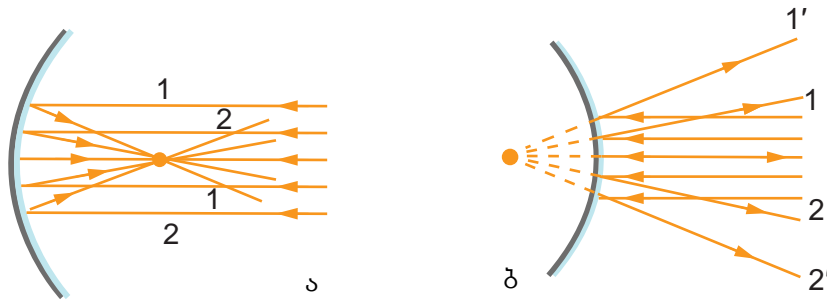
ცდის აღწერა: მოათავსეთ ცარიელი ჭიქის ფსკერზე მონეტა. ჭიქას მაგიდაზე ისეთი მდებარეობა შეურჩიეთ, რომ მონეტის ცენტრი, ჭიქის კიდე და თვალი ერთ წრფეზე მდებარეობდეს. ამ მდგომარეობაში დარჩით უმოძრაოდ და სთხოვეთ ოჯახის წევრს, რომ ჭიქა თანდათან წყლით შეავსოს.

დააკვირდით მონეტას და შეეცადეთ უპასუხოთ კითხვებს:

- როგორ იცვლება მონეტის და ჭიქის ფსკერის მდებარეობა წყლის დონის ზრდასთან ერთად?
- გამოჩნდა თუ არა მონეტა უფრო სრულად ჭიქაში წყლის ჩასხმის შემდეგ? თქვენი დასკვნები ჩანერეთ რვეულში.

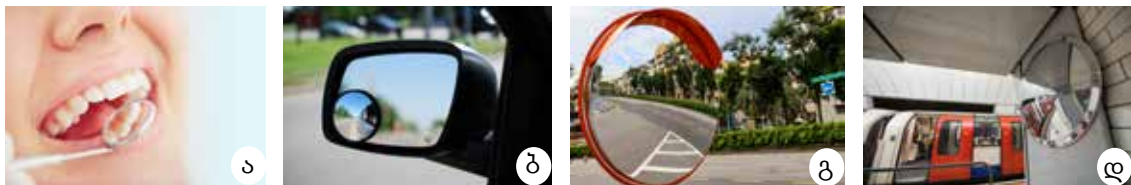
ეს საინტერესოა

ხშირად გამოიყენება სარკეები, რომელთა ამრეკლი ზედაპირები სფეროს ნაწილს წარმოადგენს. ასეთი სარკე ორი სახისაა: ჩაზნექილი (სურ. 3.38 ა) და ამოზნექილი (სურ. 3.38 ბ). ჩაზნექილი სარკე მასზე დაცემულ პარალელურ სხივებს არეკვლის შემდეგ ერთ წერტილში კრებს, ანუ სინათლის ენერგიის კონცენტრაციას ახდენს. ამოზნექილი სარკე კი პირიქით – არეკვლის შემდეგ სინათლის სხივებს გააბნევს.



სურ. 3.38

სხივთა შექცევადობის პრინციპიდან გამომდინარეობს, რომ ბრტყელ სარკესთან შედარებით, ამოზნექილ სარკეში ბევრად მეტი საგნის დანახვაა შესაძლებელი, ანუ მას უფრო დიდი ხედვია არე აქვს, ამიტომ ის ფართოდ გამოიყენება მედიცინაში (სურ. 3.39 ა), ავტომობილებში (სურ. 3.39 ბ), გზაჯვარედინებზე და მკვეთრ მოსახვევებში (სურ. 3.39 გ), მეტროში (სურ. 3.39 დ) და სხვა.



სურ. 3.39

ჩაზნექილ სარკეებს იყენებენ სინათლის ენერგიის კონცენტრაციისთვის. მაგალითად, მისი გამოყენებით შესაძლებელია საჭმლის გაცხელება (სურ. 3.40). შორეული ვარსკვლავების დასამზერად სარკულ ტელესკოპებს იყენებენ (სურ. 3.41).



სურ. 3.40



სურ. 3.41

§ 3.5 სინათლის გარდატეხა

რატომ გვეჩვენება გადატეხილად აუზის სანმენდი სწორი ჯოხი წყლის ზედაპირთან? რატომ გვეჩვენება აუზის სიღრმე უფრო ნაკლები, ვიდრე ის სინამდვილეშია (სურ. 3.42)? მსგავსი რამ სახლშიც შეგიძინებიათ, მაგალითად, გამჭვირვალე წყლიან ჭიქაში კოვზის ჩადებისას (სურ. 3.43). ამ ყველაფრის მიზეზი სინათლის გარდატეხის მოვლენაა.

ორი გამჭვირვალე გარემოს გამყოფ ზედაპირზე სინათლის კონის დაცემისას, მისი ნაწილი აირეკლება, ნაწილი კი მეორე გარემოში გადადის და გავრცელების მიმართულებას იცვლის (სურ. 3.44).




სურ. 3.42



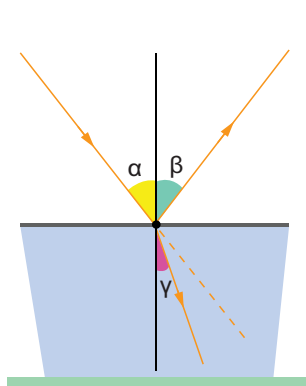
სურ. 3.43

ორი გარემოს გამყოფი ზედაპირის გავლისას სინათლის გავრცელების მიმართულების ცვლილებას სინათლის გარდატეხა ეწოდება.

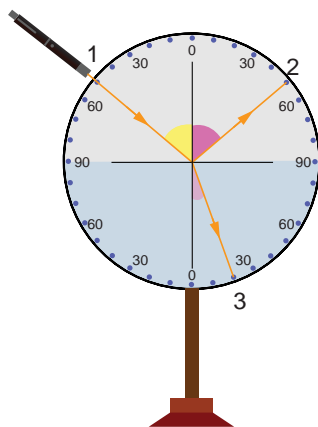
 ჩავატაროთ ცდა. ოპტიკური დისკოს ცენტრში დავამაგროთ მინის ნახევარდისკო (სურ. 3.45). მივმართოთ მასზე სინათლის ვიწრო ნაკადი (სხივი 1). ჰაერიდან მინაში გადასვლისას სინათლე გარდატეხდება (სხივი 3).

კუთხეს სხივის დაცემის წერტილში ორი გარემოს გამყოფ ზედაპირისადმი გავლებულ მართობსა და გარდატეხილ სხივს შორის, გარდატეხის კუთხე ეწოდება.

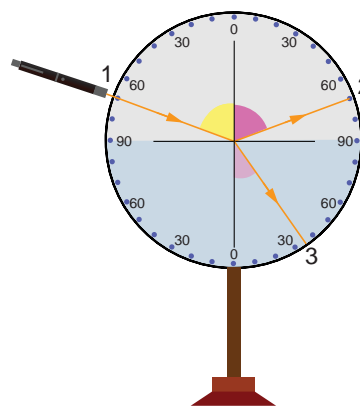
თანდათან გავზარდოთ დაცემის კუთხე (სურ. 3.46). გარდატეხის კუთხეც გაიზარდება, მაგრამ ის კვლავ დაცემის კუთხეზე ნაკლები იქნება. აღსანიშნავია, რომ ამ დროს დაცემისა და გარდატეხის კუთხეთა თანაფარდობა მუდმივი არ რჩება.



სურ. 3.44



სურ. 3.45



სურ. 3.46

თუ მინას შევცვლით წყლით (სინათლის გავრცელების სიჩქარე წყალში 225341 კმ/წმ-ია) და ცდას იმავე დაცემის კუთხეებისთვის გავიმეორებთ, დავინახავთ, რომ გარდატეხის γ კუთხე მცირედით მეტი იქნება, ვიდრე მინის შემთხვევაში, მაგრამ მაინც დაცემის კუთხეზე ნაკლები (სურ. 3.47).

სინათლის გარდატეხის მოვლენა გამოწვეულია ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლისას სინათლის ტალღის სიგრძისა და, შესაბამისად, სიჩქარის ცვლილებით.

მოცემული ორი გარემოდან ოპტიკურად ნაკლებად მკვრივს უწოდებენ იმ გარემოს, რომელშიც სინათლის სიჩქარე უფრო მეტია. ჰაერის ოპტიკური სიმკვრივე (სინათლის სიჩქარე – 299704 კმ/წმ), უფრო ნაკლებია, ვიდრე წყლის (სინათლის სიჩქარე – 225000 კმ/წმ), ხოლო წყლისა – უფრო ნაკლები, ვიდრე მინის (სინათლის სიჩქარე – 200000 კმ/წმ). ჩატარებული ცდებიდან ჩანს, რომ სინათლის სხივის გადასვლისას ოპტიკურად ნაკლებად მკვრივი გარემოდან მეტად მკვრივ გარემოში, გარდატეხის კუთხე ნაკლებია დაცემის კუთხეზე. ამასთან, ოპტიკურად რაც უფრო მეტად მკვრივ გარემოში გადადის სინათლე, მით მეტად იცვლება მისი მიმართულება.

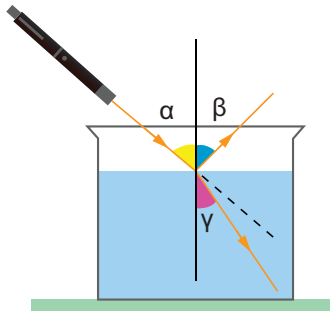
მაშასადამე, **სინათლის გადასვლისას ოპტიკურად ნაკლებად მკვრივი გარემოდან მეტად მკვრივ გარემოში, გარდატეხის კუთხე ნაკლებია დაცემის კუთხეზე.**

თუ სხივის მიმართულებას შევაბრუნებთ, ანუ განვიხილავთ შემთხვევას, როცა სინათლე ოპტიკურად მეტად მკვრივი გარემოდან ნაკლებად მკვრივ გარემოში გადადის (სურ. 3.48), დავინახავთ, რომ გარდატეხის კუთხე დაცემის კუთხეზე მეტი იქნება.

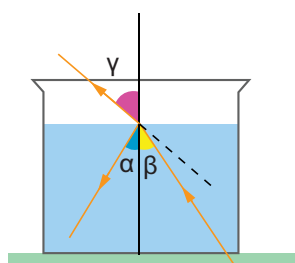
ამრიგად, **სინათლის გადასვლისას ოპტიკურად მეტად მკვრივი გარემოდან ნაკლებად მკვრივ გარემოში, გარდატეხის კუთხე მეტია დაცემის კუთხეზე.**

ეს დასკვნა გამომდინარეობს სხივთა შექცევადობის თვისებიდანაც, რომელიც მართებულია არა მარტო დაცემული და არეკლილი, არამედ დაცემული და გარდატეხილი სხივებისთვისაც.

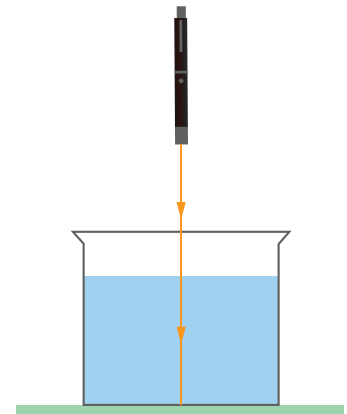
ცდა გვიჩვენებს, როდესაც სინათლე ორი გარემოს გამყოფ ზედაპირს მართობულად ეცემა ($\alpha = 0^\circ$), ის არ გარდატეხდება (სურ. 3.49).



სურ. 3.47



სურ. 3.48



სურ. 3.49

ოპტიკურ დისკოზე ჩანს როგორც დაცემული სხივი, ასევე გარდატეხილი სხივი, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ორივე სხივი დისკოს სიბრტყეშია განთავსებული.

სინათლის გარდატეხის მოვლენა რაოდენობრივად პირველად ჰოლანდიელმა ფიზიკოსმა ვილბრორდ სნელიუსმა შეისწავლა. მან დაადგინა, რომ დაცემის კუთხის სინუსის შეფარდება გარდატეხის კუთხის სინუსთან მოცემული ორი გარემოსათვის მუდმივი სიდიდეა. ამ შეფარდებას უწოდებენ **მეორე გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელს პირველი გარემოს მიმართ, ან ფარდობით გარდატეხის მაჩვენებელს** და აღნიშნავენ n_{21} -ით.

დაცემული სხივი, გარდატეხილი სხივი და დაცემის წერტილში ორი გარემოს გამყოფი ზედაპირისადმი გავლებული მართობი ერთ სიბრტყეში მდებარეობს; დაცემის კუთხის სინუსის შეფარდება გარდატეხის კუთხის სინუსთან მოცემული ორი გარემოსათვის მუდმივი სიდიდეა და არ არის დამოკიდებული დაცემის კუთხეზე:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} = \text{const.}$$

სინათლის შექცევადობის თვისებიდან გამომდინარეობს, რომ პირველი გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელი მეორის მიმართ და მეორე გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელი პირველის მიმართ ურთიერთშებრუნებული რიცხვებია:

$$n_{21} = \frac{1}{n_{12}}.$$

ფარდობითი გარდატეხის მაჩვენებელი დამოკიდებულია ორივე გარემოს ოპტიკურ თვისებებზე და სინათლის ფერზე. გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელს ვაკუუმის მიმართ, ამ გარემოს **აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი** ეწოდება.

თუ პირველი გარემოს აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელია n_1 , მეორე გარემოსი კი – n_2 , ადვილად დავრწმუნდებით, რომ მეორე გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელი პირველის მიმართ ტოლი იქნება:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

ამ დამოკიდებულების სისწორეში დასარწმუნებლად განვიხილოთ სხივის გადასვლა პირველი გარემოდან მეორეში ვაკუუმის გავლით (სურ. 3.50). პირველი გარემოდან ვაკუუმში გადასვლისას შეგვიძლია დავწეროთ:

$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{1}{n_1}$, რომელშიც α პირველ გარემოში სხივის დაცემის კუთხეა, ხოლო β – სხივის გარდატეხის კუთხე ვაკუუმში.

როდესაც გარემოთა საზღვარი ვაკუუმთან ერთმანეთის პარალელური სიბრტყეებია, მაშინ ვაკუუმიდან მეორე გარემოში გადასვლისას სხივის დაცემის კუთხე β -ს ტოლია. თუ მეორე გარემოში სხივის გარდატეხის კუთხეს γ -თი აღვნიშნავთ, მაშინ $\frac{\sin \beta}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{1}$.

უკანასკნელი ორი ფორმულის ერთმანეთზე გაყოფით მივიღებთ:

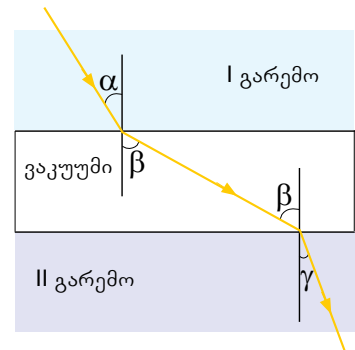
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}.$$

ცხრილში მოცემულია ზოგიერთი გარემოს აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი:



ვილბროდ სნელიუსი
1580-1626

აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი

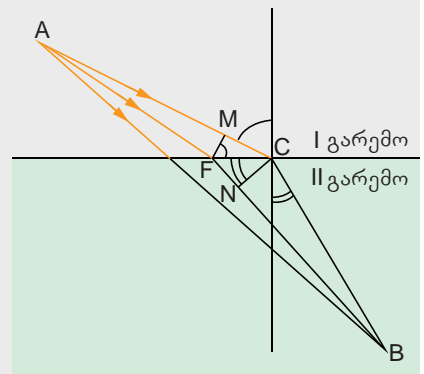


სურ. 3.50

გარემო	გარდატეხის მაჩვენებელი	გარემო	გარდატეხის მაჩვენებელი
ჰაერი (ნორ. პირობები)	1,0002926	კვარცი	1,544
წყალი	1,332986	ცინაბარი	3,02
გლიცერინი	1,4729	ტოპაზი	1,63
ბენზოლი	1,5	ყინული	1,31
ორგანული მინა	1,51	ზეითუნის ზეთი	1,46
ფიანიტი	2,15–2,18	შაქარი	1,56
სილიციუმი	4,01	ეთილის სპირტი	1,36
ალმასი	2,419	მიკა	1,56-1,6

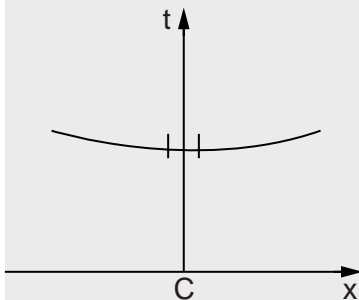
სინათლის გარდატეხის კანონი შეგვიძლია ფერმას პრინციპის გამოყენებითაც მივიღოთ.

ვთქვათ, სინათლე A წერტილიდან ორი გარემოს გამყოფ ზედაპირს ეცემა და გარდატეხის შემდეგ B წერტილში ხვდება (სურ. 3.51). თუ სინათლის სიჩქარე პირველ და მეორე გარემოში განსხვავებულია, მაშინ ცხადია, რომ სხივი A -დან B წერტილში მინიმალურ დროში AB მონაკვეთის გავლით ვერ მივა. თუ $v_1 > v_2$, რომელი გზის გავლას მოანდომებს სხივი მინიმალურ დროს?



სურ. 3.51

დავუშვათ, სინათლე უმცირეს დროს ანდომებს, იმ გზის გავლას, რომელიც C წერტილზე გადის. შესაბამისად, ნებისმიერი სხვა გზით, C წერტილის მარცხნივ ან მარჯვნივ გავლისას სინათლე მეტ დროს მოანდომებს. სხივის ასეთი ნებისმიერი AFB ტრაექტორიის სიგრძე შეიძლება განვსაზღვროთ x ცვლადით, რომელიც წარმოადგენს მანძილს გამყოფ საზღვარზე მდებარე C და F წერტილებს შორის.



სურ. 3.52

სინათლის გავრცელების დროის x -ზე დამოკიდებულების მრუდს მინიმუმი C წერტილში უნდა გააჩნდეს, ანუ $x=0$ მნიშვნელობისათვის (სურ. 3.52). ამ მნიშვნელობასთან ახლოს x -ის ცვლილებით დრო მცირედ იცვლება. შესაბამისად, x -ის ძალიან მცირე მნიშვნელობებისთვის დრო შეიძლება მიახლოებით უცვლელად მივიჩნიოთ: $x=0$ -ის მახლობლად, ძალიან მცირე უბანზე მრუდი შეიძლება x ღერძის პარალელური ძალიან პატარა მონაკვეთით შევცვალოთ.

შევადაროთ ერთმანეთს ACB და AFB გზებზე სინათლის გავრცელების დროები. გავითვალისწინოთ, რომ $x = FC$ ძალიან მცირეა. გავავლოთ $FM \perp AC$ და $CN \perp FB$ მონაკვეთები. ACB გზაზე სინათლე პირველ გარემოში გადის MC მანძილით მეტს, ვიდრე AFB (რადგან FC ძალიან მცირეა, ამიტომ $AF \approx AM$). მეორე გარემოში კი სხივი AFB ტრაექტორიით FN მანძილით მეტს გადის, ვიდრე ACB ტრაექტორიით. რადგან A -დან B წერტილში სინათლის გავრცელების დრო x -ის ძალიან მცირე მნიშვნელობებისთვის მუდმივი უნდა იყოს, ამიტომ სინათლის მიერ MC და FN მანძილების გავლის დროებიც ერთნაირი უნდა იყოს, ანუ:

$$\frac{MC}{v_1} = \frac{FN}{v_2}$$

$\angle CFM$ დაცემის α კუთხის ტოლია, ხოლო $\angle FCN$ – გარდატეხის γ კუთხის, როგორც ურთიერთმართობულ გვერდებიანი კუთხეები. ამიტომ $MC = x \sin \alpha$, და $FN = x \sin \gamma$. შესაბამისად, მივიღებთ:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = \text{const.}$$

თუ სიჩქარეთა ფარდობას აღვნიშნავთ n_{21} -ით, გვექნება

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

იმ შემთხვევაში, როდესაც სინათლე ვაკუუმიდან n აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებლის მქონე გარემოში გადადის, $v_1 = c$, $n_1 = 1$, $n_2 = n$ და გარემოში

სინათლის სიჩქარეს v -თი აღვნიშნავთ, მივიღებთ: $n = \frac{c}{v}$.

ამრიგად გარემოს გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი გვიჩვენებს, რამდენჯერ ნაკლებია ამ გარემოში სინათლის გავრცელების სიჩქარე, ვიდრე – ვაკუუმში.

შემდეგ პარაგრაფებში განვიხილავთ სინათლის გარდატეხის მაგალითებს ბუნებასა და ყოფა-ცხოვრებაში.

დასკვნები:

- ორი გარემოს გამყოფი ზედაპირის გავლისას სინათლის გავრცელების მიმართულების ცვლილებას სინათლის გარდატეხა ეწოდება;
- სინათლის სხივის გადასვლისას ოპტიკურად ნაკლებად მკვრივი გარემოდან მეტად მკვრივ გარემოში, გარდატეხის კუთხე ნაკლებია დაცემის კუთხეზე;
- სინათლის სხივის გადასვლისას ოპტიკურად მეტად მკვრივი გარემოდან ნაკლებად მკვრივ გარემოში, გარდატეხის კუთხე მეტია დაცემის კუთხეზე;
- დაცემული სხივი, გარდატეხილი სხივი და დაცემის წერტილში ორი გარემოს გამყოფი ზედაპირისადმი გავლებული მართობი ერთ სიბრტყეში მდებარეობს; დაცემის კუთხის სინუსის შეფარდება გარდატეხის კუთხის სინუსთან მოცემული ორი გარემოსათვის მუდმივი სიდიდეა და მას ეწოდება მეორე გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელი პირველი გარემოს მიმართ: $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} = \text{const}$;
- გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელს ვაკუუმის მიმართ, აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი ეწოდება;
- ორი გარემოს ფარდობითი გარდატეხის მაჩვენებელი მათ აბსოლუტურ გარდატეხის მაჩვენებლებსა და სინათლის გავრცელების სიჩქარეებთან დაკავშირებულია ფორმულით: $n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$;
- გარემოს გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი გვიჩვენებს, რამდენჯერ ნაკლებია ამ გარემოში სინათლის გავრცელების სიჩქარე, ვიდრე – ვაკუუმში:

$$n = \frac{c}{v}.$$

საკონტროლო კითხვები:

1. რას ეწოდება გარდატეხის კუთხე?
2. რას ნიშნავს დაცემული და გარდატეხილი სხივების შექცევადობა?
3. რა შემთხვევაშია სინათლის დაცემის და გარდატეხის კუთხეები ტოლი?
4. რაზეა დამოკიდებული ფარდობითი გარდატეხის მაჩვენებელი?
5. რისი ტოლია კვარცის გარდატეხის მაჩვენებელი წყლის მიმართ? წყლის გარდატეხის მაჩვენებელი კვარცის მიმართ?
6. სინათლის გარდატეხისას ორ წერტილს შორის უმცირესი მანძილის გავლას რატომ არ შეესაბამება უმცირესი დრო?
7. როგორ იცვლება სინათლის სიჩქარე წყლიდან კვარცში გადასვლისას?

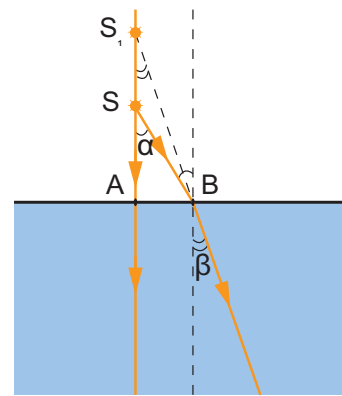


ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

წყლის ზედაპირიდან რა სიმაღლეზე დაინახავს წყალში მყოფი დამკვირვებელი ნათურას, რომელიც ზუსტად დამკვირვებლის ზევით, წყლის ზედაპირიდან 2,1 მ სიმაღლეზე ჰკიდია?

მოცემულია: $AS = 2,1$ მ; $\frac{n_2}{n_1} = \frac{4}{3}$; $AS_1 = ?$

ამოხსნა: დამკვირვებელი საგანს აღიქვამს იქ, სადაც მის თვალზე დაცემული სხივების გაგრძელებები იკვეთება. განვიხილოთ ნათურადან წამოსული იმ ორი სხივის სვლა, რომლებიც დამკვირვებლის თვალში ხვდება (სურ. 3.53). დამკვირვებელს ნათურა მოეჩვენება S_1 წერტილში. ვინაიდან დამკვირვებლის თვალში მოხვედრილი სხივები ერთმანეთთან ძალიან ახლოსაა განლაგებული, ნახაზზე მონიშნული კუთხეები მცირეა და მართებულია მიახლოებითი ტოლობები: $tg\alpha \approx \sin\alpha$, $tg\beta \approx \sin\beta$. შესაბამისად, გარდატეხის მეორე კანონი შეგვიძლია ჩავწეროთ შემდეგი სა-



სურ. 3.53

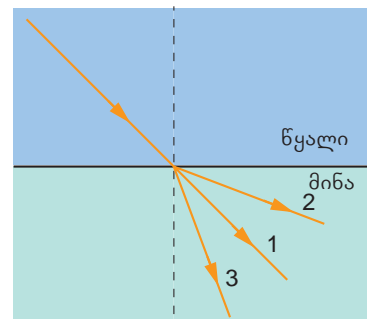
ხით: $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{tg\alpha}{tg\beta} = \frac{n_2}{n_1}$. ვინაიდან $tg\alpha = \frac{AB}{AS}$ და $tg\beta = \frac{AB}{AS_1}$, ვღებულობთ: $\frac{AS_1}{AS} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{4}{3}$, საიდანაც $AS_1 = 2,8$ მ.

პასუხი: წყალში მყოფი დამკვირვებელი ნათურას წყლის ზედაპირიდან 2,8 მ სიმაღლეზე დაინახავს.



ამოხსენით ამოცანები:

1. განსაზღვრეთ იმ გარემოს აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი, რომელიც სინათლე $15 \cdot 10^7$ მ/წმ სიჩქარით ვრცელდება. მიიჩნიეთ, რომ სინათლის გავრცელების სიჩქარე ვაკუუმში $3 \cdot 10^8$ მ/წმ-ის ტოლია.
2. რამდენჯერ შეიცვლება სინათლის გავრცელების სიჩქარე 1,3-ის ტოლი აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებლის მქონე გარემოდან 2,86-ის ტოლი აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებლის მქონე გარემოში გადასვლისას?
3. რისი ტოლია პირველი გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელი მეორის მიმართ, თუ სინათლის სხივის დაცემის კუთხე 60° -ია, გარდატეხისა კი 45° ?
4. ჰაერიდან წყალში გადასვლისას სინათლის სხივის გარდატეხის კუთხე 30° -ის ტოლია. განსაზღვრეთ სხივის დაცემის კუთხის სინუსი.
5. ყინულიდან წყალში გადასვლისას სინათლის სხივის დაცემის კუთხის სინუსი მიახლოებით $0,72$ -ის ტოლია. განსაზღვრეთ სხივის გარდატეხის კუთხე.
6. სურ. 3.54-ზე მოცემული პირობების გათვალისწინებით, მოყვანილთაგან, რომელი მიმართულებით შეიძლება გავრცელდეს გარდატეხილი სხივი? პასუხი დაასაბუთეთ.
7. 2 მ სიღრმის ტბაში ვერტიკალურად დგას ბოძი, რომელიც წყლის ზედაპირიდან 1 მ-ზეა ამოშვერილი. იპოვეთ ბოძის ჩრდილის სიგრძე წყლის ზედაპირსა და ტბის ფსკერზე, თუ მზის სიმაღლე 30° -ია. ტბის ფსკერი ჰორიზონტალურად მიიჩნიეთ.
8. ალმასის ზედაპირს ჰაერიდან ეცემა სინათლის ვიწრო კონა. ზედაპირიდან არეკლილ და ალმასში გარდატეხილ სხივებს შორის კუთხე 90° -ია. იპოვეთ ზედაპირზე სხივის დაცემის კუთხე.
9. წყლის ზედაპირზე სხივის დაცემის კუთხე 45° -ია. ჰორიზონტისადმი რა კუთხით უნდა მოვათავსოთ წყალში ბრტყელი სარკე, რომ მისგან არეკლილი სხივი წყლიდან ვერტიკალურად გამოვიდეს?
10. წყლის სიღრმე აუზში 160 სმ-ია. რა სიღრმის მოეჩვენება ეს წყალი დამკვირვებელს, რომელიც აუზის წყალს ვერტიკალურად დასცქერის?



სურ. 3.54

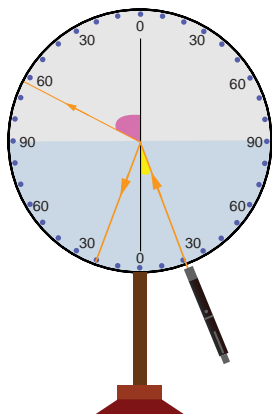
§ 3.6 სრული შინაგანი არეკვლა

რატომ ბრწყინავს ნამის წვეთები მზის შუქზე (სურ. 3.55 ა)? რატომ „თამაშობს“ სინათლე ძვირფას ქვაში (სურ. 3.55 ბ)? რატომ გვეჩვენება წყლის ზედაპირი სარკული, როცა მას ქვევიდან გარკვეული კუთხით ვუყურებთ (სურ. 3.55 გ)?

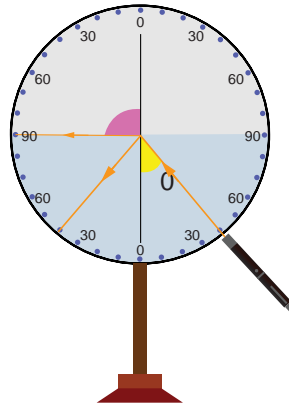


სურ. 3.55

გავიხსენოთ წინა პარაგრაფის ცდა ოპტიკური დისკოთი, როდესაც ვაკვირდებოდით სინათლის გადასვლას ოპტიკურად მეტად მკვრივი გარემოდან ოპტიკურად ნაკლებად მკვრივ გარემოში. ამისათვის ოპტიკურ დისკოზე დამაგრებული გვექონდა მინის ნახევარდისკო და სხივს ნახევარდისკოს რადიუსის გასწვრივ დისკოს ცენტრისაკენ მივმართავდით. მინა-ჰაერის საზღვარზე სინათლის ნაწილი აირეკლება, ხოლო ნაწილი ჰაერში გადავა და იცვლის მიმართულებას. ამ შემთხვევაში გარდატეხის კუთხე მეტია დაცემის კუთხეზე (სურ. 3.56 ა). თუ დაცემის კუთხეს თანდათან გავზრდით, გაიზრდება არეკვლის კუთხეც და გარდატეხის კუთხეც. ამასთან, გარდატეხის კუთხე უფრო სწრაფად გაიზრდება, ვიდრე არეკვლის კუთხე. ასევე შევამჩნიეთ, რომ დაცემის კუთხის ზრდისას არეკლილი კონის სიმკვეთრე, ანუ სინათლის ენერგია (ინტენსივობა) მატულობს, ხოლო გარდატეხილი სინათლის კონისა იკლებს – ის უფრო ბაცი ხდება. გარდატეხილი კონის ენერგია განსაკუთრებით სწრაფად მცირდება, როდესაც გარდატეხის კუთხე 90° -ს უახლოვდება. დაცემის კუთხის გარკვეული მნიშვნელობისათვის გარდატეხილი სინათლის კონა მინა – ჰაერის გამყოფ ზედაპირს გაყვება (სურ. 3.56 ბ). დაცემის კუთხე, რომელიც გარდატეხის კუთხის უდიდეს შესაძლო მნიშვნელობას ($\gamma = 90^\circ$) შეესაბამება, აღვნიშნოთ α_0 -ით. თუ დაცემის კუთხის ზრდას გავაგრძელებთ ($\alpha > \alpha_0$), დავინახავთ, რომ გარდატეხილი სინათლის კონა საერთოდ გაქრება და მთელი სინათლე ისევ პირველ გარემოში აირეკლება. ამ მოვლენას **სინათლის სრული შინაგანი არეკვლა** ეწოდება.



სურ. 3.56 ა

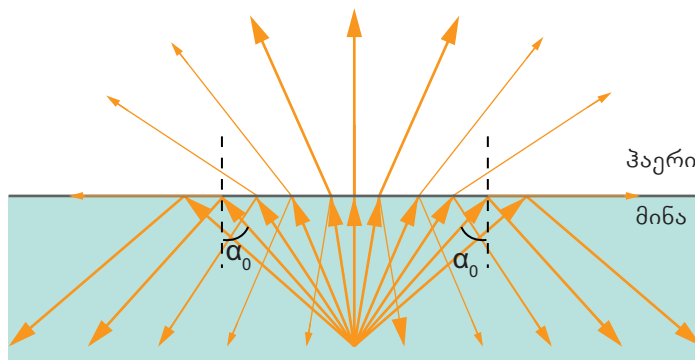


სურ. 3.56 ბ

დაცემის უმცირეს α_0 კუთხეს, რომლისთვისაც ადგილი აქვს სრულ შინაგან არეკვლას, სრული შინაგანი არეკვლის ზღვრული კუთხე ეწოდება.

სრული შინაგანი არეკვლა დაიმზირება მაშინ, როდესაც სინათლე ოპტიკურად უფრო მკვრივი გარემოდან ნაკლებად მკვრივი გარემოს საზღვარს სრული შინაგანი არეკვლის ზღვრულ კუთხეზე მეტი კუთხით ეცემა.

აღსანიშნავია, რომ α_0 კუთხის მიღწევისას გარდატეხილი კონა ნახტომისებრად არ გადადის არეკლილში: დაცემის კუთხის α_0 -თან მიახლოებისას გარდატეხილი სინათლის კონის ინტენსივობა უწყვეტად კლებულობს და ბოლოს, ნულის ტოლი ხდება. არეკლილი სხივისა კი პირიქით, უწყვეტად იზრდება და ბოლოს დაცემული სინათლის ინტენსივობას უტოლდება (სურ. 3.57).



სურ. 3.57


თუ n_1 არის იმ გარემოს აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი, საიდანაც სინათლე გადადის, ხოლო n_2 – იმ გარემოსი, რომელშიც გადადის ($n_1 > n_2$), მაშინ გარდატეხის კანონის თანახმად:

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = n_{21}, \text{ ანუ } \sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1},$$

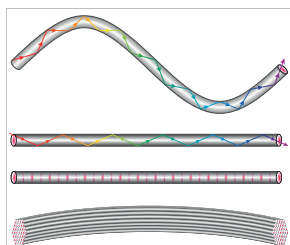
საიდანაც

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{n_2}{n_1}.$$

მაგალითად, წყალი-ჰაერისათვის, სრული შინაგანი არეკვლის ზღვრული კუთხე $\alpha_0 = 48^\circ 35'$, მინა-ჰაერისათვის $\alpha_0 = 41^\circ 50'$, ალმასი-ჰაერისათვის $\alpha_0 = 24^\circ 40'$.

 დაფიქრდით, რა მოვლენა უდევს საფუძვლად პარაგრაფის დასაწყისში ჩამოთვლილ მაგალითებს? შეეცადეთ ახსნათ ისინი.

სრული შინაგანი არეკვლის მოვლენა გამოიყენება ბოჭკოვან ოპტიკაში, შუქგამტარების საშუალებით სინათლის, გამოსახულებისა და ინფორმაციის გადასაცემად. შუქგამტარი წარმოადგენს ცილინდრული ფორმის წვრილ მოქნილ ბოჭკოს. ის დამზადებულია კვარცის მინისაგან, რომელიც გერმანიუმის ან ბორის დანამატებს შეიცავს. მისი სიგანე 100 მკმ-დან 1 მკმ-მდე ფარგლებში იცვლება. ბოჭკოს კედლებზე მრავალჯერადი სრული შინაგანი არეკვლის შედეგად სინათლე შეიძლება მივმართოთ როგორც წრფივი, ასევე მრუდწირული ტრაექტორიით (სურ. 3.58). ბოჭკოებისაგან



სურ. 3.58



სურ. 3.59



სურ. 3.60

კრავენ კონებს, რომლებშიც შეიძლება მილიონამდე ბოჭკო იყოს გაერთიანებული (სურ. 3.59). ბოჭკოვანი ხაზები შეიძლება ასეულ კილომეტრზე იყოს გადაჭიმული. ასეთ კაბელებს ერთდროულად გაცილებით მეტი ინფორმაციის გატარება შეუძლია, ვიდრე – ჩვეულებრივს. ამის გამო მათ ფართოდ იყენებენ კომპიუტერულ ტექნიკაში, ინტერნეტის ქსელების ორგანიზებისას და სხვა. თანამედროვე მედიცინა შინაგანი ორგანოების დათვალიერების, მკურნალობის და ოპერატიული ჩარევებისას იყენებს ენდოსკოპიურ მეთოდს, სადაც მოქნილი შუქგამტარის საშუალებით სინათლე ჩვეულებრივ მიუწვდომელ ორგანოებამდე აღწევს (სურ. 3.60).



<http://tiny.cc/2o87vz>



<http://tiny.cc/9o87vz>

დასკვნები:

- მოვლენას, როდესაც ორი გარემოს გამყოფ საზღვარზე სინათლე მეორე გარემოში არ გადადის და იმავე გარემოში აირეკლება, სრული შინაგანი არეკვლა ეწოდება;
- დაცემის უმცირეს α_0 კუთხეს, რომლისთვისაც ადგილი აქვს სრულ შინაგან არეკვლას, სრული შინაგანი არეკვლის ზღვრული კუთხე ეწოდება;
- სრული შინაგანი არეკვლა დაიმზირება მაშინ, როდესაც სინათლე ოპტიკურად უფრო მკვრივი გარემოდან ნაკლებად მკვრივი გარემოს საზღვარს სრული შინაგანი არეკვლის ზღვრულ კუთხეზე მეტი კუთხით ეცემა;
- სრული შინაგანი არეკვლის ზღვრული კუთხე განისაზღვრება ფორმულიდან:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}, \text{ რომელშიც } n_1 > n_2.$$

საკონტროლო კითხვები:

1. სინათლის გადასვლისას ოპტიკურად მეტად მკვრივი გარემოდან ნაკლებად მკვრივში, როგორ იცვლება გარდატეხის კუთხე და გარდატეხილი სინათლის ენერჯია (ინტენსივობა), როდესაც დაცემის კუთხე მატულობს?
2. სხივის დაცემის α_0 კუთხეს გარდატეხის რა კუთხე შეესაბამება?
3. რა შემთხვევაში გადაიქცევა ორი გარემოს გამყოფი საზღვარი სარკედ?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

საცურაო აუზში ვარჯიშისას სპორტსმენს 3 მ სიღრმის წყალში ჩაუვარდა სამაჯური. რა მანძილით უნდა დაშორდეს სპორტსმენი სამაჯურის ჩავარდნის ადგილს, რომ წყლის ზემოდან ველარ შეძლოს აუზის ფსკერზე დავარდნილი სამაჯურის დანახვა?

მოცემულია: $h=3$ მ; $\frac{n_2}{n_1} = \frac{3}{4}$;

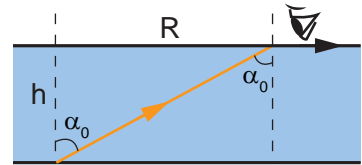
$R=?$

ამოხსნა: თავდაპირველად დავადგინოთ სრული შინაგანი არეკვლის ზღვრული კუთხის სინუსი სინათლის წყლიდან ჰაერში გადასვლისას: $\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} = \frac{3}{4}$. ახლა ვიპოვოთ

წყლის ზედაპირზე იმ წრის რადიუსი, რომლის ფარგლებშიც ჰაერში გამოვლენ სამაჯურიდან გავრცელებული სინათლის სხივები (სურ. 3.61).

$$R = \operatorname{tg} \alpha_0 \cdot h, \text{ თავის მხრივ } \operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{\sin \alpha_0}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_0}} \approx 1,15, \text{ ამიტომ}$$

$$R = 3,45 \text{ მ.}$$



სურ. 3.61

პასუხი: სპორტსმენი სამაჯურის ჩავარდნის ადგილს უნდა დაშორდეს 3,45 მ-ით.



ამოხსენით ამოცანები:

1. სურ. 3.62-ის მიხედვით, რომელი გარემოა ოპტიკურად მეტად მკვრივი? პასუხი დაასაბუთეთ.

2. სინათლე გადადის წყლიდან ჰაერში. განსაზღვრეთ გარდატეხის კუთხე, თუ დაცემის კუთხე 40° -ია.

3. სინათლის მინიდან წყალში გადასვლისას გარდატეხის კუთხე 55° -ია. განსაზღვრეთ დაცემის კუთხე.

4. როდესაც უცნობი გამჭვირვალე სითხიდან სინათლის სხივი ჰაერთან საზღვარს 45° -იანი კუთხით ეცემა, გარდატეხილი სხივი სითხის ზედაპირს მიყვება. იპოვეთ ამ სითხის აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი.

5. განსაზღვრეთ სრული შინაგანი არეკვლის ზღვრული კუთხის სინუსი ყინული-ჰაერის საზღვრისათვის.

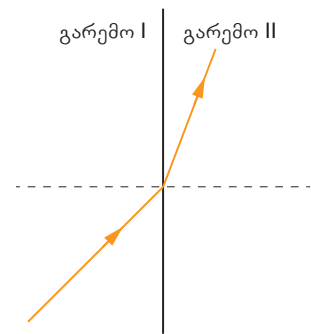
6. განსაზღვრეთ სრული შინაგანი არეკვლის ზღვრული კუთხე ტოპაზი-ჰაერის საზღვრისათვის.

7. სინათლის ნერტილოვანი წყარო წყალში 120 სმ სიღრმეზეა მოთავსებული. გამოთვალეთ წყლის ზედაპირზე იმ წრის რადიუსი, რომლის ფარგლებშიც სინათლე წყლიდან ჰაერში გადადის.

8. სინათლის ნერტილოვანი წყარო 1,8 აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებლის მქონე სითხეშია მოთავსებული. როდესაც სითხის ზედაპირს წყაროს მოპირდაპირედ ჰაერიდან დავცქერით, მასზე 2 მ რადიუსის განათებული წრე ჩანს. სითხის ზედაპირიდან რა სიღრმეზეა სინათლის წყარო?

9. ჰაერიდან სინათლე ალმასის ბირთვის ზედაპირს 60° -იანი კუთხით ეცემა. გამოვა თუ არა სინათლე ბირთვიდან ჰაერში? პასუხი დაასაბუთეთ.

10. მინის თხელკედლიანი ცილინდრული ჭიქა სავსეა გამჭვირვალე სითხით, რომლის აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი 1,7-ის ტოლია. ჭიქა დადგეს მონეტაზე. დაამტკიცეთ, რომ ჭიქის კედლიდან მონეტის დანახვა შეუძლებელია (მინაში სინათლის სხივის გარდატეხას მხედველობაში ნუ მიიღებთ).

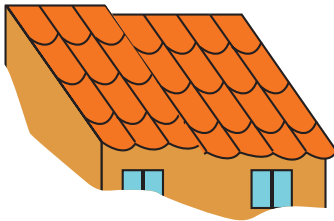


სურ. 3.62

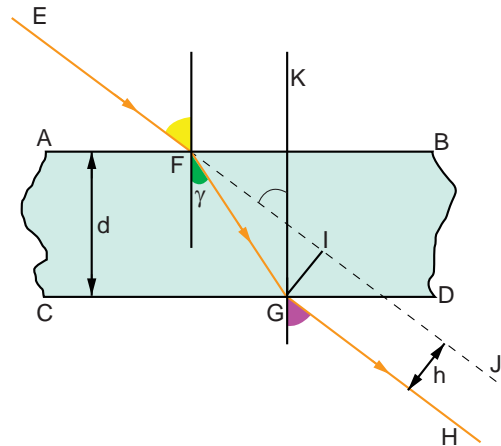
§ 3.7 სინათლის გარდატეხა ბრტყელპარალელურ ფირფიტასა და სამკუთხა პრიზმაში

თუ ერთ თვალზე საკმარისად სქელ მინას ავიფარებთ და სახლის სწორ სახურავს ისე შევხედავთ, ის გადატეხილი მოგვეჩვენება (სურ. 3.63). რატომ?

სურ. 3.64-ზე ნაჩვენებია გამჭირვალე ფირფიტა, რომლის AB და CD წახნაგები პარალელურია. ვთქვათ, n იმ მასალის აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელია, რომლისგანაც ფირფიტაა დამზადებული. დავუშვათ, EF სხივი ჰაერიდან ფირფიტის AB წახნაგს α_1 კუთხით F წერტილში ეცემა და γ_1 კუთხით გარდატყდება.



სურ. 3.63



სურ. 3.64

სინათლის გარდატეხის კანონის თანახმად,

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = n \quad (1)$$

ფირფიტაში გარდატეხილი სხივი კი CD წახნაგს G წერტილში α_2 კუთხით ეცემა და γ_2 კუთხით ჰაერში გარდატყდება. ამ შემთხვევაში გვექნება:

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2} = \frac{1}{n} \quad (2)$$

ამ ტოლობების ერთმანეთზე გამრავლებით მივიღებთ: $\frac{\sin \alpha_1 \sin \alpha_2}{\sin \gamma_1 \sin \gamma_2} = 1$.

ვინაიდან γ_1 და α_2 , პარალელურ წრფეებს შორის მოთავსებული შიგა ჯვარედინად მდებარე კუთხეებია, $\gamma_1 = \alpha_2$, ამიტომ

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_2} = 1,$$

საიდანაც $\sin \alpha_1 = \sin \gamma_2$ და $\alpha_1 = \gamma_2$. მაგრამ $\alpha_1 = \beta$. შესაბამისად, $\gamma_2 = \beta$, რაც ნიშნავს იმას, რომ EJ და GH წრფეები ერთმანეთის პარალელურია: EJ || GH.

ამრიგად, სინათლის სხივი ბრტყელპარალელური ფირფიტის გავლისას მიმართულებას არ იცვლის, ის მხოლოდ წაინაცვლებს. დაცემული სხივის გაგრძელებასა და ფირფიტიდან გამოსულ სხივს შორის GI მანძილს სხივის წაინაცვლებას უწოდებენ.

ვიპოვოთ GI = h წაინაცვლების n გარდატეხის მაჩვენებელზე, α_1 დაცემის კუთხეზე და ფირფიტის d სისქეზე დამოკიდებულება.

ΔFGI -დან

$$h = FG \sin(\alpha_1 - \gamma_1).$$

რადგან

$$FG = \frac{d}{\cos\gamma_1},$$

ამიტომ

$$h = \frac{d \sin(\alpha_1 - \gamma_1)}{\cos\gamma_1}.$$

თუ ამ გამოსახულებაში ტრიგონომეტრიულ გარდაქმნას შევასრულებთ და (1) ფორმულას გავითვალისწინებთ, მივიღებთ:

$$\frac{\sin(\alpha_1 - \gamma_1)}{\cos\gamma_1} = \frac{\sin\alpha_1 \cos\gamma_1 - \cos\alpha_1 \sin\gamma_1}{\cos\gamma_1} = \sin\alpha_1 \cdot \left(1 - \frac{1 \cos\alpha_1}{n \cos\gamma_1}\right).$$

ამიტომ

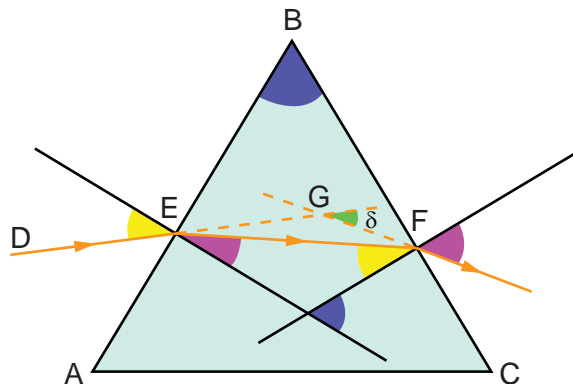
$$h = d \sin\alpha_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{n} \sqrt{\frac{1 - \sin^2\alpha_1}{1 - \sin^2\gamma_1}}\right) = d \sin\alpha_1 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2\alpha_1}{n^2 - \sin^2\alpha_1}}\right).$$

ამრიგად, რაც მეტია ფირფიტის სისქე, დაცემის კუთხე და ფირფიტის მასალის გარდატეხის მაჩვენებელი, მით მეტი იქნება სხივის ნანაცვლება.

შესაბამისად, რაც უფრო სქელ მინას გამოიყენებთ პარაგრაფის დასაწყისში მოყვანილ მაგალითში, მით მეტად გადატეხილი მოგვეჩვენება სწორი სახურავი.

ოპტიკურ ხელსაწყოებში ხშირად გამოიყენება მინის ან სხვა გამჭვირვალე ნივთიერებისაგან დამზადებული სამკუთხა პრიზმა. განვიხილოთ სხივთა სვლის ერთი შემთხვევა ასეთ პრიზმაში.

დავუშვათ, ჰაერიდან მინის პრიზმის AB ნახნაგს DE სხივი ეცემა (სურ. 3.65). E წერტილში ის გარდატეხდება და რადგან სინათლე ოპტიკურად ნაკლებად მკვრივი გარემოდან მეტად მკვრივ გარემოში გადადის, გარდატეხის β_1 კუთხე დაცემის α_1 კუთხეზე ნაკლები იქნება. BC ნახნაგზე F წერტილში სხივი კიდევ ერთხელ გარდატეხდება, მაგრამ ამჯერად გარდატეხის β_2 კუთხე დაცემის α_2 კუთხეზე მეტი იქნება (თუ დაცემის α_2 კუთხე ზღვრულ კუთხეზე მეტი აღმოჩნდება, მაშინ ადგილი ექნება სრულ შინაგან არეკვლას და სხივი BC ნახნაგზე არ გარდატეხდება). ორივე გარდატეხისას, სინათლე ერთ მხარეს გადაიხრება. პრიზმაზე დაცემულ და მისგან გამოსულ სხივებს შორის δ კუთხეს, სხივის გადახრის კუთხე ეწოდება. პრიზმის ნახნაგებს, რომლებზეც სინათლე გარდატეხდება, გარდამტეხ ნახნაგებს უწოდებენ, მესამე ნახნაგს კი – პრიზმის ფუძეს. გარდამტეხ ნახნაგებს შორის ორნახნაგა φ კუთხეს გარდამტეხი კუთხე ეწოდება.



სურ. 3.65

დავადგინოთ სხივის გადახრის კუთხის დამოკიდებულება გარდამტეხ კუთხეზე, პრიზმაზე სხივის დაცემის კუთხეზე და პრიზმის მასალის n გარდატეხის მაჩვენებელზე.

$\triangle EFG$ -სთვის δ გარე კუთხეა, რომელიც მისი არამოსაზღვრე კუთხეების ჯამის ტოლია, ამიტომ

$$\delta = \angle FEG + \angle EFG,$$

ანუ

$$\delta = (\alpha_1 - \beta_1) + (\beta_2 - \alpha_2) = \alpha_1 + \beta_2 - (\beta_1 + \alpha_2).$$

რადგან $\beta_1 + \alpha_2 = \varphi$, ამიტომ

$$\delta = \alpha_1 + \beta_2 - \varphi.$$

AB და BC ნახნაგებზე სინათლის გარდატეხის კანონის გამოვიყენებთ, გვექნება:

$$\sin \alpha_1 = n \sin \beta_1 \text{ და } \sin \beta_2 = n \sin \alpha_2.$$

თუ გვეცოდინება პრიზმის გარდამტეხი კუთხე და გარდატეხის მაჩვენებელი, ბოლო სამი ტოლობის გამოყენებით, შეგვეძლება ნებისმიერი დაცემის კუთხისათვის სხივის გადახრის კუთხის გამოთვლა.

იმ შემთხვევაში, როცა სხივთა სვლა პრიზმაში სიმეტრიულია, ანუ როცა $\alpha_1 = \beta_2$ და $\beta_1 = \alpha_2$, მაშინ $\delta = 2\alpha_1 - \varphi$, ხოლო $\varphi = 2\beta_1$. ამ ტოლობების გათვალისწინებით სინათლის გარდატეხის კანონი AB ნახნაგზე, შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$\sin \frac{\delta + \varphi}{2} = n \sin \frac{\varphi}{2},$$

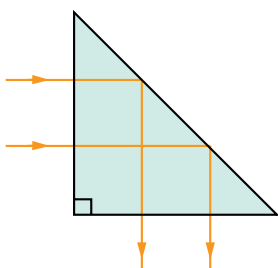
საიდანაც

$$\delta = 2 \arcsin \left(n \sin \frac{\varphi}{2} \right) - \varphi.$$

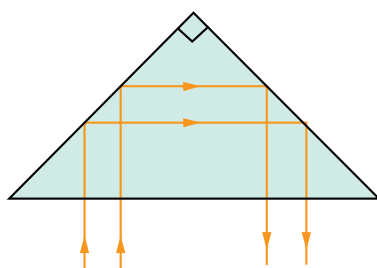
პრიზმაში სხივის სიმეტრიული სვლისას მისი გადახრის კუთხე მინიმალურია.

ფართო გამოყენება აქვს ე.წ. ამრეკლ პრიზმებს, რომლებშიც სინათლე ერთხელ ან რამდენჯერმე სრულ შინაგან არეკვლას განიცდის. განვიხილოთ რამდენიმე შემთხვევა.

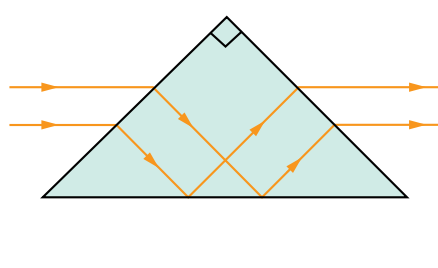
სურ. 3.66-ზე გამოსახული პრიზმა 90° -ით აბრუნებს სინათლის კონას, რაც აუცილებელია, მაგალითად, პერისკოპში. სურ. 3.67-ზე გამოსახული პრიზმა სინათლის კონას აბრუნებს 180° -ით, რაც პრიზმულ დურბინებში გამოიყენება. სურ. 3.68-ზე გამოსახული პრიზმა სინათლის კონას მიმართულებას არ უცვლის, მაგრამ ამოაბრუნებს გამოსახულებას – ზედა სხივები ქვედა სხივებად გადაიქცევა და, პირიქით. ყველა განხილულ შემთხვევაში, სინათლის სხივი პრიზმა-ჭაერის საზღვარს 45° -იანი კუთხით ეცემა, რაც სრულ შინაგან არეკვლას განაპირობებს.



სურ. 3.66



სურ. 3.67



სურ. 3.68

დასკვნები:

- სინათლის სხივი ბრტყელპარალელური ფირფიტის გავლისას მიმართულებას არ იცვლის, ის მხოლოდ წაინაცვლებს;
- რაც მეტია ბრტყელპარალელური ფირფიტის სისქე, დაცემის კუთხე და ფირფიტის მასალის გარდატეხის მაჩვენებელი, მით მეტია სხივის წანაცვლება:

$$h = d \sin \alpha_1 \left(1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \alpha_1}{n^2 - \sin^2 \alpha_1}} \right)$$

- სამკუთხა პრიზმის გარდამტეხი კუთხისა და გარდატეხის მაჩვენებლის საშუალებით, შესაძლებელია, ნებისმიერი დაცემის კუთხისათვის სხივის გადახრის კუთხის გამოთვლა.

საკონტროლო კითხვები:

1. რას უწოდებენ სხივის წანაცვლებას ბრტყელპარალელურ ფირფიტაში?
2. რას უწოდებენ სამკუთხა პრიზმის გარდამტეხ კუთხეს? სხივის გადახრის კუთხეს?
3. რა შემთხვევაში არის სამკუთხა პრიზმაში სხივის გადახრის კუთხე მინიმალური?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

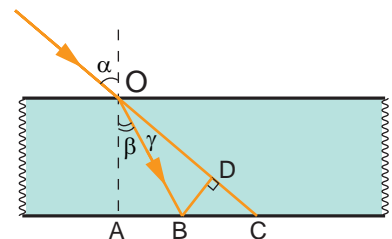
სინათლის სხივი 60° -იანი კუთხით ეცემა მინის ბრტყელპარალელური ფირფიტას. იპოვეთ სხივის გვერდითი წანაცვლება ფირფიტაში გავლისას, თუ მისი სისქე 24 მმ-ია.

მოცემულია: $OA = 24$ მმ; $\frac{n_2}{n_1} = 1,5$; $\alpha = 60^\circ$.
 $BD = ?$

ამოხსნა: პირველ რიგში დავხაზოთ სხივის სვლა ბრტყელპარალელურ ფირფიტაში (სურ. 3.69). საძიებელი BD მონაკვეთის საპოვნელად ჯერ განვსაზღვროთ გარდატეხის β კუთხე. გარდატეხის მეორე კანონის თანახმად,

$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$, აქედან $\sin \beta = \sin \alpha \cdot \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1}{1,5} \approx 0,57$. ტრიგონომეტრიული ცხრილის გამოყენებით ვიპოვიან, რომ $\beta = 35^\circ$. $\triangle OAB$ -დან $OB = \frac{OA}{\cos \beta} = \frac{24}{0,82} = 29,3$ მმ. როგორც ნახაზიდან ჩანს, $\triangle ODB$ -ს γ კუთხე ტოლია: $\gamma = \alpha - \beta = 25^\circ$. ასევე, $BD = OB \cdot \sin \gamma$, ამიტომ $BD = 29,3 \cdot 0,42 = 12,3$ მმ.

პასუხი: სხივის გვერდითი წანაცვლება 12,3 მმ-ის ტოლია.



სურ. 3.69



ამოხსენით ამოცანები:

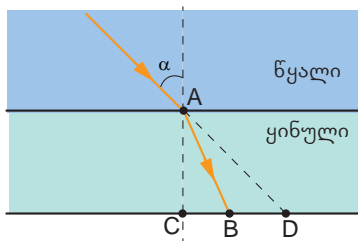
1. იპოვეთ იმ ნივთიერების აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი, რომლისგანაც ბრტყელპარალელური ფირფიტაა დამზადებული, თუ ჰაერიდან ფირფიტაზე

დაცემული სინათლის სხივი მის ზედაპირთან 35° -იან კუთხეს ადგენს, გარდატეხილი სხივი კი იმავე ზედაპირთან 45° -იან კუთხეს.

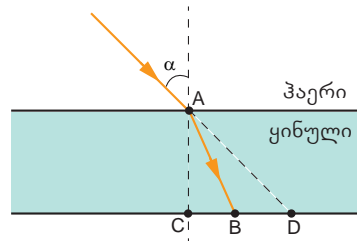
2. სინათლის სხივი ჰაერიდან მინისგან დამზადებულ ბრტყელპარალელურ ფირფიტაში გადადის. იპოვეთ სინათლის პირვანდელი მიმართულებიდან გადახრის კუთხე, თუ ფირფიტაზე სხივის დაცემის კუთხე 75° -ია.

3. სურ. 3.70-ზე გამოსახულია სხივის სვლა წყლიდან ყინულის ბრტყელპარალელურ ფირფიტაში გადასვლისას. იპოვეთ CB მონაკვეთის სიგრძე, თუ ფირფიტის სისქე $AC=2$ სმ, ხოლო დაცემის კუთხე $\alpha=50^\circ$.

4. სურ. 3.71-ზე გამოსახულია სხივის სვლა ჰაერიდან ყინულის ბრტყელპარალელურ ფირფიტაში გადასვლისას. იპოვეთ BD მონაკვეთის სიგრძე, თუ ფირფიტის სისქე $AC=3$ სმ-ია, ხოლო დაცემის კუთხე $\alpha=60^\circ$.



სურ. 3.70



სურ. 3.71

5. იპოვეთ სხივის გვერდითი წანაცვლება ალმასის ბრტყელპარალელურ ფირფიტაში გავლისას, თუ ჰაერიდან ფირფიტაზე დაცემული სხივი მის ზედაპირთან 30° -იან კუთხეს ადგენს, ფირფიტის სისქე კი – 8 მმ-ია.

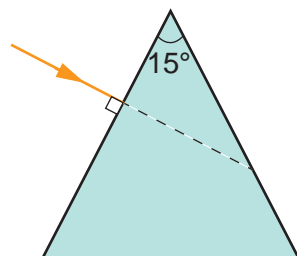
6. მინის სამკუთხა პრიზმის გარდამტეხი კუთხე 15° -ია (ნახ. 3.72). მის წახნაგს ჰაერიდან მართობულად ეცემა სინათლის სხივი. იპოვეთ გარდამტეხ წახნაგზე სხივის დაცემის კუთხე.

7. მინის სამკუთხა პრიზმის გარდამტეხი კუთხე 44° -ია. მის წახნაგს ჰაერიდან მართობულად ეცემა სინათლის სხივი. დახაზეთ მისი შემდგომი სვლა პრიზმაში.

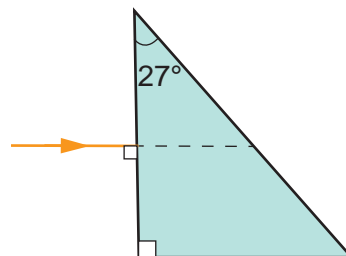
8. ყინულის სამკუთხა პრიზმას, რომლის ფუძე მართკუთხა სამკუთხედია, ჰაერიდან ეცემა სინათლის სხივი ისე როგორც ნახ. 3.73-ზეა ნაჩვენები. იპოვეთ სხივის გადახრის კუთხე, თუ პრიზმის გარდამტეხი კუთხე 27° -ია.

9. ტოპაზისგან დამზადებულ სამკუთხა პრიზმის წახნაგს სხივი ჰაერიდან 40° -იანი კუთხით ეცემა. დახაზეთ სხივის შემდგომი სვლა, თუ პრიზმის გარდამტეხი კუთხე 20° -ია.

10. ალმასისგან დამზადებულ სამკუთხა პრიზმის წახნაგს სხივი ჰაერიდან 30° -იანი კუთხით ეცემა. განსაზღვრეთ სხივის გადახრის კუთხე, თუ პრიზმის გარდამტეხი კუთხე 10° -ია.



სურ. 3.72



სურ. 3.73

§ 3.8 სინათლის გარდატეხა ატმოსფეროში. მირაჟი

რატომ “თრთიან” სხეულები, როდესაც მათ ცხელი ზაფხულის მზიან დღეებში ვაკვირდებით (სურ. 3.74)? რატომ ციმციმებენ ვარსკვლავები? რატომ ჩანს მზე ჰორიზონტთან შებრტყელებული (სურ. 3.75)?



სურ. 3.74

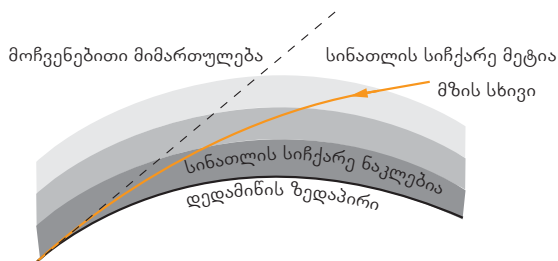


სურ. 3.75

ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივე სიმაღლის ზრდასთან ერთად მცირდება. ამასთან, ჰაერის მასების ცირკულაციისა და არათანაბარი გათბობით გამონვეული კონვექციური ნაკადების გამო ის შემთხვევით ცვლილებებს განიცდის. ჰაერის სიმკვრივის ცვლილება მისი გარდატეხის მაჩვენებლის ცვლილებას იწვევს. შედეგად, ატმოსფეროში სინათლე წრფივად არ ვრცელდება. გარდატეხის მაჩვენებლის თანდათანობითი შემცირება სინათლის სხივების თანდათან გამრუდებას იწვევს. ჰაერის აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი მცირეა (ოდნავ მეტია 1-ზე), უმნიშვნელოა მისი ცვლილება, მაგრამ თუ სინათლე ატმოსფეროში საკმაოდ დიდ მანძილს გადის, მაშინ სანყისი მიმართულებიდან მისი გადახრა საგრძნობი იქნება.

ატმოსფეროში გავლისას სინათლის სხივების გამრუდებას ატმოსფერული რეფრაქცია ეწოდება.

რეფრაქციის გამო ყველა ციური სხეული ჰორიზონტიდან უფრო მაღლა გვეჩვენება, ვიდრე სინამდვილეშია (სურ. 3.76). ვინაიდან სიმაღლის ზრდასთან ერთად ჰაერის სიმკვრივე მცირდება, სინათლის გავრცელების სიჩქარე დედამიწის ზედაპირთან უფრო ნაკლებია, ვიდრე მაღლა. ამიტომ, ატმოსფეროში შემოსული სინათლის სიჩქარე თანდათან იკლებს და სხივი დედამიწის ზედაპირისაკენ უხვევს. რაც უფრო ახლოსაა სინათლის სხივი ჰორიზონტთან, მით მეტ მანძილს გადის ის ატმოსფეროში და, შესაბამისად, უფრო მეტად გადაიხრება ქვევით.



სურ. 3.76

ზღვაზე, მზის ჩასვლისას, მისი ქვედა კიდედან წამოსული სინათლის სხივი 36'-ით გადაიხრება, ზედა კიდედან კი – 29' ით. სწორედ ამიტომ, ჰორიზონტთან მზე შებრტყელებული გვეჩვენება (სურ. 3.75). რეფრაქციის გამო დღე-ღამის ხანგრძლივობა ერთი-ორი წუთით მომატებულია, რადგან, მზის ამოსვლას ჩვენ ცოტათი ადრე ვაკვირდებით, ვიდრე სინამდვილეშია, ჩასვლას კი – ცოტათი გვიან.

ზაფხულის ცხელ, მზიან დღეებში ჰაერი დედამიწის ზედაპირთან ცხელდება და მისი ნაკადები ზევით იწყებს მოძრაობას. ამ ნაკადების სიჩქარე და წნევა განუწყვეტლივ იცვლება, რაც სინათლის სხივების არარეგულარულ გადახრებს იწვევს – დაკვირვებისას სხეულები „თრთიან“.

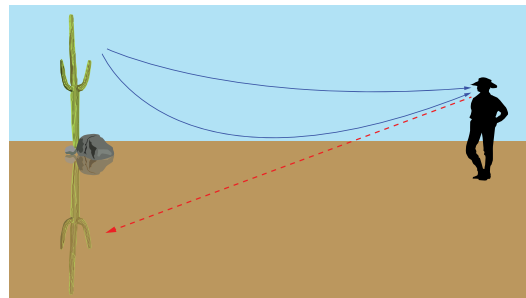
ატმოსფეროში სინათლის სხივების არარეგულარული გადახრის გამო ციმციმებენ ვარსკვლავები.

ნიგნებში, რომლებშიც მოთხრობილია მოგზაურობა უდაბნოში, ხშირად აღწერილია ერთი უცნაური მოვლენა: წყურვილით გატანჯული მგზავრები მოულოდნელად, შორს, მთებს შორის ხედავდნენ ტბას, მასში არეკლილი ცის თალით, მთებით და პალმებით (სურ. 3.77). მგზავრები მიდიოდნენ „წყლისაკენ“, მაგრამ ტბა თითქოს შორდებოდა მათ და ბოლოს ისევე მოულოდნელად ქრებოდა, როგორც გამოჩნდა. როგორ შეიძლება ამ მოვლენის ახსნა?

როდესაც მზე უდაბნოს ქვიშას ძალიან ახურებს, მასთან ახლოს მყოფი ჰაერის ფენები ნაკლებად მკვრივია, ვიდრე ზედა ფენები, ამიტომ დედამიწის ზედაპირისაკენ მიმართული სხივები ჰაერის ცხელ ფენებში მოხვედრისას სრული შინაგანი არეკვლის გამო ზევით მიემართება. შედეგად, დამკვირვებელს ეჩვენება, რომ ისინი დედამიწიდან ირეკლება (სურ. 3.78). რადგან, ჩვეულებრივ არეკვლას ადგილი აქვს წყლის ზედაპირიდან, ამიტომ დამკვირვებელს ეჩვენება, რომ ჰორიზონტს და მას შორის ტბაა.



სურ. 3.77



სურ. 3.78

დაბალი სიმკვრივის ჰაერის ფენებიდან სრული შინაგანი არეკვლის გამო წარმოქმნილ წარმოსახვით (არ არსებულ) გამოსახულებას მირაჟს უწოდებენ.

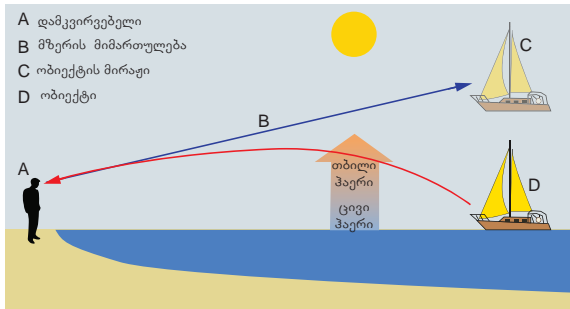
ცხელ დღეებში მირაჟი შეიძლება შეამჩნიოთ მოასფალტებულ გზებზე (სურ. 3.79). სინათლე ირეკლება ასფალტის თავზე არსებული გახურებული ჰაერის ფენებიდან და ამიტომ იქმნება „სველი ასფალტის“ ილუზია.

ზოგჯერ მირაჟი ზღვის ცივი ზედაპირის ზევით დაიმზირება მაშინ, როდესაც ზღვის ზედაპირიდან დაშორებისას ჰაერის ფენების ტემპერატურა მკვეთრად იზრდება. ადის რა ატმოსფეროს შედარებით თბილ ზედა ფენებში, სინათლის სხივები მრუდდება და ხვდება დამკვირ-



სურ. 3.79

ვებლის თვალს (სურ. 3.80). შედეგად, ის წყლის ზედაპირზე მყოფ ნავს ცაში ხედავს. ჰორიზონტის ზევით გამოჩენილ გემს (სურ. 3.81) მფრინავ ჰოლანდიელს ეძახდნენ და მიაჩნდათ, რომ ის უბედურების მომტანი იყო.



სურ. 3.80



სურ. 3.81



მოიძიეთ ინფორმაცია მირაჟის სხვა სახეობების შესახებ.



<http://tiny.cc/yn87vz>



<http://tiny.cc/0o87vz>



<http://tiny.cc/fo87vz>

დასკვნები:

- ატმოსფეროში გავლისას სინათლის სხივების გამრუდებას ატმოსფერული რეფრაქცია ეწოდება;
- დაბალი სიმკვრივის ჰაერის ფენებიდან სრული შინაგანი არეკვლის გამო წარმოქმნილ წარმოსახვით (არ არსებულ) გამოსახულებას მირაჟს უწოდებენ.

საკონტროლო კითხვები:

1. როგორ იცვლება ჰაერის ოპტიკური სიმკვრივე, მისი სიმკვრივის შემცირებისას?
2. რატომ ჩანს ციური სხეულები ჰორიზონტიდან უფრო მაღლა, ვიდრე სინამდვილეშია?
3. რით არის გამოწვეული შორს ანთებული ნათურების ციმციმი?
4. რა შემთხვევაში ჩნდება მირაჟი უდაბნოში?
5. რა შემთხვევაში ჩნდება მირაჟი ზღვის თავზე?

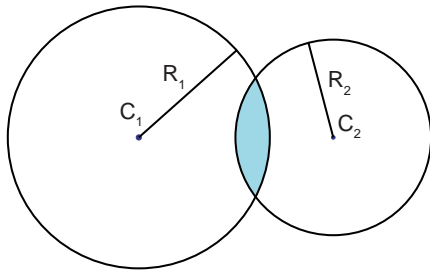
§ 3.9 ლინზები

ბევრ თქვენგანს უნახავს და გამოუყენებია დურბინდი და მიკროსკოპი, ზოგიერთი კი შესაძლოა ტელესკოპით ციურ სხეულებს დაკვირვებობს. მრავალი ადამიანი სათვალეს ხმარობს. ყველა მათგანი ოპტიკური ხელსაწყოს წარმოადგენს. დაფიქრებულხართ როგორ მუშაობს ისინი? ან, რას წარმოადგენს სათვალის მინები? ალბათ იცით, რომ სათვალის მინებს ლინზებს ეძახიან. ისინი თითქმის ყველა ოპტიკურ ხელსაწყოში გამოიყენება. რა არის ლინზა?

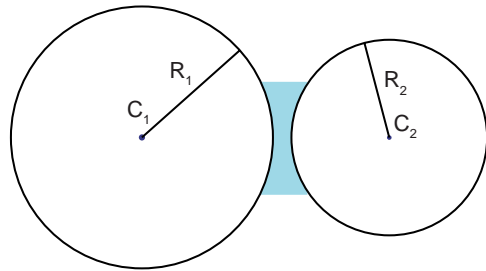
ლინზა წარმოადგენს გამჭვირვალე სხეულს, რომელიც მრუდწირული (უმეტეს შემთხვევაში კი სფერული) ზედაპირებითაა შემოსაზღვრული.

ძალიან დიდი სიმრუდის რადიუსის მქონე სფერული ზედაპირი შეიძლება ბრტყელ ზედაპირად მივიჩნიოთ, ამიტომ, ლინზის ერთი ზედაპირი შესაძლოა, ბრტყელიც იყოს.

სურ. 3.82-ზე და სურ. 3.83-ზე გამოსახულია ორი ტიპის, შესაბამისად, ორმხრივამოზნექილი და ორხმრივჩაზნექილი ლინზების კვეთა.



სურ. 3.82

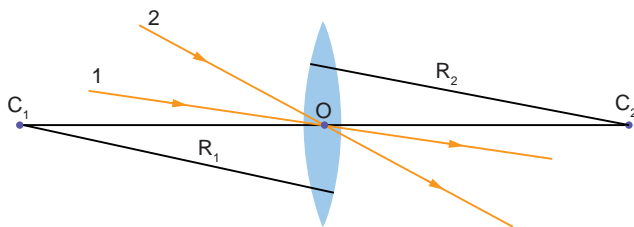


სურ. 3.83

წრფეს, რომელიც ლინზის შემომსაზღვრელი სფერული ზედაპირების C_1 და C_2 ცენტრებზე გადის, ლინზის **მთავარი ოპტიკური ღერძი** ეწოდება. R_1 და R_2 ამ ზედაპირების რადიუსებია.

ლინზას, რომლის სისქე სიმრუდის R_1 და R_2 რადიუსებზე გაცილებით მცირეა, **თხელი ლინზა** ეწოდება. თხელი ლინზის ცენტრალური ნაწილი ძალიან დიდი მიახლოებით შეგვიძლია ბრტყელპარალელურ ფირფიტად მივიჩნიოთ, რომელშიც სხივი მიმართულებას არ იცვლის, წანაცვლება კი სრულიად უმნიშვნელოა. სწორედ ამიტომ, ყველა თხელ ლინზას აქვს წერტილი, რომელზეც გამავალი ნებისმიერი სხივი მიმართულებას არ იცვლის (სურ. 84). ამ O წერტილს **ლინზის ოპტიკური ცენტრი** ეწოდება.

სურ. 3.85-ზე გამოსახულია ბრტყელამოზნექილი, ბრტყელჩაზნექილი და ამოზნექილ-ჩაზნექილი ლინზები.



სურ. 3.84



სურ. 3.85

სიმარტივისათვის, განვიხილავთ მხოლოდ ისეთი მასალისაგან დამზადებულ თხელ ლინზებს, რომელთა ოპტიკური სიმკვრივე, გარემოს ოპტიკურ სიმკვრივეზე მეტია.

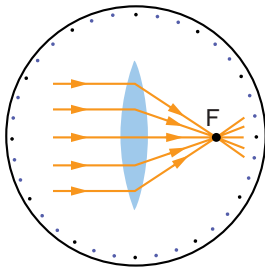
ლინზებში სინათლის სხივის სვლის შესასწავლად ჩავატაროთ ცდები.



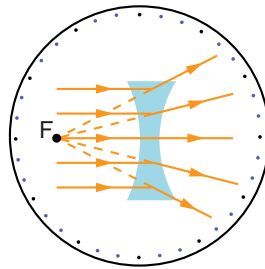
ორმხრივამოზნეკილ ლინზაზე მიემართოთ მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელურ სხივთა კონა (სურ. 3.86). ლინზაში გავლის შემდეგ ისინი მთავარ ოპტიკურ ღერძზე მდებარე F წერტილში შეიკრიბებიან. იმავე შედეგს მივიღებთ ყველა იმ ლინზისათვის, რომელთა შუა ნაწილი უფრო სქელია, ვიდრე კიდეები. სწორედ ამიტომ, ასეთ ლინზებს **შემკრებ ლინზებს** უწოდებენ. ცდით შეიძლება დავრწმუნდეთ, რომ ოპტიკურ ცენტრზე გამავალი სინათლის კონა, ლინზაში არ გარდატყდება.

ახლა ორმხრივამოზნეკილი ლინზა ორმხრივჩაზნეკილით შევცვალოთ. დავინახავთ, რომ მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელურ სხივთა კონა ამ ლინზაში გავლის შემდეგ გაიშლება ისე, რომ მათი წარმოსახვითი გაგრძელებები გადაიკვეთება წერტილში, რომელიც მთავარ ოპტიკურ ღერძზე ლინზის იმავე მხარეს მდებარეობს, საიდანაც ლინზას სინათლე დაეცა (სურ. 3.87). იმავე შედეგს მივიღებთ ყველა იმ ლინზისათვის, რომელთა შუა ნაწილი უფრო თხელია, ვიდრე კიდეები. ამიტომ ასეთ ლინზებს **გამბნევ ლინზებს** უწოდებენ. შემკრები ლინზის მსგავსად, ოპტიკურ ცენტრზე გამავალი სხივი მათშიც არ გარდატყდება.

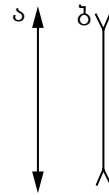
თხელი შემკრები და გამბნევი ლინზები სქემატურად გამოისახება ისე, როგორც, შესაბამისად, სურ. 3.88 ა-ზე და ბ-ზეა ნაჩვენები.



სურ. 3.86



სურ. 3.87



სურ. 3.88

წერტილს, რომელშიც მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური სხივები ლინზაში გარდატყდის შემდეგ გადაიკვეთება (ან გადაიკვეთება გარდატყდილ სხივთა გაგრძელებები), ლინზის მთავარი ფოკუსი ეწოდება. ამ წერტილს F ასოთი აღნიშნავენ.

თუ მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელურ სხივთა კონა ლინზას მეორე მხრიდან დაეცემა, გარდატყდის შემდეგ ისინი (ან მათი გაგრძელებები) ლინზის მეორე მთავარ ფოკუსში შეიკრიბება. როდესაც ლინზის ორივე მხარეს ერთი და იგივე გარემოა, ორივე მთავარი ფოკუსი ლინზის მთავარ ოპტიკურ ღერძზე ოპტიკური ცენტრის სიმეტრიულად მდებარეობს.

მანძილს, ოპტიკური ცენტრიდან მთავარ ფოკუსამდე, ლინზის ფოკუსური მანძილი ეწოდება. ფოკუსის მსგავსად, ფოკუსურ მანძილსაც F ასოთი აღნიშნავენ.

მთავარ ოპტიკურ ღერძზე მდებარე წერტილს, რომელიც ოპტიკური ცენტრიდან $2F$ მანძილითაა დაშორებული, ორმაგ ფოკუსს უწოდებენ.

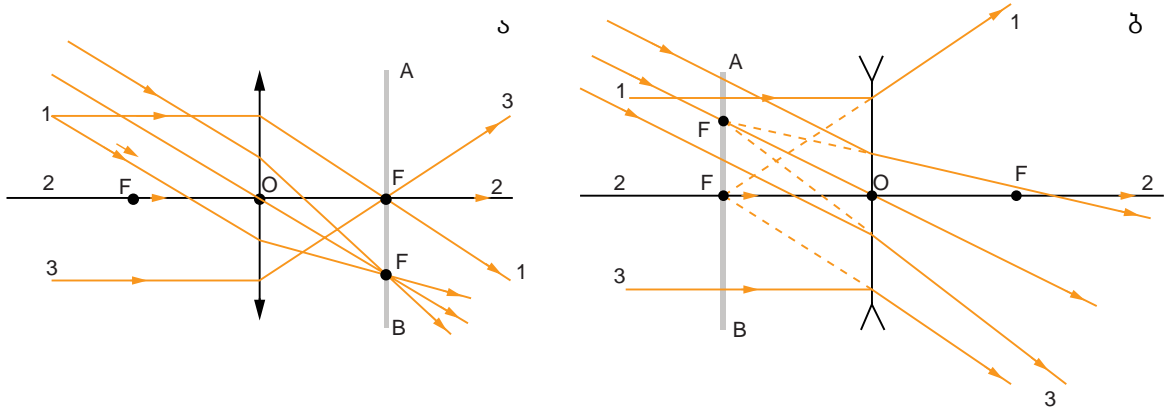
მთავარი ოპტიკური ღერძისაგან განსხვავებულ წრფეს, რომელიც ოპტიკურ ცენტრზე გადის, **ლინზის ოპტიკური თანაღერძი** ეწოდება.

რომელ წერტილში სეიკრიბება შემკრები ლინზის ოპტიკური თანაღერძის პარალელურ სხივთა კონა ლინზაში გარდატყდის შემდეგ? რომელ წერტილში გადაიკვეთება იმავე კონის გაგრძელებები გამბნევ ლინზაში?

ცდები აჩვენებს, რომ წერტილთა ერთობლიობა, რომლებშიც სხვადასხვა თანაღერძის პარალელური სხივები ლინზაში გარდატყდის შემდეგ გადაიკვეთება (ან გადაიკვეთება გარდატყდილ სხივთა გაგრძელებები), იძლევა AB სიბრტყეს, რომელიც მთავარი ოპტიკური ღერძის მართობულია და ფოკუსზე გადის (სურ. 3.89 ა და ბ). მას **ფოკალური სიბრტყე** ეწოდება. ისევე, როგორც მთავარი ფოკუსი, ლინზას ორი ფოკა-

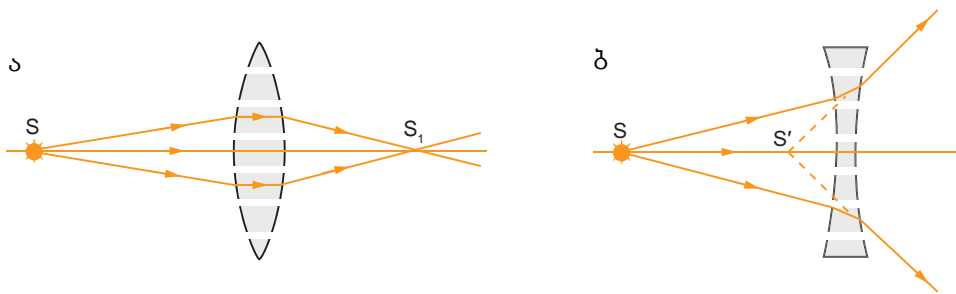
ლური სიბრტყე აქვს. ფოკალურ სიბრტყეზე მდებარე და მთავარი ფოკუსისაგან განსხვავებულ ყველა F' წერტილს, **ფოკუსი** ეწოდება.

აღსანიშნავია, რომ შემკრებ ლინზაში ფოკუსში იკვეთება თვით გარდატეხილი სხივები, რომლებსაც ეწერება გადააქვთ, ამიტომ შემკრები ლინზის ფოკუსი **ნამდვილია**. გამბნევე ლინზის ფოკუსში კი იკვეთება გარდატეხილი სხივების გაგრძელებები, ე.ი. ფოკუსში ეწერება არ მიდის და ამიტომ ის **წარმოსახვითია**. შესაბამისად შემკრები ლინზის ფოკალური სიბრტყე ნამდვილია, გამბნევი ლინზისა კი – წარმოსახვითი.



სურ. 3.89

როგორ ავხსნათ შემკრებ და გამბნევე ლინზებში სხივთა განსხვავებული სვლა? შემკრები ლინზის სისქე კიდებიდან შუა ნაწილისაკენ იზრდება. ასეთი ლინზა სქემატურად შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ერთობლიობა პრიზმებისა, რომელთა ფუძეები (დიდი ფუძეები) ლინზის ოპტიკური ცენტრისკენაა განლაგებული (სურ. 3.90ა). ყველა პრიზმა სხივს ფუძისაკენ (დიდი ფუძისაკენ) გადახრის, ამიტომ ასეთ ლინზაში გამავალი სხივები იხრება მთავარი ოპტიკური ღერძისკენ. გამბნევი ლინზის შემთხვევაში, მისი „შემადგენელი“ პრიზმების ფუძეები (დიდი ფუძეები) განლაგებულია ლინზის კიდებისაკენ, ამიტომ მასში გარდატეხილი სხივები იშლება – შორდება მთავარ ოპტიკურ ღერძს (სურ. 3.90 ბ).



სურ. 3.90

რაც უფრო ახლოსაა ლინზასთან ფოკუსები, მით უფრო ძლიერად გარდატეხს ის სხივებს. ამიტომ, ლინზის მახასიათებლად შემოტანილია ოპტიკური ძალის ცნება: **ფოკუსური მანძილის შებრუნებულ სიდიდეს ლინზის ოპტიკური ძალა ეწოდება**. მას D ასოთი აღნიშნავენ:

$$D = \frac{1}{F}$$

SI-ში ლინზის ოპტიკური ძალის ერთეულია 1 დიოპტრი (1დპტრ). ერთი დიოპტრი ოპტიკური ძალა აქვს ლინზას, რომლის ფოკუსური მანძილი 1 მეტრია. შემკრები ლინზის ოპტიკური ძალა მიჩნეულია დადებითად, გამბნევისა კი – უარყოფითად.



<http://tiny.cc/ho87vz>

დასკვნები:

- ლინზა წარმოადგენს გამჭვირვალე სხეულს, რომელიც მრუდწირული (ძირითადად, სფერული) ზედაპირებითაა შემოსაზღვრული;
- ლინზის შემოსაზღვრელი სფერული ზედაპირების ცენტრებზე გამავალ წრფეს, ლინზის მთავარი ოპტიკური ღერძი ეწოდება;
- ლინზას, რომლის სისქე შემოსაზღვრელი ზედაპირების სიმრუდის რადიუსებზე გაცილებით მცირეა, თხელი ლინზა ეწოდება;
- წერტილს, რომელშიც მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელურ სხივთა კონა ლინზაში გარდატეხის შემდეგ იკრიბება (ან გადაიკვეთება გარდატეხილ სხივთა გაგრძელებები), ლინზის მთავარი ფოკუსი ეწოდება;
- მთავარი ოპტიკური ღერძისაგან განსხვავებულ წრფეს, რომელიც ოპტიკურ ცენტრზე გადის, ლინზის ოპტიკური თანაღერძი ეწოდება;
- ლინზის ფოკალური სიბრტყე მთავარი ოპტიკური ღერძის მართობულია და მთავარ ფოკუსზე გადის;
- შემკრები ლინზის ფოკუსი ნამდვილია, გამბნევის კი – წარმოსახვითი;
- ფოკუსური მანძილის შებრუნებულ სიდიდეს ლინზის ოპტიკური ძალა ეწოდება: $D = \frac{1}{F}$;
- ერთი დიოპტრი ოპტიკური ძალა აქვს ლინზას, რომლის ფოკუსური მანძილი 1 მეტრია.

საკონტროლო კითხვები:

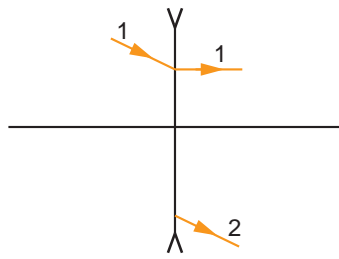
1. რომელ წერტილს უწოდებენ ლინზის ოპტიკურ ცენტრს?
2. როგორი ფორმის ლინზები არსებობს?
3. რომელ ლინზებს უწოდებენ შემკრებს? გამბნევს?
4. რას უწოდებენ ფოკალურ სიბრტყეს?
5. რატომ ახასიათებენ ლინზის ოპტიკურ სიძლიერეს ფოკუსური მანძილის შებრუნებული სიდიდით?



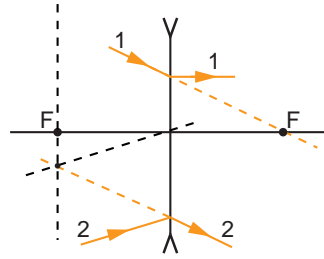
ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

სურ. 3.91-ზე გამოსახულია სხივის 1-ის სვლა ლინზამდე და მასში გარდატეხის შემდეგ. აგებით დაადგინეთ ლინზის ფოკუსების მდებარეობა და სხივი 2-ის სვლა ლინზამდე.

ამოხსნა: ვინაიდან გამბნევ ლინზაზე დაცემული სხივი 1 გარდატეხის შემდეგ მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელურად ვრცელდება, ამიტომ ამ სხივის გაგრძელება ლინზის მთავარ ფოკუსში გადის. მოვნიშნოთ ლინზის მარჯვენა ფოკუსი და ფარგლის დახმარებით გადავზომოთ ლინზის მარცხენა ფოკუსი. გარდატეხილი სხივი 2' გაავგრძელოთ მარცხენა ფოკალურ სიბრტყის გადაკვეთამდე. გადაკვეთის წერტილზე გავავლოთ ოპტიკური თანაღერძი. სწორედ ამ თანაღერძის პარალელური იქნება ლინზაზე დაცემული სხივი (სურ. 3.92).



სურ. 3.91

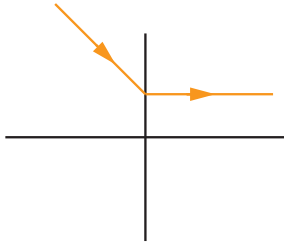


სურ. 3.92

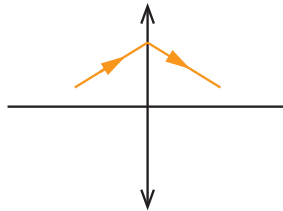


ამოხსენით ამოცანები:

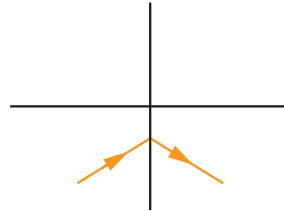
1. სად იკრიბება შემკრებ ლინზაზე დაცემული პარალელური სხივები ლინზაში გარდატეხის შემდეგ?
2. რა სახისაა ლინზა, თუ მასზე დაცემული პარალელური სხივები ისე გარდატეხდება, რომ იკრიბება მათი გაგრძელებები?
3. ზაფხულის ცხელ, მზიან დღეს ხმელ ბალახზე ხანძრის გაჩენის მიზეზი შესაძლოა გახდეს იქ დაგდებული მინის ბოთლი ან მისი ნატეხი. ახსენით, რატომ?
4. მივიღებთ თუ არა ეკრანზე განათებულ ადგილს, თუ მას იმ ადგილზე მოვათავსებთ, სადაც ლინზაში გარდატეხილი სხივების გაგრძელებები იკრიბება? პასუხი დაასაბუთეთ.
5. სურ. 3.93-ის მიხედვით განსაზღვრეთ, ლინზა შემკრებია თუ გამბნევი?
6. სურ. 3.94-ზე გამოსახულია სხივითა სვლა შემკრებ ლინზაში. აგებით დაადგინეთ ლინზის მთავარი ფოკუსის მდებარეობა.
7. სურ. 3.95-ის მიხედვით დაადგინეთ, ლინზა შემკრებია თუ გამბნევი და აგებით იპოვეთ მისი მთავარი ფოკუსის მდებარეობა.



სურ. 3.93

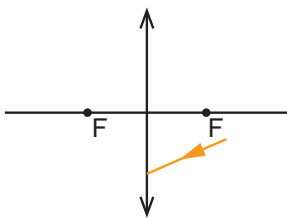


სურ. 3.94

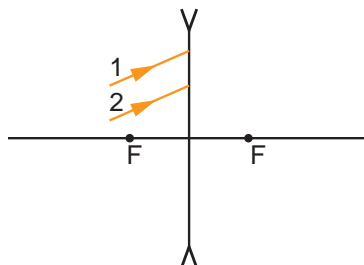


სურ. 3.95

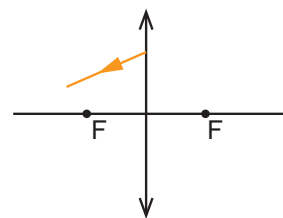
8. აგებით დაადგინეთ, რომელ წერტილში გადაკვეთს სინათლის სხივი ლინზაში გარდატეხის შემდეგ მთავარ ოპტიკურ ღერძს (სურ. 3.96).
9. გამბნევ ლინზას ეცემა პარალელურ სხივთა წყვილი (სურ. 97). აგებით დაადგინეთ, სად გადაიკვეთება გარდატეხილი სხივების გაგრძელებები ლინზაში გავლის შემდეგ.
10. სურ. 3.98-ზე მოცემულია სინათლის სხივის სვლა ლინზაში გარდატეხის შემდეგ. გამოსახეთ სხივის სვლა ლინზაზე დაცემამდე.



სურ. 3.96



სურ. 3.97



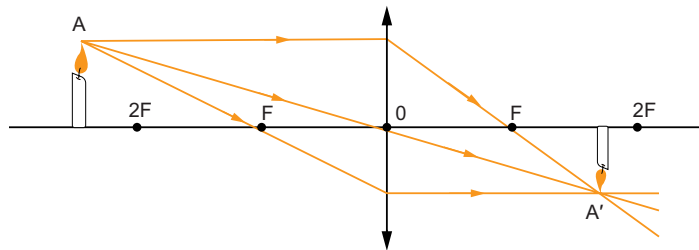
სურ. 3.98

§ 3.10 გამოსახულების აგება ლინზაში

ზოგჯერ საგნის ან მისი მცირე დეტალების უკეთ დასანახად ლუპას („გამადიდებელ შუშას“) ვიყენებთ. ალბათ შეგიძინევიათ, რომ მისი გამოყენებით შეიძლება მივიღოთ როგორც გადიდებული, ასევე შემცირებული გამოსახულება. რაზეა ეს დამოკიდებული? როგორ მიიღება გამოსახულება ლინზაში?

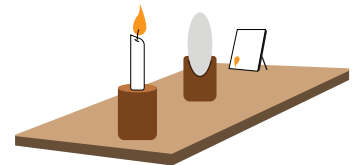
თავდაპირველად ავაგოთ საგნის გამოსახულება შემკრებ ლინზაში. ამისათვის გამოვიყენოთ წინა პარაგრაფში აღწერილი სამი „მოსახერხებელი“ სხივის სვლა. როგორც იცით, მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური სხივი ლინზაში გარდატეხის შემდეგ მის მთავარ ფოკუსში გაივლის; სხივთა სვლის შექცევადობიდან გამომდინარე, მთავარი ფოკუსის გავლით ლინზაზე დაცემული სხივი, გარდატეხის შემდეგ მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური; და ბოლოს, ლინზის ოპტიკურ ცენტრზე გამავალი სხივი მიმართულებას არ იცვლის.

განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც საგანი (სანთელი) ოპტიკური ცენტრიდან ორმაგ ფოკუსურ მანძილზე მეტადაა დაშორებული. საგნიდან ლინზამდე მანძილი აღვნიშნოთ d -თი ($d > 2F$). სანთლის ალის – A წერტილის გამოსახულების ასაგებად, მისგან წამოსული ერთი სხივი მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელურად მივმართოთ (სურ. 3.99).



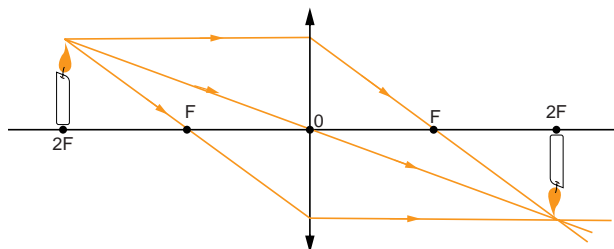
სურ. 3.99

გარდატეხის შემდეგ ის მთავარ ფოკუსზე გაივლის. მთავარ ფოკუსზე გამავალი მეორე სხივი (AF), ლინზაში გარდატეხის შემდეგ მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელურად გავრცელდება. სწორედ ამ ორი გარდატეხილი სხივის გადაკვეთაში იმყოფება სანთლის ალის გამოსახულება – A' წერტილი. ამ წერტილში გაივლის ლინზის ოპტიკურ ცენტრზე გამავალი AO სხივიც. აღსანიშნავია, რომ A' წერტილზე გაივლის A წერტილიდან წამოსული ნებისმიერი სხივი ლინზაში გარდატეხის შემდეგ ე.ი. A' წერტილში კონცენტრირდება A წერტილიდან გამოსხივებული ენერგია და, შესაბამისად, გამოსახულება **ნამდვილი** იქნება. სანთელის ყოველი წერტილის გამოსახულება მიიღება A' წერტილდან მთავარ ოპტიკურ ღერძზე დაშვებულ მართობზე. როგორც სურათიდან ჩანს, ამ შემთხვევაში გამოსახულება **შემცირებული** და **შებრუნებულია**, ის ფოკუსსა და ორმაგ ფოკუსს შორის მიიღება. ეს შეიძლება შევამოწმოთ ცდით (სურ. 3.100).



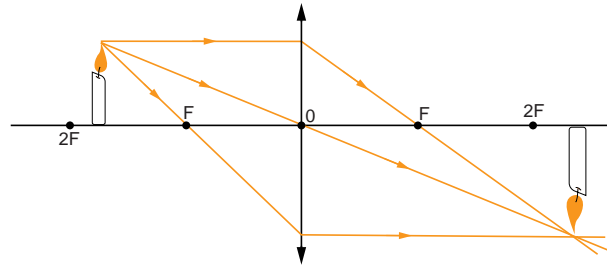
სურ. 3.100

თუ საგანს ორმაგ ფოკუსში მოვათავსებთ $d = 2F$, გამოსახულებაც ორმაგ ფოკუსში მიიღება. ის იქნება **ნამდვილი**, **იმავე ზომის** და **შებრუნებული** (სურ. 3.101).



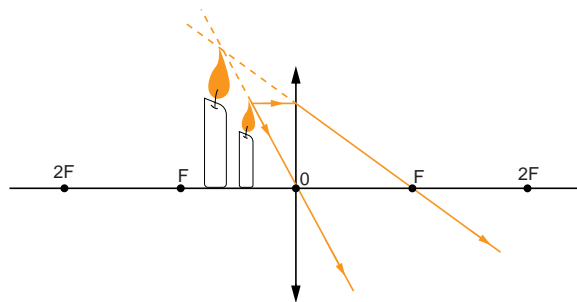
სურ. 3.101

როდესაც საგანი ლინზის მთავარ ფოკუსსა და ორმაგ ფოკუსს შორისაა მოთავსებული ($F < d < 2F$), გამოსახულება ორმაგ ფოკუსს გარეთ მიიღება. ის იქნება **ნამდვილი, გადიდებული და შებრუნებული** (სურ. 3.102). თუ პირველ შემთხვევას გავიხსენებთ, ეს შედეგი სხივთა შექცევადობის პრინციპიდანაც გამომდინარეობს.



სურ. 3.102

ახლა სანთელი ლინზიდან ფოკუსურთან შედარებით ნაკლებ მანძილზე მოვათავსოთ ($d < 2F$). გამოსახულება მიიღება ლინზის იმავე მხარეს, **წარმოსახვითი, გადიდებული და პირდაპირი**. მიღებული გამოსახულება წარმოსახვითია, რადგან ის წარმოიქმნება არა გარდატეხილი სხივების, არამედ მათი გაგრძელებების გადაკვეთით (სურ. 3.103).



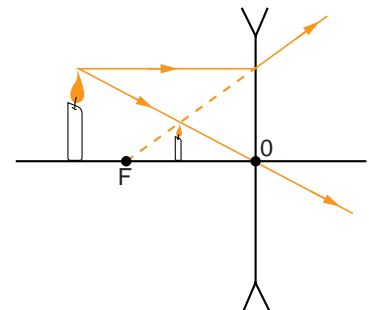
სურ. 3.103

სწორედ ასეთ პირდაპირ, გადიდებულ და წარმოსახვით გამოსახულებას აკვირდება ლინზით (ლუპით) საათის ხელოსანი (სურ. 3.104).



სურ. 3.104

როგორი გამოსახულება მიიღება გამბზნევი ლინზით? გაიხსენეთ, რომ მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური სხივი გამბზნევი ლინზაში ისე გარდატყდება, რომ მთავარ ფოკუსზე მხოლოდ მისი გაგრძელება გადის. ოპტიკურ ცენტრზე გამავალი სხივი მიმართულებას არ იცვლის. სურ. 3.105-დან ჩანს, რომ ლინზაში გავლის შემდეგ სხივები არ გადაიკვეთება, გადაიკვეთება მხოლოდ მათი გაგრძელებები. შესაბამისად, მიიღება **წარმოსახვითი, შემცირებული და პირდაპირი** გამოსახულება.



სურ. 3.105

თუ გამბზნევი ლინზის წინ მოთავსებულ საგანს დავუახლოვებთ ან დავაშორებთ ლინზას, შეიძლება თუ არა, მივიღოთ ნამდვილი ან გადიდებული გამოსახულება? ააგეთ გამოსახულებები და შეეცადეთ ამ კითხვებს პასუხები დამოუკიდებლად გასცეთ.

დასკვნები:

- თუ საგანი შემკრები ლინზიდან ორმაგ ფოკუსურ მანძილზე მეტადაა დაშორებული, გამოსახულება მიიღება ფოკუსსა და ორმაგ ფოკუსს შორის, ნამდვილი, შემცირებული და შებრუნებული;
- თუ საგანი შემკრები ლინზის წინ ორმაგ ფოკუსსა და ფოკუსს შორის მდებარეობს, გამოსახულება მიიღება ორმაგი ფოკუსის გარეთ, ნამდვილი, გადიდებული და შებრუნებული;
- თუ საგანი შემკრები ლინზიდან ფოკუსურზე ნაკლები მანძილითაა დაშორებული, გამოსახულება მიიღება ლინზის იმავე მხარეს, წარმოსახვითი, გადიდებული და პირდაპირი;
- გამბნევ ლინზაში საგნის გამოსახულება მიიღება ლინზის იმავე მხარეს, წარმოსახვითი, შემცირებული და პირდაპირი.

საკონტროლო კითხვები:

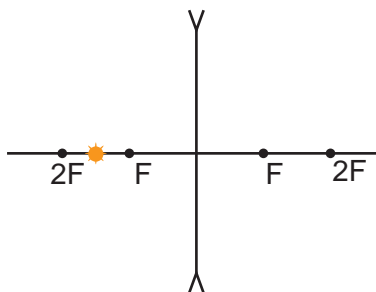
1. რომელ წერტილში გაივლის მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური სხივი შემკრებ ლინზაში გარდატეხის შემდეგ?
2. რა მიმართულება ექნება მთავარი ფოკუსის გავლით შემკრებ ლინზაზე დაცემულ სხივს მასში გარდატეხის შემდეგ?
3. როგორ ვრცელდება ლინზის ოპტიკურ ცენტრზე გამავალი სხივი?
4. როგორ ვრცელდება მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური სხივი გამბნევ ლინზაში გარდატეხის შემდეგ?
5. რა შემთხვევაში ვიღებთ შემკრებ ლინზაში საგნის ნამდვილ გამოსახულებას? წარმოსახვით გამოსახულებას?



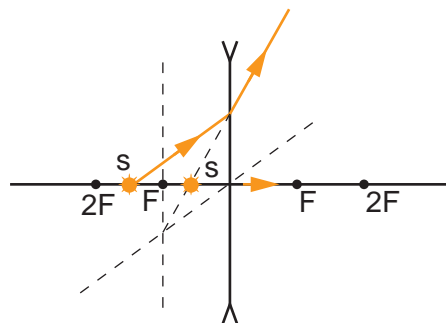
ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

აგებით დაადგინეთ ლინზის მთავარ ოპტიკურ ღერძზე მოთავსებული მნათი წერტილის გამოსახულების მდებარეობა (სურ. 3.106).

ამოხსნა: განვიხილოთ სინათლის წყაროდან წამოსული ორი სხივი: პირველი, რომელიც მთავარი ოპტიკური ღერძის გასწვრივ ვრცელდება და მეორე, ლინზაზე დაცემული ნებისმიერი სხვა სხივი. გავავლოთ ოპტიკურ ცენტრზე გამავალი მეორე სხივის პარალელური თანაღერძი (სურ. 3.107). მეორე სხივი ისე გარდატყდება, რომ მისი



სურ. 3.106



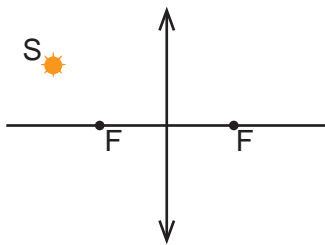
სურ. 3.107

გაგრძელება მარცხენა ფოკალური სიბრტყისა და ოპტიკური თანაღერძის გადაკვეთის წერტილზე გაივლის. სადაც ეს გაგრძელება გადაკვეთს მთავარ ოპტიკურ ღერძს, იქ მიიღება სინათლის წყაროს წარმოსახვითი გამოსახულება.

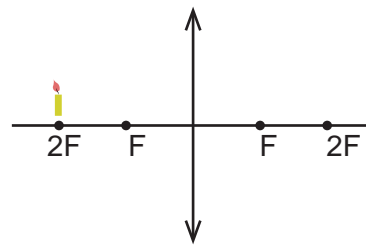


ამოხსენით ამოცანები:

1. სად იკვეთება შემკრებ ლინზაზე დაცემული მზის სხივები ლინზაში გარდატეხის შემდეგ?
2. სინათლის წერტილოვანი წყარო მოთავსებულია შემკრები ლინზის ფოკალურ სიბრტყეში. როგორ გავრცელდება ლინზაში გარდატეხილი სხივები?
3. როცა ლინზაში მიღებული გამოსახულება წარმოსახვითია, მართებულია თუ არა მტკიცება, რომ ლინზა გამბზნევია? პასუხი დაასაბუთეთ.
4. შემკრები ლინზით ეკრანზე სინათლის წერტილოვანი წყაროს მკვეთრი გამოსახულება მიიღეს. როგორ შეიცვლება გამოსახულება, თუ ეკრანს ლინზისაკენ ავამოძრავეთ?
5. სხივთა სვლის აგებით დაადგინეთ, ნამდვილია თუ წარმოსახვითი სურ. 3.108-ზე მოცემული S მნათი წერტილის გამოსახულება.
6. ააგეთ და დაახასიათეთ სურ. 3.109-ზე მოცემული საგნის გამოსახულება.



სურ. 3.108



სურ. 3.109

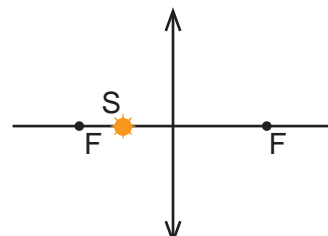
7. როდესაც საგანი და მისი გამოსახულება ლინზაში ერთსა და იმავე მხარეს მდებარეობს, მაშინ გამოსახულება ნამდვილია თუ წარმოსახვითი? პასუხი დაასაბუთეთ.
8. სურ. 3.110-ზე გამოსახულია ლინზის მთავარი ოპტიკური ღერძი, S მნათი წერტილი და მისი S_1 გამოსახულება. აგებით დაადგინეთ: ლინზის მდებარეობა, შემკრებია თუ გამბზნევია ის და მისი ფოკუსების მდებარეობა.
9. სურ. 3.111-ზე გამოსახულია ლინზის მთავარი ოპტიკური ღერძი, S მნათი წერტილი და მისი S_1 გამოსახულება. აგებით დაადგინეთ: ლინზის მდებარეობა, შემკრებია ლინზა თუ გამბზნევია და მისი ფოკუსების მდებარეობა.
10. აგებით დაადგინეთ ლინზის მთავარ ოპტიკურ ღერძზე მოთავსებული მნათი წერტილის გამოსახულების მდებარეობა (სურ. 3.112) ნამდვილი თუ წარმოსახვითია ის?



სურ. 3.110



სურ. 3.111

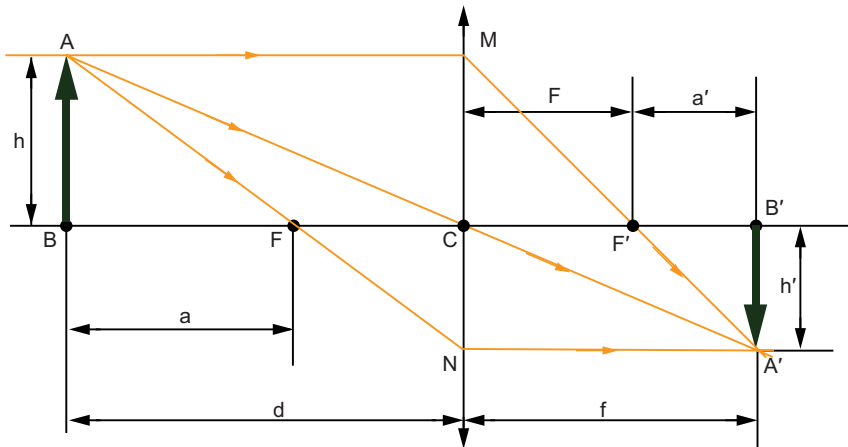


სურ. 3.112

§3.11 თხელი ლინზის ფორმულა

როგორც წინა პარაგრაფებიდან იცით, ლინზაში მიღებული გამოსახულების მდებარეობა, ზომა, ორიენტაცია ლინზის ფოკუსურ მანძილსა და მის მიმართ საგნის მდებარეობაზეა დამოკიდებული. ამ პარაგრაფის მიზანია, დავადგინოთ კავშირი საგნიდან ლინზამდე d მანძილს, გამოსახულებიდან ლინზამდე f მანძილსა და ლინზის F ფოკუსურ მანძილს შორის.

ვთქვათ, $AB = h$ სიმაღლის საგანი ორმხრივამოზნეკილი ლინზიდან d მანძილით, ხოლო მარცხენა მთავარი ფოკუსიდან $BF = a$ მანძილითაა დაშორებული (სურ. 3.113).



სურ. 3.113

$A'B' = h'$ ზომის გამოსახულება კი ლინზიდან f , ხოლო მარჯვენა მთავარი ფოკუსიდან $B'F' = a'$ მანძილითაა დაშორებული. $\Delta A'B'F'$ -ის და $\Delta F'CM$ -ის მსგავსებიდან გამომდინარეობს, რომ

$$\frac{h'}{a'} = \frac{h}{F} \quad (1)$$

ΔABF -ის და ΔFCN -ის მსგავსებიდან კი –

$$\frac{h'}{F} = \frac{h}{a} \quad (2)$$

ჩვეულებრივ, ლინზით მიღებული გამოსახულების ზომა, საგნის ზომისაგან განსხვავებულია. სწორედ ამიტომ შემოღებულია ლინზის წირითი გამადიდებლობის ცნება.

ლინზის წირითი გამადიდებლობა ეწოდება გამოსახულების წირითი ზომის შეფარდებას საგნის წირით ზომასთან. მას Γ ასოთი აღნიშნავენ:

$$\Gamma = \frac{h'}{h} \quad (3)$$

(1) და (2) ფორმულების გათვალისწინებით (3) შემდეგნაირად ჩაინერება:

$$\Gamma = \frac{F}{a} = \frac{a'}{F} \quad (4)$$

აქედან მივიღებთ:

$$aa' = F^2 \quad (5)$$

ეს ფორმულა თხელი ლინზისათვის **ნიუტონის ფორმულის** სახელითაა ცნობილი. გავითვალისწინოთ, რომ საგნიდან ლინზამდე მანძილი $d = a + F$, ხოლო ლინზიდან გამოსახულებამდე $f = a' + F$. თუ აქედან განსაზღვრულ a -ს და a' -ის მნიშვნელობებს (5)-ში ჩავსვამთ, მივიღებთ:

$$(d - F)(f - F) = F^2,$$

საიდანაც

$$df - fF = dF.$$

ამ ტოლობის ორივე ნაწილის dfF ნამრავლზე გაყოფით კი მივიღებთ:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}. \quad (6)$$

ამ ფორმულას **თხელი ლინზის ფორმულას** უწოდებენ.

თუ ლინზის ოპტიკური ძალის განსაზღვრებას გავითვალისწინებთ, თხელი ლინზის ფორმულა ასეც შეიძლება ჩავწეროთ:

$$D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}. \quad (7)$$

თხელი ლინზის ფორმულის გამოყენებისას საჭიროა დავიცვათ შემდეგი წესი: თუ ლინზა შემკრებია, მისი ფოკუსი ნამდვილია და $\frac{1}{F}$ -ის წინ „+“ ნიშანი იწერება, გამბნევი ლინზის შემთხვევაში კი – ნიშანი „-“. თუ გამოსახულება ნამდვილია, მაშინ $\frac{1}{f}$ -ის წინ „+“ ნიშანი იწერება, წარმოსახვითი გამოსახულების შემთხვევაში კი – ნიშანი „-“.

იმ შემთხვევაში, თუ ლინზას ეცემა კრებად სხივთა კონა, რომლის გაგრძელებები ერთ წერტილში იკვეთება, მაშინ $\frac{1}{d}$ -ს წინ „-“ ნიშანს წერენ. ყველა დანარჩენ შემთხვევაში $\frac{1}{d}$ -ს წინ „+“ ნიშანი იწერება.

ΔABC და $\Delta A'B'C$ -ს, აგრეთვე $\Delta A'B'F'$ -ის და $\Delta F'CM$ -ის მსგავსებების გამოყენებით თხელი ლინზის გამადიდებლობის (3) ფორმულა შეიძლება ასეც ჩავწეროთ:

$$\Gamma = \frac{f}{d} = \frac{f - F}{F}. \quad (8)$$

დასკვნები:

- საგნიდან ლინზამდე d მანძილი, გამოსახულებიდან ლინზამდე f მანძილი და ლინზის F ფოკუსური მანძილი ერთმანეთთან დაკავშირებულია თხელი ლინზის ფორმულით $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$;
- ლინზის წირითი გამადიდებლობა ეწოდება გამოსახულების წირითი ზომის შეფარდებას საგნის წირით ზომასთან:

$$\Gamma = \frac{h'}{h} = \frac{f}{d} = \frac{f - F}{F}.$$

საკონტროლო კითხვები:

1. რა შემთხვევაში იწერება თხელი ლინზის ფორმულაში $\frac{1}{F}$ -ის წინ „+“ ნიშანი? „-“ ნიშანი?
2. წარმოსახვითი გამოსახულების შემთხვევაში, რა ნიშანი იწერება $\frac{1}{f}$ -ის წინ?
3. რა შემთხვევაში იწერება თხელი ლინზის ფორმულაში $\frac{1}{d}$ -ს წინ „-“ ნიშანი?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

ლინზაში მიიღება საგნის ნამდვილი, 3-ჯერ გადიდებული გამოსახულება. თუ საგანსა და ლინზას შორის მანძილს 30 სმ-ით შევამცირებთ, მაშინ წარმოსახვით, 2-ჯერ გადიდებულ გამოსახულებას მივიღებთ. განსაზღვრეთ ლინზის ფოკუსური მანძილი.

მოცემულია: $\Gamma_1 = 3$; $d_2 = d_1 - 30$; $\Gamma_2 = 2$.
 $F = ?$

ამოხსნა: რადგან პირველ შემთხვევაში გამოსახულება ნამდვილია, ეს ნიშნავს, რომ ლინზა შემკრებია. შემოვიტანოთ აღნიშვნები და დავწეროთ ბრტყელი ლინზის ფორმულა თითოეული შემთხვევისთვის. $d_1 = d$; პირობის თანახმად, $f_1 = 3d$; $d_2 = d - 30$; ასევე, $f_2 = 2(d - 30)$.

$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{3d}$; ვინაიდან მეორე შემთხვევაში გამოსახულება წარმოსახვითია,

$\frac{1}{F} = \frac{1}{d-30} - \frac{1}{2(d-30)}$. გავუტოლოთ ამ გამოსახულების მარჯვენა ნაწილები ერთმანეთს:

$\frac{1}{d} + \frac{1}{3d} = \frac{1}{d-30} - \frac{1}{2(d-30)}$, აქედან $\frac{4}{3d} = \frac{1}{2(d-30)}$; საიდანაც $d = 48$ სმ. d -ს ეს მნიშვნელობა

შევიტანოთ პირველ ტოლობაში. მივიღებთ: $\frac{1}{F} = \frac{4}{3d} = \frac{4}{144} = \frac{1}{36}$, ანუ, $F = 36$ სმ.

პასუხი: ლინზის ფოკუსური მანძილი 36 სმ-ია.



ამოხსენით ამოცანები:

1. იპოვეთ შემკრები ლინზის ოპტიკური ძალა, თუ მისი ფოკუსური მანძილი 20 სმ-ის ტოლია.

2. გამბნევი ლინზის ფოკუსური მანძილი 0,1 მ-ია. განსაზღვრეთ მისი ოპტიკური ძალა.

3. სინათლის წერტილოვანი წყაროდან ლინზამდე და ლინზიდან წყაროს ნამდვილ გამოსახულებამდე მანძილი ერთნაირია და 30 სმ-ს უდრის. იპოვეთ ლინზის ფოკუსური მანძილი.

4. ლინზის ოპტიკური ძალა 12,5 დპტრ-ია. მისგან რა მანძილზე უნდა მოვათავსოთ საგანი, რომ მისი ნამდვილი და ორჯერ გადიდებული გამოსახულება მივიღოთ?

5. 25 სმ ფოკუსური მანძილის მქონე შემკრები ლინზიდან 20 სმ მანძილზე მოთავსებულია საგანი. ლინზიდან რა მანძილზე მიიღება საგნის გამოსახულება? როგორია ის – ნამდვილი თუ წარმოსახვითი? გადიდებული თუ შემცირებული?

6. ლინზიდან, რომლის ოპტიკური ძალა – 8 დპტრ-ია, 12,5 სმ მანძილზე მოთავსებულია საგანი. იპოვეთ მანძილი საგნის გამოსახულებიდან ლინზამდე და ლინზის წირითი გამადიდებლობა.

7. მნათი წერტილი შემკრები ლინზის ფოკუსიდან 5 სმ-ითაა დაშორებული, მისი ნამდვილი გამოსახულება კი – იმავე ფოკუსიდან 37 სმ-ით. განსაზღვრეთ ლინზის ოპტიკური ძალა.

8. გამბნევი ლინზის ფოკუსური მანძილი 16 სმ-ია. მისგან 32 სმ მანძილზე მოთავსებულია 9 სმ სიმაღლის სანთელი. განსაზღვრეთ ლინზაში მიღებული სანთლის გამოსახულების სიმაღლე.

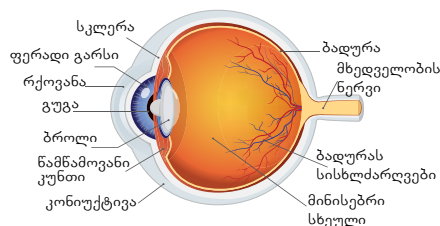
9. განსაზღვრეთ იმ ლინზის ოპტიკური ძალა, რომელიც მისგან 8 სმ-ით დაშორებული საგნის 4-ჯერ შემცირებულ, წარმოსახვით გამოსახულებას იძლევა.

10. შემკრებ ლინზაზე ეცემა სხივების კრებადი კონა, რომელთა გაგრძელებები ლინზის მთავარ ოპტიკურ ღერძზე ლინზიდან 11 სმ მანძილზე იკვეთება. თვით სხივები ლინზაში გარდატეხის შემდეგ იმავე მხარეს, ლინზიდან 5 სმ-ით დაშორებულ წერტილში იკრიბება. გამოთვალეთ ლინზის ფოკუსური მანძილი.

§ 3.12 თვალი. სათვალე

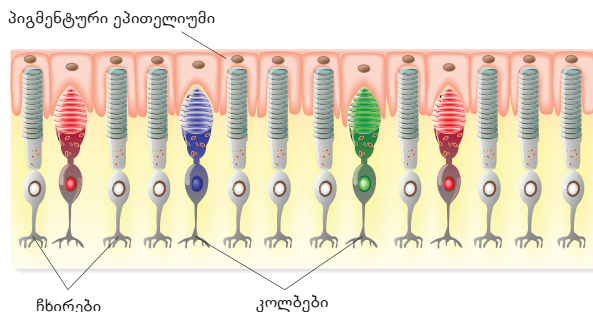
ერთ-ერთი ყველაზე დახვეწილი ოპტიკური სისტემა, რომელიც ევოლუციის პროცესში ბუნებამ შექმნა, ადამიანისა და ცხოველის თვალია. როგორია ადამიანის თვალის აგებულება და როგორ „მუშაობს“ ის?

ადამიანის თვალს თითქმის სფერული ფორმა აქვს. მისი დიამეტრი დაახლოებით 25 მმ-ია (სურ. 3.114). თვალი გარედან დაფარულია თეთრი ფერის დამცავი გარსით, რომელსაც **სკლერა** ეწოდება. სკლერის წინა, გამჭირვალე ნაწილს, საიდანაც თვალში სინათლე შედის, **რქოვანა** ეწოდება. რქოვანას უკან მოთავსებულია **ფერადი გარსი**, რომელიც განსაზღვრავს ადამიანის თვალის ფერს. მის ცენტრში არის მრგვალი ხვრელი – **გუგა**. ფერადი გარსი წარმოადგენს კუნთოვან რგოლს, რომლის საშუალებით, დაცემული სინათლის ინტენსივობის მიხედვით, რეფლექსურად იცვლება გუგას დიამეტრი, დაახლოებით 2-დან 8 მმ-დე. გუგას უკან განთავსებულია ელასტიური ლინზის მსგავსი სხეული – **ბროლი**. ახლო და შორს მყოფ სხეულებზე დაკვირვებისათვის **ნამწამოვანი კუნთის** საშუალებით შესაძლებელია ბროლის სიმრუდის ცვლილება გარკვეულ ფარგლებში. სივრცე რქოვანასა და ფერად გარსს შორის შევსებულია წყლისმსგავსი სითხით. თვალის დანარჩენი ნაწილი, მის ფსკერამდე, უჭირავს გამჭირვალე, ბლანტ **მინისებრ სხეულს**. რქოვანა, წყლისმსგავსი სითხე, ბროლი და მინისებრი სხეული ქმნის ლინზის მსგავს ოპტიკურ სისტემას, რომლის ოპტიკური ცენტრი რქოვანადან დაახლოებით 5 მმ მანძილზე მდებარეობს. თვალის ფსკერი დაფარულია ძალიან რთული აგებულების გარსით – **ბადურათი**. ის წარმოადგენს ნახევარსფეროს, რომელიც შედგება კოლბისა და ჩხირის ფორმის რეცეპტორული უჯრედებისაგან (სურ. 3.115). ბადურაში 125 მილიონი ჩხირი და 6,5 მილიონი კოლბაა.



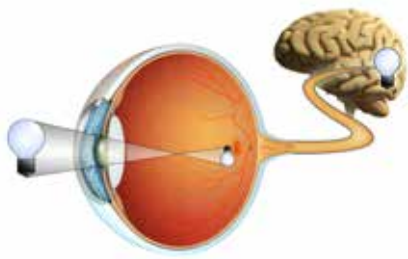
სურ.3.114

სინათლის ენერჯის გავლენით ჩხირებში გენერირდება ნერვული იმპულსი, რომელიც **მხედველობის ნერვით** ტვინს გადაეცემა. ჩხირების საშუალებით სხეულების ზომებსა და ფორმებს ვარჩევთ, მაგრამ – არა ფერს. ფერებს კოლბების საშუალებით ვარჩევთ (უფრო დანვრილებით სინათლის ფერზე შემდეგ პარაგრაფებში ვისაუბრებთ).

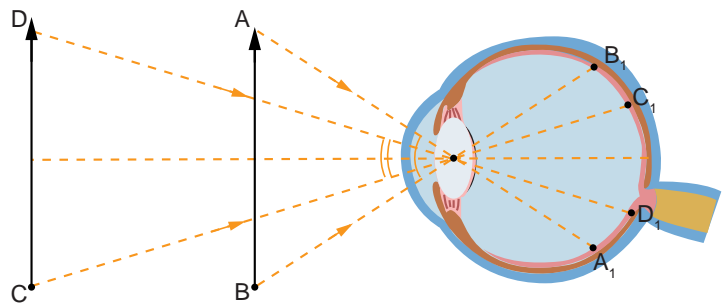


სურ. 3.115

თვალში მოხვედრილი სინათლის სხივები ყველაზე მეტად რქოვანას ზედაპირზე გარდატყდება, დამატებით გარდატყხას კი ბროლი ახორციელებს. მთლიანობაში თვალი შეიძლება განვიხილოთ როგორც ცვლადი ფოკუსური მანძილის მქონე შემკრები ლინზა, რომლიდანაც ეკრანამდე მანძილი უცვლელია. ეკრანის როლში ბადურაა, რომელზეც საგნის ნამდვილი, შემცირებული და შებრუნებული გამოსახულება მიიღება (სურ. 3.116). ჩხირები და კოლბები სხეულის გამოსახულების ცალკეულ ნაწილებს აღიქვამენ, ამიტომ რაც უფრო დიდი რაოდენობა მონაწილეობს ამ აღქმაში, საგნის მით მეტი დეტალის გარჩევაა შესაძლებელი. რაც უფრო დიდია საგნის გამოსახულება ბადურაზე, მით მეტი რეცეპტორი მონაწილეობს მის აღქმაში. რაც მეტია კუთხე, რომლითაც თვალი ხედავს საგანს, მით დიდია ბადურაზე მისი გამოსახულება (სურ. 3.117). მაგალითად, CD საგანი ბადურაზე C_1D_1 გამოსახულებას იძლევა. უფრო ახლოს მყოფი იმავე ზომის AB საგანი კი – A_1B_1 გამოსახულებას, რომლის ზომაც C_1D_1 -ის ზომაზე მეტია.



სურ. 3.116



სურ. 3.117

კუთხეს, რომელსაც საგნის კიდეებიდან თვალის ოპტიკურ ცენტრზე გამავალი წრფეები ქმნის, ხედვის კუთხე ეწოდება.

ცხადია, ხედვის კუთხე საგნის ზომებსა და საგნიდან თვალამდე მანძილზეა დამოკიდებული. როდესაც ხედვის კუთხე ერთ მინუტზე ნაკლებია, საგნის დეტალების გარჩევას თვალი ვეღარ ახერხებს – საგანი აღიქმება როგორც ერთი წერტილი.

გამოცდილებით იცით, რომ თვალს არ შეუძლია ჩვენგან სხვადასხვა მანძილზე მყოფი სხეულების ერთდროულად მკაფიოდ დანახვა. თუ 25-30 სმ-ით დაშორებულ საგნებს მკაფიოდ ხედავთ, იმავედროულად შორეულ საგნებს ბუნდოვნად დაინახავთ და პირიქით. ეს გასაგებიცაა, თუ გავისხენებთ, რომ საგნამდე მანძილის შეცვლით იცვლება ლინზიდან გამოსახულებამდე მანძილიც, მაგრამ თვალის ოპტიკური ცენტრიდან ბადურამდე მანძილის შეცვლა შეუძლებელია.

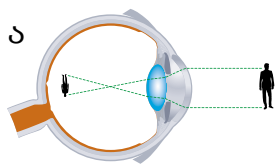
მაშ როგორ ახერხებს თვალი ახლოდან შორს (ან პირიქით) მზერის გადატანისას საგნების მკაფიოდ დანახვას? სხვადასხვა მანძილით დაშორებული საგნების მკვეთრი გამოსახულების მისაღებად იცვლება თვალის ოპტიკური სისტემის ფოკუსური მანძილი, რაც ელასტიური ბროლის სიმრუდის ცვლილებით მიიღწევა. ეს პროცესი რეფლექსურად იმდენად სწრაფად მიმდინარეობს, რომ ვერც ვამჩნევთ.

თვალის შეგუების უნარს, ბროლის სიმრუდის რადიუსის ცვლილებით, მკაფიოდ დაინახოს სხვადასხვა მანძილებზე მყოფი საგნები, აკომოდაცია ეწოდება.

შორეული საგნების ხედვისას ნორმალური თვალი არ იძაბება, რადგან საგნის ყველა წერტილიდან თვალში თითქმის პარალელური სხივები შედის. როცა საგანი თვალს უახლოვდება, ბროლის სიმრუდე იზრდება, მაგრამ სიმრუდის ზრდასაც ზღვარი აქვს. ნორმალურ თვალს დაძაბვის გარეშე შეუძლია იმ საგნების მკაფიოდ დანახვა, რომლებიც მისგან არანაკლებ 25 სმ მანძილითაა დაშორებული. თუ საგანი განთავსებულია უფრო ახლოს, მაშინ მისი მკაფიოდ დანახვისთვის საჭიროა ბროლის სიმრუდის საგანგებო ზრდა, რომლის დროსაც თვალი სწრაფად იღლება. თვალიდან საგნამდე 25 სმ-ის ტოლ მანძილს, **საუკეთესო ხედვის მანძილს** უწოდებენ.

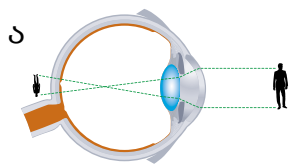
ზოგიერთი ადამიანის თვალი, დაძაბვის გარეშე, შორეული საგნის გამოსახულებას არა ბადურაზე, არამედ მის წინ იძლევა (სურ. 3.118 ა). ამ ადამიანებს არ შეუძლიათ მკვეთრად დაინახონ შორს მდებარე საგნები. მხედველობის ასეთ დეფექტს **ახლომხედველობა** ეწოდება. ახლომხედველებისათვის საუკეთესო ხედვის მანძილი 25 სმ-ზე ნაკლებია. ახლომხედველობას გამზნევილინზებიანი სათვალით ასწორებენ. ლინზაში გაშლილი სხივები ბროლში გავლის შემდეგ იკვეთებიან ბადურაზე (სურ. 3.118 ბ).

მხედველობის დეფექტს, რომლის დროსაც შორს მყოფი საგნების გამოსახულება მიიღება ბადურას უკან, **შორსმხედველობას** უწოდებენ (სურ. 3.119 ა). შორსმხედველი ადამიანებისათვის საუკეთესო ხედვის მანძილი 25 სმ-ზე მეტია. ამ დეფექტის გამოსწორებისათვის საჭიროა გამოსახულების წინ, ბადურაზე გადატანა და საუკეთესო ხედვის მანძილის შემცირება. ამისათვის უნდა გავზარდოთ ოპტიკური ძალა, რისთვისაც შემკრებლინზებიანი სათვალეს იყენებენ (სურ. 3.119 ბ).



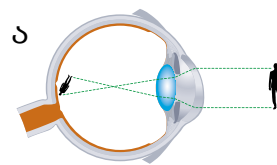
ახლომხედველობა

სურ. 3.118



შორსმხედველობა

სურ. 3.119



ასტიგმატიზმი

სურ. 3.120

მხედველობის დეფექტს, რომელიც გამოწვეულია რქოვანას, იშვიათად კი ბროლის არათანაბარი სიმრუდით, **ასტიგმატიზმს** უწოდებენ (სურ. 3.120 ა). ასტიგმატიზმის გამოსწორება შესაძლებელია ოპერაციული ჩარევით ან სპეციალური, ასტიგმატური ლინზით, რომლის სხვადასხვა უბანს განსხვავებული სიმრუდე და, შესაბამისად, სხვადასხვა ოპტიკური ძალა აქვს (სურ. 3.120 ბ).

რა უპირატესობა აქვს ორი თვალით მხედველობას – ბინოკულარულ მხედველობას?

პირველ რიგში, ის მხედველობის არეს ზრდის. ამასთან, ორი თვალით მხედველობა საშუალებას იძლევა განვასხვავოთ, რომელი სხეულია ახლოს და რომელი – შორს. საქმე ისაა, რომ მარცხენა და მარჯვენა თვალის ბადურებზე განსხვავებული გამოსახულებები მიიღება – თითქოს საგანს მარცხნიდან და მარჯვნიდან ვუყურებთ. რაც უფრო ახლოსაა სხეული, მით უფრო დიდია ეს განსხვავება. სწორედ ბინოკულარული მხედველობის გამო საგნის მოცულობრივ და არა ბრტყელ გამოსახულებას ვხედავთ.

დასკვნები:

- კუთხეს, რომელსაც საგნის კიდეებიდან თვალის ოპტიკურ ცენტრზე გამავალი წრფეები ქმნის, ხედვის კუთხე ეწოდება;
- თვალის შეგუების უნარს, ბროლის სიმრუდის რადიუსის ცვლილებით, მკაფიოდ დაინახოს სხვადასხვა მანძილებზე მყოფი საგნები, აკომოდაცია ეწოდება.
- თვალიდან საგნამდე 25 სმ-ის ტოლ მანძილს, საუკეთესო ხედვის მანძილს უწოდებენ;
- მხედველობის დეფექტს, რომლის დროსაც შორს მყოფი საგნების გამოსახულება მიიღება ბადურას წინ, ახლომხედველობას უწოდებენ;
- მხედველობის დეფექტს, რომლის დროსაც შორს მყოფი საგნების გამოსახულება მიიღება ბადურას უკან, შორსმხედველობას უწოდებენ;
- მხედველობის დეფექტს, რომელიც გამოწვეულია რქოვანას ან ბროლის არათანაბარი სიმრუდით, ასტიგმატიზმი ეწოდება.

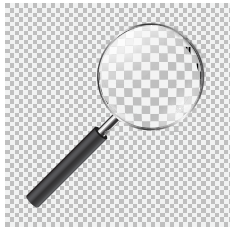
საკონტროლო კითხვები:

1. რა ფუნქცია აქვს წამწამოვან კუნთს?
2. რის საშუალებით გადაეცემა ნერვული იმპულსი ბადურადან თავის ტვინს?
3. თვალის რომელ ნაწილში გარდატყდება ყველაზე მეტად სინათლის სხივი?
4. რატომ იცვლის თვალის ბროლი სიმრუდეს?
5. როგორი ლინზით ახდენენ ახლომხედველობის კორექციას?
6. როგორი ლინზით ახორციელებენ ასტიგმატიზმის კორექციას?

§ 3.13 ოპტიკური ხელსაწყოები

ხშირად გვჭირდება რაიმე საგნის მცირე დეტალების გარჩევა ან შორს მყოფი სხეულების კარგად დანახვა. ამისათვის კი საკმარისად დიდი ხედვის კუთხეა საჭირო. ხედვის კუთხე მცირეა, როდესაც სხეული ჩვენგან საკმაოდ შორსაა ან ახლოსაა, მაგრამ მცირე ზომის არის. ხედვის კუთხის გასადიდებლად, ორივე შემთხვევაში ოპტიკური ხელსაწყოები გამოიყენება. დანიშნულების მიხედვით ისინი იყოფა ორ ჯგუფად: ხელსაწყოებად, რომლებიც გამოიყენება მცირე ზომის სხეულების დასათვალიერებლად და ხელსაწყოებად, რომელთა საშუალებით შორეულ სხეულებს ვაკვირდებით.

პირველ ჯგუფს მიეკუთვნება ლუპა (სურ. 3.121) და მიკროსკოპი (სურ. 3.122), მეორე ჯგუფს კი – ტელოსკოპი (სურ. 3.123), ტელესკოპი (სურ. 3.124) და სხვა. ყველა ამ ხელსაწყოს საერთო თვისება ის არის, რომ მათში მიღებული გამოსახულება წარმოსახვითია.



სურ. 3.121



სურ. 3.122



სურ. 3.123



სურ. 3.124

ოპტიკური ხელსაწყოთი საგნის დაკვირვებისას ხედვის კუთხის შეფარდებას შეუიარაღებელი თვალით დაკვირვებისას ხედვის კუთხესთან, ამ ხელსაწყოს კუთხურ გამადიდებლობას უწოდებენ.

ხედვის კუთხე ოპტიკური ხელსაწყოს მახასიათებელია. იმ კუთხის ტანგენსი, რომლითაც საუკეთესო ხედვის მანძილზე მოთავსებულ საგანს შეუიარაღებელი თვალით ვხედავთ, ტოლია:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{h}{d_0},$$

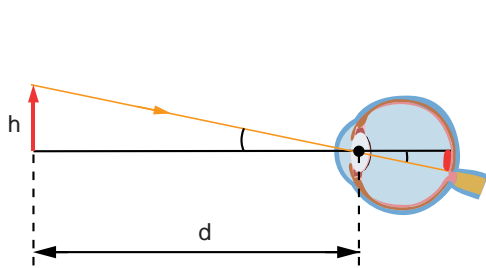
რომელშიც $d_0 = 25$ სმ საუკეთესო ხედვის მანძილია, h კი – საგნის წირითი ზომა (სურ. 3.125).

მცირე კუთხეების შემთხვევაში $\operatorname{tg}\varphi = \varphi$, ამიტომ

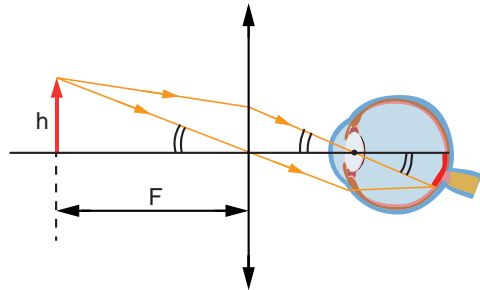
$$\varphi = \frac{h}{d_0}. \quad (1)$$

მცირე ზომის სხეულების დათვალიერებისას ხედვის კუთხის გასაზრდელად გამოიყენება ოპტიკური ხელსაწყო – **ლუპა**. ის წარმოადგენს მცირე ფოკუსური მანძილის

(არა უმეტეს 10 სმ) მქონე შემკრებ ლინზას. ლუპას თვალთან ახლოს, ხოლო დასათვალიერებელ საგანს მის ფოკალურ სიბრტყეში ათავსებენ. ასეთ შემთხვევაში საგნის ნებისმიერი წერტილიდან წამოსული სხივები, ლუპაში გავლის შემდეგ პარალელური, ამიტომ თვალის დაძაბვის გარეშე ბადურაზე საგნის მკვეთრი გამოსახულება მიიღება (სურ. 3.126).



სურ. 3.125



სურ. 3.126

ლუპაში საგნის ხედვის კუთხე ტოლია:

$$\varphi_1 = \frac{h}{F}. \quad (2)$$

ტოლობა (2)-ის ტოლობა (1)-ზე გაყოფით, მივიღებთ ლუპის კუთხურ გამადიდებლობას:

$$\Gamma = \frac{\varphi_1}{\varphi} = \frac{d_0}{F}.$$

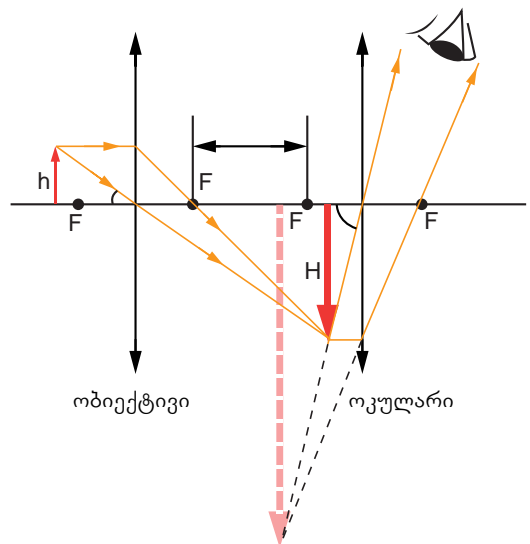
თუ საგანს ლუპიდან ფოკალურ სიბრტყეზე უფრო ახლოს მოვათავსებთ, მეტ გამადიდებლობას მივიღებთ, მაგრამ ეს თვალის დაძაბვას გამოიწვევს.

რაც უფრო მცირეა ლუპის ფოკუსური მანძილი, მით მეტია მისი გამადიდებლობა, მაგრამ პრაქტიკაში 2 სმ-ზე ნაკლები ფოკუსური მანძილის მქონე ლუპები არ გამოიყენება. საქმე ისაა, რომ ასეთი მოკლეფოკუსიანი ლუპები ზომით პატარაა და ამასთან გამოსახულების სერიოზულ დამახინჯებას იწვევს. ჩვეულებრივ, კარგი ლუპების გამადიდებლობა ხუთიდან ათამდე დიაპაზონშია.

ხშირად საგნის ათჯერ გადიდებაც კი არ არის საკმარისი. ასეა, მაგალითად: მედიცინაში სისხლის გამოკვლევისას, მიკროელექტრონიკაში პროცესორების ხარისხის შემოწმებისას და მრავალ სხვა შემთხვევაში.

უფრო მეტი გამადიდებლობის მისაღებად გამოიყენება **ოპტიკური მიკროსკოპი**. ის წარმოადგენს ორი მოკლეფოკუსიანი ლინზისაგან შემდგარ ოპტიკურ სისტემას. ლინზას, რომელიც უფრო ახლოსაა საგანთან, **ობიექტივი** ეწოდება, ხოლო ლინზას, რომელიც ახლოს არის თვალთან – **ოკულარი**. ობიექტივისა და ოკულარის მთავარი ოპტიკური ღერძები ერთმანეთს ემთხვევა. მიკროსკოპში სხივთა სვლა ნაჩვენებია სურ. 3.127-ზე.

ობიექტივისა და ოკულარის ფოკუსური მანძილები გაცილებით მცირეა ობიექტივის უკანა ფოკუსსა და ოკულარის წინა ფოკუსს შორის δ მანძილზე, ამიტომ შეიძლება მივიჩნიოთ, რომ $\delta + F_1 \approx \delta$. h სიმაღლის საგანს ობიექტივიდან F_1 -ზე მეტი მანძილით, მაგრამ ფოკუსთან ახლოს ათავსებენ. შედეგად,



სურ. 3.127

ობიექტივში საგნის ნამდვილი, გადიდებული და შებრუნებული გამოსახულება მიიღება. ლინზები ისე უნდა შეირჩეს, რომ ეს გამოსახულება ოკულარსა და მის ფოკუსს შორის, ფოკუსთან ახლოს განთავსდეს. ამ შემთხვევაში ოკულარი საგნის ძალიან გადიდებულ და წარმოსახვით გამოსახულებას მოგვცემს. როგორც სურათიდან ჩანს,

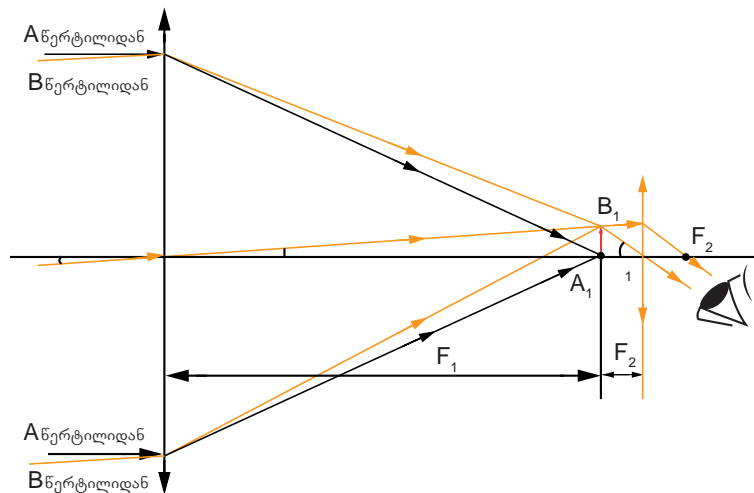
$$\frac{H}{h} \approx \frac{\delta + F_1}{F_1} \approx \frac{\delta}{F_1}.$$

ეს თანაფარდობა მიკროსკოპის კუთხური გამადიდებლობის განსაზღვრისთვის შეიძლება გამოვიყენოთ:

$$\Gamma = \frac{\text{tg}\varphi_1}{\text{tg}\varphi} = \frac{H}{F_2} : \frac{h}{d_0} \approx \frac{\delta h}{F_1 F_2} : \frac{h}{d_0} = \frac{\delta d_0}{F_1 F_2}$$

მ-ს, F_1 -ის და F_2 -ის შერჩევით შეიძლება მიღწეულ იქნას 500-დან 1000-მდე გამადიდებლობა. ეს ოპტიკური მიკროსკოპისათვის ზღვრული გამადიდებლობაა.

დაშორებულ ობიექტებზე – ციურ სხეულებზე დაკვირვებისათვის იყენებენ **ტელესკოპს**. არსებობს ორი სახის ტელესკოპი: **რეფრაქტორი** და **რეფლექტორი**. განვიხილოთ სხივთა სვლა რეფრაქტორში. ისევე როგორც მიკროსკოპში, მასში ორი ლინზა გამოიყენება (სურ. 3.128). ტელესკოპის ოპტიკურ სისტემას ისე ამზადებენ, რომ ობიექტივის უკანა ფოკუსი ოკულარის წინა ფოკუსს ემთხვეოდეს.



სურ. 3.128

შედეგად, მაქსიმალური კუთხური გამადიდებლობა მიიღწევა. უსასრულოდ დაშორებული საგნის A_1B_1 გამოსახულება, პრაქტიკულად ფოკალურ სიბრტყეში მიიღება ($A_2B_2 = h$). ოკულარით მიღებული გამოსახულების კუთხური გამადიდებლობა ტოლი იქნება:

$$\Gamma = \frac{\text{tg}\varphi_1}{\text{tg}\varphi} = \frac{h}{F_2} : \frac{h}{F_1} = \frac{F_1}{F_2}.$$

ამ ფორმულიდან ჩანს, რომ დიდი კუთხური გამადიდებლობის მისაღებად საჭიროა რეფრაქტორს გრძელფოკუსიანი ობიექტივი და მოკლეფოკუსიანი ოკულარი ჰქონდეს. ტელესკოპები დაშორებული ობიექტების მნიშვნელოვან კუთხურ გამადიდებლობას იძლევა.

ძალიან დაშორებულ ვარსკვლავებზე დაკვირვებისას ხედვის კუთხე შეიძლება 1'-ზე ნაკლები იყოს, მაგრამ დიდი ობიექტივის მქონე ტელესკოპით გუგაზე სინათლის დიდი ნაკადი კონცენტრირდება, რის გამოც თვალი ასეთ ვარსკვლავს მაინც არჩევს. ტექნიკურად დიდი დიამეტრის ლინზის დამზადება საკმაოდ რთულია. აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის რეფრაქტორის ლინზის დიამეტრი 40 სმ-ია.

რეფრაქტორისაგან განსხვავებით, რეფლექტორში ჩაზნექილი და ბრტყელი სარკეები გამოიყენება.

დასკვნები:

- ოპტიკური ხელსაწყოთი საგნის დაკვირვებისას ხედვის კუთხის შეფარდებას შეუიარაღებელი თვალით დაკვირვებისას ხედვის კუთხესთან, ამ ხელსაწყოს კუთხურ გამადიდებლობას უწოდებენ;
- ლუპა წარმოადგენს მცირე ფოკუსური მანძილის (არა უმეტეს 10 სმ) მქონე შემკრებ ლინზას. მისი კუთხური გამადიდებლობა $\Gamma = \frac{d_0}{F}$;
- მიკროსკოპის კუთხური გამადიდებლობა განისაზღვრება ფორმულით: $\Gamma \approx \frac{\delta d_0}{F_1 F_2}$;
- რეფრაქტორის კუთხური გამადიდებლობა ტოლია: $\Gamma = \frac{F_1}{F_2}$.

საკონტროლო კითხვები:

1. ლუპიდან რა მანძილზე ათავსებენ საგანს?
2. რომელ ლინზას უწოდებენ ობიექტივს? ოკულარს?
3. მიკროსკოპის ობიექტივით მიღებული გამოსახულება ნამდვილია თუ წარმოსახვითი? ოკულარით მიღებული?
4. რეფრაქტორის დიდი კუთხური გამადიდებლობის მისაღებად, როგორ არჩევენ ობიექტივსა და ოკულარს?

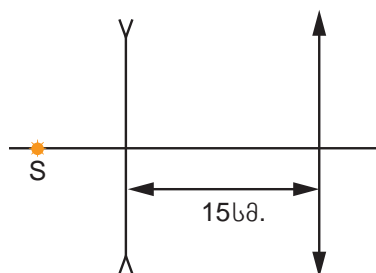


ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

სურ. 3.129-ზე გამოსახული ლინზებიდან შემკრები ლინზის ოპტიკური ძალა 8 დიოპტრია, ხოლო გამბნევი ლინზისა -5 დიოპტრია. იპოვეთ მანძილი ლინზებში მიღებულ გამოსახულებებს შორის, თუ მნათი წერტილი გამბნევი ლინზიდან 20 სანტიმეტრითაა დაშორებული და ლიზებს შორის მანძილი 15 სმ-ია.

მოცემულია: $D_1 = -5$ დპტრ; $D_2 = 8$ დპტრ; $d_1 = 20$ სმ; $l = ?$

ამოხსნა: პირველ რიგში, ვიპოვოთ თითოეული ლინზის ფოკუსური მანძილი. $F = \frac{1}{D}$ ფორმულის თანახმად, გამბნევი ლინზის ფოკუსური მანძილია $F_1 = 20$ სმ, შემკრები ლინზისა კი - $F_2 = 12,5$ სმ. ოპტიკურ სისტემაში გამოსახულების ასაგებად ვიქცევით შემდეგნაირად: ჯერ ვაგებთ



სურ. 3.129

პირველ ოპტიკურ ხელსაწყოში (ოპტიკური ხელსაწყო, რომელსაც სინათლის წყაროდან წამოსული სინათლე ეცემა) საგნის გამოსახულებას ისე, თითქოს მეორე ხელსაწყო არ არსებობდეს. შემდეგ მეორე ოპტიკურ ხელსაწყოში ვაგებთ პირველ ოპტიკურ ხელსაწყოში მიღებული გამოსახულების (მეორე ოპტიკური ხელსაწყოთვის ის უკვე საგანია) გამოსახულებას. დავწეროთ ლინზის ფორმულა ჯერ გამბნევი ლინზისათვის:

$$\frac{1}{F_1} = \frac{1}{d_1} - \frac{1}{f_1}, \text{ საიდანაც } f_1 = 10 \text{ სმ. შემკრები ლინზისთვის საგანი ნამდვილია, რადგან მას}$$

დაეცემა სხივების განშლადი კონა. ამ ლინზიდან საგანი მოთავსებული იქნება $f_2 = 25$ სმ მანძილზე, რაც ორმაგი ფოკუსური მანძილია. ადვილია დასაბუთება, რომ ორმაგ ფოკუსურ მანძილზე მოთავსებული საგანი შემკრებ ლინზაში ისევ ორმაგ ფოკუსში მიიღება და იგი ნამდვილია. შედეგად ვღებულობთ, რომ პირველ ლინზაში გამოსახულება ლინზიდან 10 სმ მანძილზეა მისგან მარცხენა მხარეს, ხოლო მეორე ლინზაში მიღებული გამოსახულება მეორე ლინზიდან 25 სმ მანძილზეა მისგან მარჯვენა მხარეს. ანუ გამოსახულებებს შორის მანძილი $l = 10 + 15 + 25 = 50$ სმ იქნება.

პასუხი: გამოსახულებებს შორის l მანძილი 50 სმ-ის ტოლია.



ამოხსენით ამოცანები:

1. რისი ტოლია ლუპის კუთხური გამაღიებლობა, თუ მისი ფოკუსური მანძილი 5 სმ-ია?

2. განსაზღვრეთ ლუპის ფოკუსური მანძილი, თუ მისი კუთხური გამაღიებლობა 4-ის ტოლია.

3. ოპტიკურ მიკროსკოპში, რომლის წირითი გამაღიებლობა 200-ის ტოლია, ობიექტივის უკანა და ოკულარის წინა ფოკუსს შორის მანძილი 20 სმ-ია. იპოვეთ ოკულარის ფოკუსური მანძილი, თუ ობიექტივის ფოკუსური მანძილი 1 სმ-ია.

4. განსაზღვრეთ იმ ოპტიკური მიკროსკოპის გამაღიებლობა, რომელშიც ობიექტივის უკანა და ოკულარის წინა ფოკუსს შორის მანძილი 30 სმ-ია, ხოლო ობიექტივისა და ოკულარის ფოკუსური მანძილები, შესაბამისად, $F_1 = 5$ მმ და $F_2 = 20$ მმ-ია.

5. იპოვეთ რეფრაქტორის კუთხური გამაღიებლობა, თუ ცნობილია, რომ მისი ობიექტივის ფოკუსური მანძილი 500 სმ-ია, ოკულარისა კი – 4 მმ.

6. რეფრაქტორის ოკულარის ფოკუსური მანძილი 12 მმ-ია. რა ფოკუსური მანძილის მქონე ობიექტივია მასში მოთავსებული, თუ ტელესკოპის გამაღიებლობა 800-ის ტოლია?

7. მანძილი შემკრები ლინზიდან ბრტყელ სარკემდე ლინზის ფოკუსურ მანძილზე მეტია. ნამდვილი იქნება თუ წარმოსახვითი გამოსახულება ლინზაში იმ გამოსახულებიდან, რომელსაც სარკეში მისგან უფრო შორს დანთებული სანთელი იძლევა? პასუხი დაასაბუთეთ.

8. 16 სმ და 14 სმ ფოკუსური მანძილების მქონე ორ შემკრებ ლინზას საერთო მთავარი ოპტიკური ღერძი აქვს. რა მანძილზე უნდა იყოს ეს ლინზები ერთმანეთისაგან დაშორებული, რომ ერთ-ერთ მათგანზე დაცემული მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური სხივები ლინზებში გარდატეხის შემდეგ კვლავ მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური იყოს?

9. საერთო მთავარი ოპტიკური ღერძის მქონე ორ შემკრებ ლინზას შორის მანძილი 40 სმ-ია. პირველი ლინზის ფოკუსური მანძილი 15 სმ-ია, ხოლო მეორე ლინზის ოპტიკური ძალა 12,5 დპტრ-ია. ლინზებს გარეთ, პირველიდან 30 სმ მანძილზე მოთავსებულია სინათლის წერტილოვანი წყარო. მეორე ლინზიდან რა მანძილზე შეიკრიბება მასში გარდატეხილი სხივები?

10. საერთო მთავარი ოპტიკური ღერძის მქონე ორ შემკრებ ლინზას შორის მანძილი 60 სმ-ია. პირველი ლინზის ფოკუსური მანძილი 24-სმ-ია, მეორისა კი – 21 სმ. ლინზებს შორის, პირველიდან 32 სმ მანძილზე მოთავსებულია სინათლის წერტილოვანი წყარო. იპოვეთ მანძილი ლინზებში მიღებულ სინათლის წყაროს პირველად გამოსახულებებს შორის.

პირველი მიკროსკოპი 1590 წელს ჰოლანდიელმა სათვალის ხელოსანმა **ჰანს იანსენმა** და მისმა შვილმა **ზაქარია იანსენმა** შექმნეს.

1609 წელს **გალილეო გალილეიმ** დაამზადა მიკროსკოპი, რომელშიც ამოზნექილი და ჩაზნექილი ლინზები გამოიყენა. თავის გამოგონებას მან ოკიოლინო (იტალ. „პატარა თვალი“) უწოდა. 1625 წელს გალილეის მეგობარმა, **ჯოვანი ფაბერმა** პირველად გამოიყენა ტერმინი „მიკროსკოპი“.

1674 წელს ჰოლანდიელმა ქსოვილებით მოვაჭრემ და თვითნასწავლმა მეცნიერმა **ანტონი ვან ლევენჰუკმა** გააუმჯობესა მიკროსკოპი და შეძლო ერთუჯრედიანი ორგანიზმების დანახვა. მის მიკროსკოპს საკმაოდ მარტივი კონსტრუქცია ჰქონდა: ის წარმოადგენდა ლითონის ორ ფირფიტას შორის მოთავსებულ ლინზას (სურ. 3.130). ლევენჰუკის დამზადებული ლინზები ხარისხით მე-17 საუკუნის სხვა ხელოსნების მიერ დამზადებულ ლინზებს ბევრად აღემატებოდა, ამიტომ მისი მიკროსკოპების საშუალებით შესაძლებელი იყო საგნის 150 დან 300-მდე გადიდება.



სურ. 3.130



სურ. 3.131

ჭოგრითის გამოგონების თარიღად თვლიან 1607 წელს, როდესაც ჰოლანდიელმა სათვალის ხელოსანმა **იოან ლიპერსგიმ** ჰააგაში თავისი გამოგონების დემონსტრირება მოაწყო.

გალილეო გალილეიმ პირველმა მიმართა ჭოგრითი ცისკენ და შექმნა პირველი ტელესკოპი, რომლის გამადიდებლობა მხოლოდ 3-ის ტოლი იყო, მაგრამ მაღალი ხარისხის გამოსახულებას იძლეოდა. მოგვიანებით მან ტელესკოპის გამადიდებლობა 32-მდე გაზარდა. ამ ხელსაწყოს სიგრძე 1 მეტრი, ხოლო ობიექტივის დიამეტრი 4,5 სმ იყო. ტერმინი „ტელესკოპი“ პირველად ბერძენმა მათემატიკოსმა, **იოანის დიმისიანოსმა** შემოიღო.

პირველი ტელესკოპ-რეფლექტორი, რომელიც ობიექტის მაღალი ხარისხის გამოსახულებას იძლეოდა, **ისაკ ნიუტონმა** შექმნა. მისი ხელსაწყო წარმოადგენდა სარკეების სისტემას, რომელიც დაშორებული ობიექტების გამოსახულების მისაღებად სინათლეს აფოკუსირებდა და ოკულარს გადასცემდა (სურ. 3.131).

§ 3.14 ფოტოაპარატი

„გაილიმეთ, ვიღებ!“ – ეს ფრაზა ალბათ თითოეულ თქვენგანს მოუსმენია. როგორ ხდება სურათის გადაღება? როგორ არის მონწყობილი ფოტოაპარატი?



სურ. 3.132

XIX საუკუნის 30-იანი წლებიდან დღემდე ფოტოგრაფიამ განვითარების დიდი გზა განვლო. ძველი ფოტოაპარატებისაგან (სურ. 3.132) განსხვავებით, თანამედროვე ფოტოაპარატი (სურ. 3.133) რთული ელექტრული მონწყობილობაა, თუმცა ყველა ფოტოაპარატის მოქმედების პრინციპი ერთი და იგივეა.



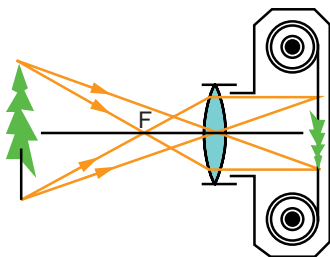
სურ. 3.133

ფოტოაპარატის ძირითადი ნაწილებია გაუმჭვირვალე კამერა და ლინზათა სისტემა, რომელსაც **ობიექტივს** უწოდებენ. უმარტივეს ობიექტივს წარმოადგენს ერთი შემკრები ლინზა. კამერის უკანა კედელთან ობიექტივი ქმნის საგნის ნამდვილ და შებრუნებულ გამოსახულებას. უმეტეს შემთხვევაში საგანი ობიექტივის ორმაგ ფოკუსს გარეთ იმყოფება, ამიტომ მიღებული გამოსახულება შემცირებული ზომისაა (სურ.3,134). იმ ადგილზე, სადაც მიიღება გამოსახულება, ათავსებენ **ფოტოფირფიტას** (ფოტოფირს) ან **გამოსახულების სენსორს (image sensor)**. ფოტოფირფიტა დაფარულია შუქმგრძნობიარე ნივთიერებით – **ფოტოემულსით**, რომელზეც სინათლის ენერგიის მოხვედრა ქიმიურ ცვლილებებს და, შესაბამისად გამოსახულების დაფიქსირებას იწვევს. გამოსახულების სენსორი (მატრიცა) არის ნახევარგამტარული ფირფიტა, რომელზეც განლაგებულია ფოტოდiodების დიდი რაოდენობა. მატრიცის თითოეული ელემენტი მასზე სინათლის ნაკადის დაცემისას გამოსახულების ერთფეროვან კვადრატს – **პიქსელს** ქმნის. ამის მიზეზია სინათლის დაცემისას ფოტოდiodში ელექტრული მუხტის გარჩენა. სენსორიდან მიღებული ინფორმაცია ელექტრული იმპულსების საშუალებით გადაეცემა ანალოგურ-ციფრულ გარდამქმნელს, რომელშიც გამოსახულება ციფრულ კოდად გარდაიქმნება.

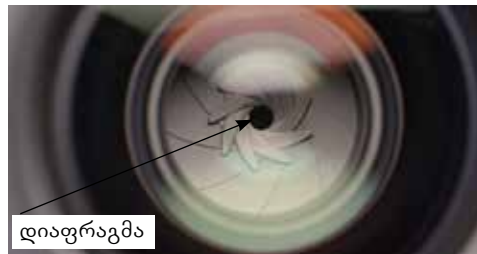
გადასაღები საგანი ფოტოაპარატიდან სხვადასხვა მანძილზე შეიძლება მდებარეობდეს, ამიტომ მკაფიო გამოსახულების მისაღებად საჭიროა, ვცვალოთ მანძილი ობიექტივსა და შუქმგრძნობიარე ელემენტს შორის. ჩვეულებრივ, ეს ობიექტივის გადაადგილებით ხორციელდება.

შუქმგრძნობიარე ელემენტზე დაცემული სინათლის ენერგიის რაოდენობა რეგულირდება ფოტოგრაფიული ჩამკეტით. ის სინათლეს ატარებს მხოლოდ დროის გარკვეულ შუალედში, რომელსაც **ექსპოზიციის დრო** ეწოდება. ეს დრო დამოკიდებულია ფოტოემულსის ან მატრიცის შუქმგრძნობელობასა და განათებულობაზე. უკანასკნელი განისაზღვრება ობიექტივის შუქძალით – $\frac{D^2}{F^2}$, რომელშიც D ობიექტივის დიამეტრია, ხოლო F – მისი ფოკუსური მანძილი.

ობიექტივის მოქმედი ნაწილის დიამეტრის შეცვლა შესაძლებელია დიაფრაგმით, რომელიც ობიექტივთან ახლოსაა მოთავსებული (სურ. 3.135). ეს ცვლილება შუქმგრძნობიარე ელემენტზე დაცემული სინათლის ენერგიის რაოდენობას არეგულირებს.

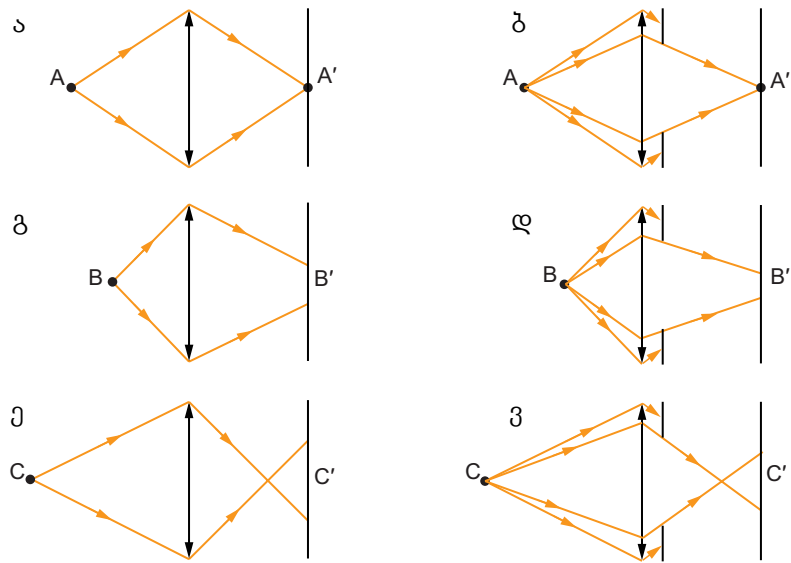


სურ. 3.134



სურ. 3.135

დიაფრაგმას სხვა დანიშნულებაც აქვს. ვთქვათ, ფოტოს ვულვებზე **A** მნათი წერტილს, რომელიც ფოტოაპარატიდან ისეთი მანძილითაა დაშორებული, რომ მისი გამოსახულება **A'** წერტილის სახით მიიღება (სურ. 3.136 ა). მაშინ ობიექტივიდან უფრო ახლოს მდებარე **B** მნათი წერტილის (სურ. 3.136 გ) ან უფრო შორს მდებარე **C** მნათი წერტილის (სურ. 3.136 ე) გამოსახულებები პატარა წრეების სახით მიიღება. თუ დიაფრაგმით ობიექტივის მოქმედი ნაწილის დიამეტრს შევამცირებთ (სურ. 3.136 ბ, დ, ვ), მაშინ მიღებული წრეების დიამეტრებიც შემცირდება (სურ. 3.136 დ, ვ), ანუ გამოსახულება უფრო მკვეთრი გახდება. მაშასადამე, დიაფრაგმის ზომის შემცირებით შეიძლება ფოტოაპარატიდან სხვადასხვა მანძილით დაშორებული წერტილების გამოსახულებები საკმაოდ მკვეთრი გავხადოთ, ანუ გავზარდოთ **სიმკვეთრის სიღრმე**.



სურ. 3.136

გარდა იმისა, რომ ფოტოგრაფია მნიშვნელოვანია ყოველი ადამიანის ცხოვრებაში, მას უდიდესი როლი აქვს სამყაროს შემეცნებაში. ფოტოგრაფია საშუალებას იძლევა დავაფიქსიროთ სხვადასხვა ობიექტი – მიკროსკოპული ზომის, კოსმოსური, თვალისათვის უხილავი და მრავალი სხვა. მხატვრული ფოტოგრაფია ხელოვნების დამოუკიდებელ სფეროდ იქცა. აღსანიშნავია, რომ ხელოვნების ისეთი მნიშვნელოვანი დარგი, როგორც კინოა, ფოტოგრაფიიდან იღებს სათავეს.

- დასკვნები:**
- ფოტოაპარატში საგნის ნამდვილი და შებრუნებული გამოსახულება მიიღება;
 - ფოტოაპარატში გამოსახულება შუქმგრძნობიარე ფირფიტაზე (ფოტოფირზე) ან მგრნობიარე სენსორზე ფიქსირდება;
 - დროის შუალედს, რომლის განმავლობაში ფოტოაპარატის ჩამკეტი ღიაა, ექსპოზიციის დრო ეწოდება.

- საკონტროლო კითხვები:**
1. რა არის პიქსელი?
 2. რა გზით მიიღება შუქმგრძნობიარე ელემენტზე საგნების მკაფიო გამოსახულება, როდესაც სხვადასხვა მანძილით დაშორებულ საგნებს ვიღებთ?
 3. რაზეა დამოკიდებული ექსპოზიციის დრო?
 4. რა დანიშნულება აქვს დიაფრაგმას?

§ 3.15 სინათლის დისპერსია

ყველას გინახავთ ბუნების მშვენიერი მოვლენა – ცისარტყელა (სურ. 3.137). რატომ და რა პირობებში წარმოიქმნება ის? რატომ არის ბუნებაში ფერთა ასეთი პალიტრა?

ტელესკოპის გაუმჯობესებაზე მუშაობისას ისააკ ნიუტონმა შეამჩნია, რომ ობიექტივში მიღებული გამოსახულება კიდეებში შეფერადებული იყო. ლინზაში მიღებული გამოსახულების შეფერადებას ადრეც აკვირდებოდნენ, მაგრამ ნიუტონმა ამ მოვლენის შესწავლა პირველმა დაიწყო. შეფერადებული კიდეები ჰქონდა ასევე იმ საგნების გამოსახულებებს, რომლებსაც პრიზმით აკვირდებოდნენ.

ნიუტონის მიერ ჩატარებული ცდა საკმაოდ მარტივი იყო: ფანჯრის დარაბაში გაკეთებული პატარა ხვრელიდან ჩაბნელებულ ოთახში შემოსული მზის სინათლის ვიწრო კონა, მან მინის სამკუთხა პრიზმისაკენ მიმართა. პრიზმაზე დაცემული სინათლის კონა გარდატყდებოდა და მოპირდაპირე კედელზე (ეკრანზე) წაგრძელებულ გამოსახულებას – ცისარტყელას შეფერილობის ზოლს იძლეოდა (სურ. 3.138). ამ ზოლში ნიუტონმა გამოყო შვიდი ფერი: იისფერი, ლურჯი, ცისფერი, მწვანე, ყვითელი, ნარინჯისფერი და წითელი (სურ. 3.139). ცისარტყელისებრ ზოლს ნიუტონმა **სპექტრი** (ლათ. spectrum –ხილვა) უწოდა.



სურ. 3.137



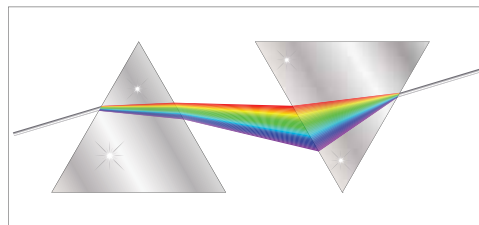
სურ. 3.138



სურ. 3.139

ხვრელის წითელი მინით დაფარვისას ნიუტონი კედელზე მხოლოდ წითელ ლაქას აკვირდებოდა, მწვანე მინით დაფარვისას – მწვანეს, ლურჯი მინით დაფარვისას – ლურჯს და ა.შ. აქედან გამომდინარეობდა, რომ პრიზმა თეთრ სინათლეს კი არ აფერადებდა, არამედ შლიდა მას შემადგენელ ფერებად.

მაშასადამე, **თეთრ სინათლეს რთული სტრუქტურა აქვს**: მისგან შეიძლება გამოიყოს სხვადასხვა ფერის სინათლის კონები და მხოლოდ მათი ერთობლივი ქმედება აღიქმევა ჩვენი თვალის მიერ როგორც თეთრი. მართლაც, თუ პრიზმიდან გამოსულ სინათლეს 180° -ით შებრუნებულ მეორე პრიზმას დავუხვედრებთ, სპექტრის ყველა კონა შეიკრიბება და კვლავ თეთრ სინათლეს მივიღებთ (სურ. 3.140). ასევე, თუ სპექტრიდან ერთ რომელიმე ფერს, მაგალითად, მწვანეს, გამოვყოფთ და პრიზმაში გავატარებთ, კვლავ მწვანე ფერის სინათლეს მივიღებთ, ანუ სპექტრად დაშლას ვეღარ დავაკვირდებით.

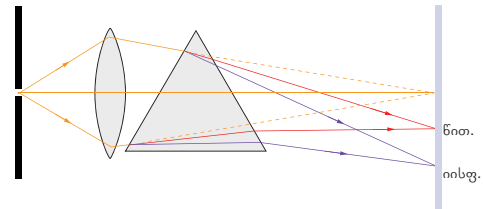


სურ. 3.140

ცდების შედეგების ანალიზის საფუძველზე ნიუტონმა დაასკვნა, რომ „**ფერით განსხვავებული სინათლის კონები განსხვავდებიან გარდატეხის ხარისხით**“, ანუ, მინის გარდატეხის მაჩვენებელი სხვადასხვა ფერის სინათლისათვის განსხვავებულია. ყველაზე მეტად გარდატყდება იისფერი სინათლე, ყველაზე ნაკლებად კი – წითელი.

გარდატეხის მაჩვენებლის დამოკიდებულებას სინათლის ფერზე სინათლის დისპერსია(ლათ. dispersio – გაბნევა) ეწოდება.

ნიუტონის მიერ მიღებულ სპექტრში ფერადი მრგვალი ლაქები ერთმანეთს ნაწილობრივ ფარავდნენ. განცალკევებული მკვეთრი ფერების მისაღებად ნიუტონი მრგვალი ხვრელის მაგივრად სინათლის ძლიერი წყაროთი განათებულ ვიწრო ჭვრიტეს იყენებდა, რომლის უკან ლინზას ათავსებდა. ლინზის მდებარეობის შერჩევით იგი ეკრანზე ჭვრიტეს მკვეთრ გამოსახულებას იღებდა ვიწრო თეთრი ზოლის სახით. ლინზის შემდეგ ნიუტონი სინათლეს პრიზმას უხვედრებდა და ეკრანზე იღებდა სპექტრს სუფთა ფერებით (სურ. 3.141).



სურ. 3.141

როგორც იცით, გარემოს გარდატეხის n აბსოლუტური მაჩვენებელი ამ გარემოში სინათლის გავრცელების v სიჩქარესთან დაკავშირებულია ფორმულით:

$$n = \frac{c}{v},$$

რომელშიც c სინათლის სიჩქარეა ვაკუუმში.

ვინაიდან იისფერი სინათლე ყველაზე მეტად გარდატყდება, ამიტომ გარემოში ის ყველაზე ნაკლები სიჩქარით ვრცელდება, წითელი სინათლე კი პირიქით – ყველაზე მეტით. სწორედ ამიტომ შლის პრიზმა თეთრ სინათლეს შემადგენელ ფერებად. ვაკუუმში კი სხვადასხვა ფერის სინათლე ერთნაირი სიჩქარით ვრცელდება.



გაიხსენეთ, რომ ცისარტყელა წარმოიქმნება ნაწილობრივ მზიან ამინდში წვიმის დროს, როცა მზე გადახრილია და შეეცადათ პასუხი გასცეთ პარაგრაფის დასაწყისში დასმულ კითხვას.

თეთრი სინათლის რთული სტრუქტურით შესაძლებელია ავხსნათ ბუნების ფერთა სიმრავლეც. თუ სხეული მასზე დაცემულ ყველა ფერის სინათლეს მთლიანად აირეკლავს, მაშინ მას თეთრად აღვიქვამთ, ხოლო თუ ყველა ფერის სინათლეს შთანთქავს, მას შავად აღვიქვამთ (ვერ ვხედავთ). ბალახს მწვანედ იმიტომ ვხედავთ, რომ ის მხოლოდ მწვანე ფერს ირეკლავს, დანარჩენს კი შთანთქავს. თუ ბალახს შევხედავთ წითელი მინით, რომელიც მხოლოდ წითელ სხივებს ატარებს, მაშინ ბალახი თითქმის შავად მოგვეჩვენება.

დასკვნები:

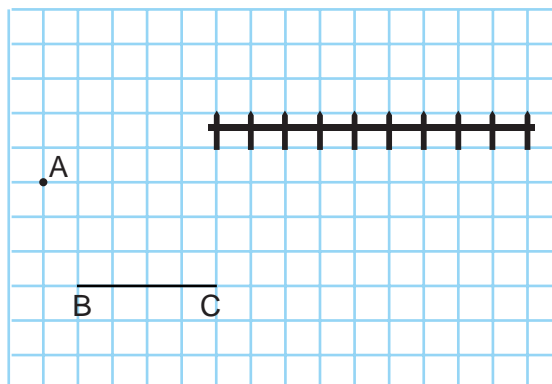
- თეთრ სინათლეს რთული სტრუქტურა აქვს;
- თეთრი სინათლე იშლება შვიდ ფერად, რომელსაც სინათლის სპექტრს უწოდებენ;
- გარდატეხის მაჩვენებლის დამოკიდებულებას სინათლის ფერზე სინათლის დისპერსია ეწოდება;
- იისფერ სინათლეს გარემოში გავრცელების ყველაზე ნაკლები სიჩქარე აქვს და ის ყველაზე მეტად გარდატყდება, წითელ სინათლეს კი – პირიქით.

საკონტროლო კითხვები:

1. როგორ დაალაგებ თეთრი სინათლის სპექტრის ფერებს გარდატეხის მაჩვენებლის ზრდის მიხედვით?
2. რა შედეგს მივიღებთ, თუ მინის სამკუთხა პრიზმას ლურჯი სინათლე დაეცემა?
3. რომელ სინათლეს აქვს მეტი გარდატეხის მაჩვენებელი, მწვანეს თუ ყვითელს?
4. რა ფერი ექნება თეთრ მაგიდას, თუ მას ერთმანეთზე დადებული ლურჯი და წითელი მინით შეხედავთ?

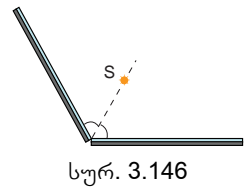
III თავის შემაჯამებელი ამოცანები

1. რამდენი წამის შემდეგ დაინახავს დამკვირვებელი მარსზე მომხდარ მოვლენას, თუ მანძილი დედამიწიდან მარსამდე ამ მოვლენის მოხდენისას 55800000 კმ იყო?
2. განსაზღვრეთ 4 მ სიმაღლის სამაშველო კომპიურას ჩრდილის სიგრძე ჰორიზონტალურ ზედაპირზე, თუ მზის სიმაღლე 15° -ია.
3. გამოთვალეთ იუპიტერის სრული ჩრდილის სიგრძე, თუ მისი რადიუსი 71400 კმ-ია, მზის რადიუსი – 696400 კმ, მანძილი იუპიტერიდან მზემდე კი – 740520000 კმ.
4. ფარანიდან გამოსული სინათლის სხივების გაშლის კუთხე 60° -ია. განსაზღვრეთ იმ წრის ფართობი, რომელსაც გაანათებს ფარანი, თუ მას მოედნის ზედაპირის ზევით 15 მ სიმაღლეზე ვერტიკალურად დავკიდებთ? ფარანი ნერტილოვან სინათლის წყაროდ მიიჩნით.
5. სფეროს ფორმის სინათლის წყაროს რადიუსი 8 სმ-ია. სინათლის წყაროსა და ეკრანს შორის მოთავსებულია 5 სმ რადიუსის მქონე არაგამჭვირვალე ბურთულა. ეკრანსა და ბურთულას შორის მანძილი 35 სმ-ია, ხოლო სინათლის წყაროსა და ბურთულას შორის – 12 სმ. იპოვეთ ეკრანზე მიღებული ნახევარჩრდილის ფართობი.
6. მზიან ამინდში, სანაპიროზე, ქოლგის ჩრდილშიც გაირუჯებით. რატომ?
7. ბრტყელ სარკეზე სინათლის სხივის დაცემის კუთხე 20° -ია. რამდენი გრადუსით უნდა შემოვაბრუნოთ სარკე, რომ დაცემულ და არეკლილ სხივებს შორის კუთხე სამჯერ გაიზარდოს?
8. სინათლის ნერტილოვანი წყარო ჰორიზონტალური ზედაპირიდან 3,6 მ სიმაღლეზეა. მისგან 7,2 მ მანძილით დაშორებულ ნერტილში ზედაპირზე დევს ბრტყელი სარკე. იპოვეთ კუთხე სარკეზე დაცემულ და არეკლილ სხივებს შორის.
9. მზის სიმაღლე 25° -ია. ჰორიზონტისადმი რა კუთხით უნდა მოვათავსოთ ბრტყელი სარკე, რომ მისგან არეკლილი სხივი ჰორიზონტთან 45° -იან კუთხეს ადგენდეს?
10. შვეულად მდგარი ბრტყელი სარკე მოძრაობს ჰორიზონტალური მიმართულებით, მუდმივი 4 სმ/წმ სიჩქარით. მნათი ნერტილი კი მოძრაობს მის წინ ვერტიკალური მიმართულებით, მუდმივი 6 სმ/წმ სიჩქარით. იპოვეთ სარკეში მნათი ნერტილის გამოსახულების სიჩქარის მოდული.
11. A ნერტილში მდგომი დამკვირვებელი ღობის რა ნაწილს დაინახავს BC სარკეში? (სურ. 3.145).



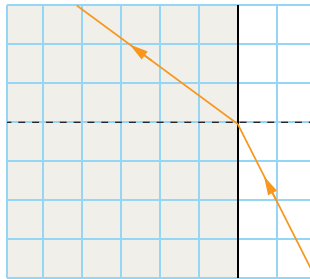
სურ. 3.145

12. ორ ბრტყელ სარკეს შორის კუთხე 120° -ია (სურ. 3.146). S მნათი წერტილის რამდენი გამოსახულება მიიღება სარკეებში?
13. ფარანიდან გამოსული სინათლის სხივების გაშლის კუთხე 120° -ია. ეს სხივები ეცემა აუზის წყლის ზედაპირს და მასზე 40 სმ რადიუსის წრიული ფორმის განათებულ არეს ქმნის. იპოვეთ აუზის ფსკერზე განათებული ზედაპირის ფართობი, თუ წყლის სიღრმე 2 მ-ია.



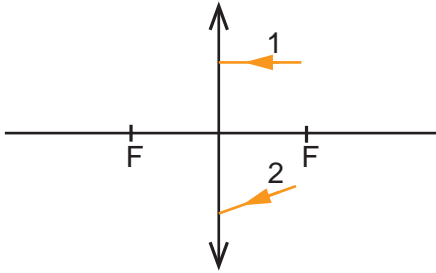
სურ. 3.146

14. სინათლის სხივის მინიდან წყალში გადასვლისას, დაცემის კუთხე 75° -ია. იპოვეთ სხივის პირვანდელი მიმართულებიდან გადახრის კუთხე.
15. სურ. 3.147-ზე გამოსახულია სხივის სვლა ჰაერიდან უცნობ გამჭვირვალე გარემოში. სურათის მიხედვით დაადგინეთ ამ გარემოს აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი. ჰაერის აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი 1-ის ტოლად მიიჩნით.

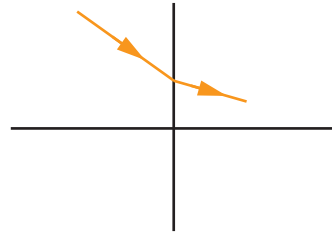


სურ. 3.147

16. განსაზღვრეთ სრული შინაგანი არეკვლის ზღვრული კუთხე ორი გარემოს გამყოფი საზღვრისათვის, თუ ერთი მათგანის აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი 2,8, მეორესი კი $-1,4$ -ია.
17. თეთრი სინათლის წყარო ტბაში 1,2 მ სიღრმეზეა მოთავსებული. განსაზღვრეთ წყლის ზედაპირზე იმ წრეთა ფართობების შეფარდება, რომლის ფარგლებშიც შესაძლებელია ნითელი და იისფერი სინათლის გამოსვლა ჰაერში, თუ ნითელი სინათლისათვის აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი 1,328-ის ტოლია, იისფერისთვის კი $-1,335$ -ის.
18. მინის ბრტყელპარალელური ფირფიტის ერთ მხარეს წყალია, მეორე მხარეს კი $-$ ჰაერი. რა მინიმალური კუთხით უნდა დაეცეს სინათლის სხივი წყლიდან ფირფიტას, რომ ის ჰაერში არ გადავიდეს?
19. სინათლის სხივი ჰაერიდან გადადის გამჭვირვალე ნივთიერებისგან დამზადებულ ბრტყელპარალელურ ფირფიტაში, რომლის სისქე 25 მმ-ია. იპოვეთ ამ ნივთიერების აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვენებელი, თუ ფირფიტაზე სხივის 66° -იანი კუთხით დაცემისას, მისი გვერდითი წანაცვლება 4 მმ-ია.
20. სინათლის სხივი 45° -იანი კუთხით ეცემა მინის წესიერი სამკუთხა პრიზმის ერთ-ერთ გვერდით წახნაგს. იპოვეთ პრიზმაში გავლისას სხივის პირვანდელი მიმართულებიდან გადახრის კუთხე.
21. აგებით დაადგინეთ, სად გადაიკვეთება სხივი 1 და სხივი 2 ლინზაში გარდატეხის შემდეგ (სურ. 3.148)?.
22. სურ. 3.149-ზე გამოსახულია სხივის სვლა ლინზამდე და ლინზაში გარდატეხის შემდეგ. აგებით დაადგინეთ: ლინზა შემკრებია თუ გამბნევი და მისი ფოკუსის მდებარეობა.

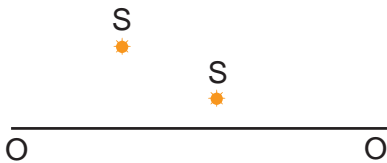


სურ. 3.148

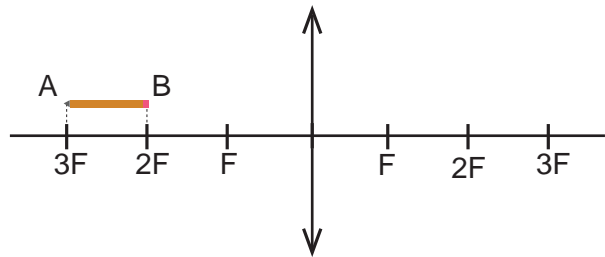


სურ. 3.149

23. სინათლის წერტილოვანი წყარო მოთავსებულია გამბნევი ლინზის მთავარ ფოკუსში. შეასრულეთ შესაბამისი ნახაზი და აგებით იპოვეთ გამოსახულების მდებარეობა.
24. სურ 3.150-ზე გამოსახულია ლინზის OO_1 მთავარი ოპტიკური ღერძი, სინათლის S წყარო და მისი S_1 გამოსახულება. აგებით დაადგინეთ: ლინზის ოპტიკური ცენტრის მდებარეობა, შემკრები თუ გამბნევი ლინზა და მისი ფოკუსის მდებარეობა.
25. სურ. 151-ის მიხედვით იპოვეთ AB ფანქრის გამოსახულების ზომა, თუ ფანქრის სიგრძე 12 სმ-ია.



სურ. 3.150



სურ. 3.151

26. 18 სმ ფოკუსური მანძილის მქონე გამბნევი ლინზიდან საგანი 36 სმ-ითაა დაშორებული. იპოვეთ ლინზის გამადიდებლობა ამ შემთხვევაში.
27. სინათლის წერტილოვან წყაროსა და ეკრანს შორის მანძილი 64 სმ-ია. ეკრანიდან რა მანძილზე უნდა მოვათავსოთ $D=6,25$ დპტრ ოპტიკური ძალის მქონე ლინზა, რომ ეკრანზე სინათლის წყაროს მკვეთრი გამოსახულება მივიღოთ?
28. ორმხრივზნევილი ლინზის ფოკუსური მანძილი 20 სმ-ია. ლინზიდან 80 სმ მანძილზე მოთავსებულია 30 სმ სიმაღლის საგანი. იპოვეთ საგნის გამოსახულების სიმაღლე.
29. 5 დპტრ ოპტიკური ძალის შემკრები ლინზის მთავარ ოპტიკურ ღერძზე, ლინზიდან 60 სმ მანძილზე, მოთავსებულია სინათლის წერტილოვანი წყარო. ლინზის მეორე მხარეს, მისგან 40 სმ მანძილზე მოათავსეს ბრტყელი სარკე ისე, რომ სარკის სიბრტყე მთავარი ოპტიკური ღერძის მართობია. იპოვეთ მანძილი ლინზაში სინათლის წყაროს გამოსახულებასა და ბრტყელ სარკეში ამ გამოსახულების გამოსახულებას შორის.
30. $F_1=8$ სმ და $F_2=10$ სმ ფოკუსური მანძილების მქონე ორი შემკრები ლინზა, რომელთაც საერთო მთავარი ოპტიკური ღერძი აქვს, ერთმანეთისაგან 32 სმ-ითაა დაშორებული. ლინზებს შორის, პირველი ლინზიდან 12 სმ მანძილზე მოთავსებულია სინათლის წერტილოვანი წყარო. იპოვეთ ლინზებში სინათლის წყაროს გამოსახულებებს შორის მანძილი.

- Y გამოსხივება 143
 აბსოლუტური გარდატეხის მაჩვ. 173
 ავტორხევეები 80
 აკომოდაცია 202
 აკუსტიკა 112
 აკუსტიკური რეზონანსი 120
 ამამალღებელი ტრანსფორმატორი 133
 ამპერის კანონი 28
 ამპერის ძალა 28
 არეკვლის კუთხე 162
 ასტიგმატიზმი 203
 ახლომხედველობა 202
 ბადურა 201
 ბგერითი ბარიერი 119
 ბგერითი ტალღა 112
 ბგერის ინტენსივობა 114
 ბინოკულარული მხედველობა 203
 ბროლი 201
 ბრტყელი სარკე 166
 ბრტყელი ტალღა 109
 ბუნებრივი მაგნიტი 10
 გადახრის კუთხე 182
 გამბნევი ლინზა 190
 განივი ტალღა 103
 გარდამტეხი კუთხე 182
 გარდატეხის კუთხე 171
 გეომეტრიული ოპტიკა 156
 გრავიტაციული ლინზირება 215
 გრიგალური ველი 24
 გრძივი ტალღა 102
 გუგა 201
 დაბალსიხშირული ტალღები 142
 დამადაბლებელი ტრანსფორმატორი 133
 დაცემის კუთხე 162
 დიამაგნეტიკები 45
 დინამო მანქანა 70
 დიფრაქცია 111
 დიფუზური არეკვლა 164
 დომენი 45
 დოპლერის ეფექტი 118
 დროებითი დამაგნიტება 10
 ელექტრომაგნიტური ველი 140
 ელექტრომაგნიტური ინდუქცია 50
 ელექტრომაგნიტური ტალღა 141
 ერთგვაროვანი მაგნიტური ველი 24
 ექოლოკაცია 121
 ექსპოზიციის დრო 210
 ვებერი 52
 ზამბარიანი ქანქარა 85
 თავისუფალი ელექტრომაგნ. რხევები 124
 თავისუფალი რხევები 79
 თვითინდუქცია 63
 თხელი ლინზა 189
 თხელი ლინზის ფორმულა 198
 ინდუქციის ემძ 57
 ინდუქციური დენი 51
 ინდუქციურობა 64
 ინტერფერენცია 110
 ინფრაბგერითი ტალღები 113
 ინფრანითელი გამოსხივება 142
 იძულებითი რხევები 79
 კამერტონი 120
 კიურის ტემპერატურა 46
 კოჰერენტული ტალღები 110
 ლენცის წესი 56
 ლინზის ოპტიკური ცენტრი 189
 ლორენცის ძალა 35
 ლუპა 204
 მაგნიტური ველი 15
 მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი 19
 მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი 52
 მაგნიტური ინდუქციის წირები 23
 მაგნიტური ისარი 11
 მათემატიკური ქანქარა 88
 მაიკელსონის ცდა 154
 მას-სპექტროგრაფი 39
 მეორეული გრაგნილი 133
 მერხევი სისტემა 79
 მექანიკური ტალღა 102
 მთავარი ოპტიკური ღერძი 189
 მთავარი ფოკუსი 190
 მიკროტალღები 142
 მილევადი რხევები 79
 მინისებრი სხეული 201
 მირაჟი 187
 მუდმივი დენის გენერატორი 69
 მუდმივი დენის ძრავა 68
 მუსიკალური ტონი 114
 ნარჩენი დამაგნიტება 10
 ნახევარწრდილი 157
 ნივთიერების მაგნიტური შეღწევადობა 43
 ობერტონები 115

ობიექტივი 205
 ოკულარი 205
 ოპტიკა 152
 ოპტიკური მიკროსკოპი 205
 ოპტიკური ძალა 191
 ორმაგი ფოკუსი 190
 პარამაგნეტიკები 44
 პერიოდული მექანიკური ტალღა 105
 პერიოდული რხევითი მოძრაობა 77
 პირველადი გრაგნილი 133
 პიქსელი 210
 რადიოტალღები 142
 რევერბერაცია 121
 რეზონანსი 98
 რეზონატორი 120
 რენტგენის გამოსხივება 143
 რეფლექტორი 206
 რეფრაქტორი 206
 რეფრაქცია 186
 რიომერის ცდა 152
 როტორი 68
 რქოვანა 201
 რხევითი კონტური 123
 რხევითი მოძრაობა 76
 რხევის ამპლიტუდა 77
 რხევის პერიოდი 77
 რხევის სიხშირე 77
 საკუთარი სიხშირე 97
 სამხრეთ პოლუსი 11
 სარკული არეკვლა 163
 საუკეთესო ხედვის მანძილი 202
 სანჯისი ფაზა 81
 სინათლის გარდატეხა 171
 სინათლის დისპერსია 213
 სინათლის კონა 156
 სინათლის სიჩქარე 152
 სინათლის სპექტრი 212
 სინათლის წყარო 152
 სინათლის არეკვლა 162
 სკლერა 201
 სმენადობის ზღვარი 114
 სრული შინაგანი არეკვლა 177
 სტატორი 68
 სფერული ტალღა 109
 სხივთა შექცევადობა 162
 ტალღის სიგრძე 105
 ტალღის ფრონტი 109
 ტალღური ზედაპირი 109
 ტალღური პროცესი 102
 ტელესკოპი 206
 ტემბრი 114
 ტესლა 20
 ტომსონის ფორმულა 125
 ტონის სიმაღლე 114
 ტრანსფორმატორი 133
 ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი 134
 ულტრაბგერითი ტალღები 112
 ულტრაიისფერი გამოსხივება 142
 ფარდობითი გარდატეხის მაჩვენებელი 172
 ფერადი გარსი 201
 ფერმას პრინციპი 156
 ფერომაგნეტიკები 43
 ფიზიკური ქანქარა 88
 ფიზოს ცდა 153
 ფოკალური სიბრტყე 190
 ფოკუსური მანძილი 190
 ფოტომულსია 210
 ფოტოფირფიტა 210
 შემკრები ლინზა 190
 შემწვოთება 102
 შორსმხედველობა 202
 ჩრდილი 157
 ჩრდილოეთ პოლუსი 11
 ცვლადი დენის ძალის ეფექტური მნიშვნელობა 130
 ცვლადი ელექტრული დენი 128
 ციკლოტრონი 40
 ციკლური სიხშირე 81
 ცილინდრული ტალღა 109
 წარმოსახვითი გამოსახულება 166
 წირითი გამადიდებლობა 198
 ხედვის კუთხე 202
 ხელოვნური მაგნიტი 10
 ხილული გამოსხივება 142
 ხმამაღლობა 114
 ხმაური 114
 ჰარმონიული რხევები 80
 ჰარმონიული რხევის განტოლება 81
 ჰენრი 64
 ჰისტერეზისი 43
 ჰიუგენსის ფორმულა 90

პასუხები

I თავი

§ 1.4 8) $6 \cdot 10^{-5}$ ნმ; 9) 10 ა; 10) მიახლოებით $6,7 \cdot 10^{-4}$ მ².

§ 1.5 5) $B \rightarrow C$; 6) სურათის სიბრტყის მართობულად ჩამავალი; 8) ღეროს ქვედა ბოლო ჩრდილოეთი, ზედა სამხრეთი.

§ 1.6 2) მიიზიდებიან; 4) არ იმოქმედებს; 5) შემცირდება 4-ჯერ; 6) 1ა; 7) 4 მ; 8) 0,4 ტლ; 9) $2,25 \cdot 10^{-2}$ ჯ; 10) 4,56 ნ; 0,24 ნ.

§ 1.7 1) $B \rightarrow A$; 3) შემცირდება 2-ჯერ 4) გაიზრდება 4-ჯერ; 5) $19,2 \cdot 10^{-7}$ ნ; 6) 0,75 ა; 7) $14 \cdot 10^{-7}$ ტლ; 8) მიახლოებით 1,7 ა; 9) მიახლოებით $5,3 \cdot 10^{-6}$ ტლ; 10) $r_1 = 12$ სმ, $r_2 = 60$ სმ.

§ 1.8 1) ნახაზის სიბრტყის მართობულად ნახაზის სიღრმეში; 2) ნახაზის სიბრტყის მართობულად სიბრტყიდან ჩვენკენ; 3) არ მოქმედებს; 4) 8-ჯერ; 5) $a_p/a_a = 2$; 6) $1,6 \cdot 10^{-17}$ ნ; 7) მიახლოებით $4,3 \cdot 10^{-11}$ კ; 8) $Bq \sqrt{\frac{2E}{m}}$; 9) $19,2 \cdot 10^{-23}$ ნ; 10) $1,16 \cdot 10^{-12}$ ნ.

§ 1.9 2) $R_1 = 2R_2$; 3) $1/200$; 4) R; 5) 0,25 მ; 6) 0,02 მ; 7) 3; 8) მიახლოებით 3,3 მ; 9) მიახლოებით $22,3 \cdot 10^{-12}$ ნმ; $9,4 \cdot 10^{-5}$ მ; 10) $R_1 > R_2$; $h_1 > h_2$.

§ 1.11 4) 0,3 ვ/მ; 5) 10 მ/ნმ; 6) 5ვ; 7) მიახლოებით 3,3 მვ; 8) მიახლოებით 19° ; 9) $A = \varepsilon q = Bvlq \sin \alpha$; 10) მიახლოებით 0,5 ა.

§ 1.13 4) გაიზრდება; 6) 1,1 მვ; 7) $22,5 \cdot 10^{-5}$ ვბ; 8) მიახლოებით $62,8 \cdot 10^{-5}$ ვბ; 9) შემცირდება მიახლოებით $4,9 \cdot 10^{-5}$ ვბ-ით; 10) $\Phi = 0,012 + 0,006t$.

§ 1.15 4) 0,4 ვ; 5) -0,25 ვ; 6) 2 მვ; 7) 0,6 ა; 8) 0,09 ვ, 0,02 ა; 9) მიახლოებით 0,13 მა; 10) $\frac{3BSN}{4Rt}$.

§ 1.17 4) ნაკადი გაიზრდება 3-ჯერ. ინდუქციურობა არ შეიცვლება; 5) 0,4 ჰნ; 6) 3ვბ; 7) 0,2 ვბ; 8) 0,06 ვ; 9) 0,9 ჰნ; 10) 4,5 ვ.

§ 1.18 1) 10 ჯ; 2) მიახლოებით 11 ა; 3) 8 ჰნ; 4) შემცირდება 25-ჯერ; 5) 6 ჯ, 24 ჯ; 6) 6 ა; 7) 0,8 ჰნ; 8) 5 ჯ; 9) 8 ა; მიახლოებით 0,4 ჰნ; 10) 6 ა; 0,4 ჰნ.

§ 1.19 2) შემცირდება 4-ჯერ; 3) გაიზრდება 6,25-ჯერ; 4) 200 ნმ; 5) 300; 8) გაიზრდება 3-ჯერ; 9) $\varepsilon_1 = 8$ ვ, $\varepsilon_2 = 32$ ვ; 10) 25.

I თავია შემაჯამებელი ამოცანები

1) 4,5 ნმ; 4) მიახლოებით 3,1 ა; 5) $\rho = \frac{Bl}{S \cdot \operatorname{tg} \alpha}$; 6) $20 \cdot 10^{-7}$ ტლ; 7) მიახლოებით 1,4 ა;

8) მიახლოებით $3,8 \cdot 10^{-7}$ ტლ; 9) $a = \frac{B}{2} \sqrt{\frac{2uq^3}{m^3}}$; 10) $R_1 : R_2 = 3 : 4$; 11) მიახლოებით 0,09 ტლ; 12) 200 კმ/ნმ; 13) 1,73 ვ/მ; 14) 10^{-9} კ; 15) მიახლოებით 0,4 მვ; 16) მიახლოებით 0,14 ვბ; 18) 2,4 კ; 19) მიახლოებით 0,127 ვტ; 20) 0,2 ჰნ; 21) 26 ვ; 22) შემცირდება 3,75 ვ-ით; 23) 0,2 ა; 24) 3ა, 1,8 ჰნ; 25) 16მ.

II თავი

§ 2.1 1) 5 ნმ; 2) 4 ჰც; 3) 0,4 ნმ; 4) 10 ჰც; 5) 3 ნმ; 6) 0,5 ნმ; 7) 180; 8) 20A; 9) 40 მ; 10) 1 ნმ.

§ 2.2 1) π ნმ⁻¹; 2) 10π ნმ⁻¹; 3) 2 ნმ; 4) 120 მ; 5) $x=0,1\cos 4\pi t$; 6) $\frac{\pi}{4}$, 60; 7) 3,14 მ/ნმ; 100 მ/ნმ²; 8) 0,25 მ, -0,25 მ; 9) 3,14 მ/ნმ; 50 მ/ნმ²; 10) $x=0,5\sin \frac{\pi}{5}t$, $x_1=0$.

§ 2.3 2) 80 მ/ნმ²; 3) 0,2 ნმ; 4) 400 ნ/მ; 5) 6 ჰც; 6) T; 7) 1,6 ნმ⁻¹; 8) 9,92 მ; 9) 0,2 მ/ნმ; 2 მ/ნმ²; 10) მიახლოებით 0,25 ნმ.

§ 2.4 1) 2 ნმ; 2) 0,25 მ; 3) მიახლოებით 9,8 მ/ნმ²; 4) გაიზრდება; 5) მეორე ქანქარას სიგრძე; 6) 31,5; 7) 50 სმ; 8) 0,5 ნმ; 9) 0,6 ნმ; 10) 4 ნმ.

§ 2.5 2) 4-ჯერ გაიზრდება; 3) $2 \cdot 10^{-2}$ ჯ; 4) 5 მჯ; 5) $4 \cdot 10^{-2}$ ჯ; 6) 1 მ/ნმ; 7) 0,25 მ/ნმ; 8) 2 მ/ნმ; 9) 4 მ/ნმ; 10) მიახლოებით 3,3-ჯერ.

§ 2.6 5) 10 ნმ; 6) 0,5 ჰც; 7) 5 კგ; 8) 5 ჰც; 9) 25 მ/ნმ; 10) 16 მ/ნმ.

§ 2.8 1) 40 ჰც; 2) 0,04 ნმ; 3) 1,2 მ/ნმ; 4) 0,9 მ; 5) 3 ნმ; 6) 90 მ; 7) 2-ჯერ გაიზარდა; 8) 2,8-ჯერ მცირდება; 9) 5,8 მ/ნმ, 4,2 მ/ნმ; 10) 80 კმ.

§ 2.10 1) 0,017 მ-დან 21,25 მ-მდე; 2) 0,25 მ; 3) 6,12 კმ; 4) მიახლოებით 4,4-ჯერ გაიზრდება; 5) 200 ნმ-ში; 6) 10,2 კმ; 7) 200 მ/ნმ; 8) 14 ნმ; 9) მიახლოებით 6,8 ნმ; 10) 10 ნმ.

§ 2.11 2) 22 მ; 4) 3 ნმ; 5) 30,6 მ/ნმ; 6) მიახლოებით 818 მ; 7) მიახლოებით 400 ჰც; 8) 2,1 კჰც; 9) 0,6 მ; 10) 80 მ.

§ 2.12 1) გაიზრდება; 2) შემცირდება 2-ჯერ; 3) მიახლოებით 400 ჰც; 4) 2T; 5) შემცირდება 2-ჯერ; 6) 10 ნფ; 7) 2,4 ა; 8) მიახლოებით 0,8 ა; 9) T/6; 10) T/8.

§ 2.13 1) 1,256 ვ; 2) $U_0=150$ ვ; $v=50$ ჰც; 3) 5ა; 4) $I=4\sin 50\pi t$; 5) არა, რადგან ძაბვის მაქსიმალური მნიშვნელობა მიახლოებით 310 ვ-ია; 6) მიახლოებით 140 ვ; 7) 2 ა; 8) 240 ვტ; 9) T/8; 10) 18,9 კჯ.

§ 2.14 1) ამამალლებელი; 2) $K=5$; 3) $K=15$; 4) 120 ვ; 5) 0,25 ა; 6) 720 ვტ; 7) 100 ვ; 8) 16-ჯერ; 9) 48%-ით; 10) $K=17$.

II თავია შემაჯამებელი ამოცანები

1) 960; 2) 40 A; 3) 100 ჰც; 4) 2π მ/ნმ; მიახლოებით 800 მ/ნმ²; 5) მიახლოებით 28 სმ; 6) 20 მ/ნმ²; 7) 1 ნმ; 8) 0,5 მ/ნმ; 5 მ/ნმ²; 9) 3 ნმ; 10) 20; 11) 1,6 მჯ; 12) 6 მ/ნმ, 10 მ/ნმ²; 13) 50 მ/ნმ; 14) 0,8 მ; 15) 9-ჯერ გაიზარდა; 16) 6,6 ნმ; 17) 400 ნმ; 18) მიახლოებით 7,3 მ/ნმ; 19) 2000 ჰც; 20) 3 მკნმ; 21) 4 მკნმ; 22) 2 მკნმ; 23) 360 ვტ, მიახლოებით 2,1 ა; 24) 5,6 ნთ; 25) 60000 ვ; 26) 7 კვ; 27) 25-ჯერ; 28) 33%-ით; 29) 30000 კმ; 30) 382500 კმ.

III თავი

§ 3.2 2) მიახლოებით $144 \cdot 10^9$ მ; 3) მიახლოებით 30 მ; 4) 45° ; 5) 21 მ; 6) 6 მ; 7) მიახლოებით 160 სმ; 8) მიახლოებით 56 სმ; 9) 3,5 მ; 10) მიახლოებით 61,4 სმ.

§ 3.3 1) 25° ; 2) 50° ; 3) 30° ; 4) 114° ; 5) 60° ; 6) 144° ; 7) შემცირდება 20⁰-ით; 8) შემცირდება 14⁰-ით; 9) 40° ; 10) 23⁰-იან კუთხეს.

§ 3.4 1) 15 სმ; 2) 32 სმ; 3) გაიზრდება 10 სმ-ით; 4) შორდება. 6 მ/წმ სიჩქარით; 5) ბოძიდან 8 მ მანძილზე; 6) 1 მ; 7) არ შეიცვლება; 8) 5 სმ/წმ; 9) 200 სმ; 10) 70 სმ.

§ 3.5 1) $n=2$; 2) შემცირდება 2,2-ჯერ; 3) მიახლოებით 0,82; 4) მიახლოებით 0,66; მიახლოებით 45° ; 6) მე-3 სხივის მიმართულებით; 7) მიახლოებით 1,73 მ და 3,4 მ; 8) მიახლოებით 68° ; 9) მიახლოებით 33° ; 10) მიახლოებით 120 სმ.

§ 3.6 2) მიახლოებით 59° ; 3) მიახლოებით 46° ; 4) მიახლოებით 1,4; 5) მიახლოებით 0,76; 6) მიახლოებით 38° ; 7) მიახლოებით 1,33 მ; 8) მიახლოებით 3 მ.

§ 3.7 1) მიახლოებით 1,17; 2) მიახლოებით 38° ; 6) 15° ; 8) მიახლოებით 10° .

§ 3.9 1) ფოკალურ სიბრტყეში; 2) გამბნევი; 5) გამბნევი; 7) ლინზა გამბნევი.

§ 3.10 1) ფოკალურ სიბრტყეში; 2) არ მიიღება (მიიღება უსასრულობაში); 4) გაფერმკრთალდება და გაიზრდება; 7) წარმოსახვითი.

§ 3.11 1) 5 დპტრ; 2) 10 დპტრ; 3) 15 სმ; 4) 12 სმ; 5) ლინზიდან 100 სმ მანძილზე, წარმოსახვითი, გადიდებული; 6) $f=6,25$ სმ , $\Gamma=0,5$; 7) 10,5 დპტრ; 8) 3 სმ; 9) -37,5 დპტრ; 10) მიახლოებით 9,2 სმ.

§ 3.13 1) 5; 2) 6,25 სმ; 3) 2,5 სმ; 4) 750; 5) 1250; 6) 9,6 მ; 7) ნამდვილი; 8) 30 სმ; 9) 40 სმ; 10) 240 სმ.

III თავია შემაჯამებელი ამოცანები

1) 186 წმ-ში; 2) მიახლოებით 15,4 მ; 3) მიახლოებით 84613318 კმ; 4) მიახლოებით 243 მ²; 5) მიახლოებით 2864 სმ²; 7) 40° -ით; 8) 120° ; 9) 10° ; 10) 10 სმ/წმ; 11) 7/9; 12) 2; 13) 14,11 მ²; 14) სინათლის სხივი ვერ გადავა მეორე გარემოში; 15) 1,43; 16) 30° ; 17) მიახლოებით 0,93; 18) 49° ; 25) 6 სმ; 26) $\Gamma = \frac{1}{3}$; 27) 32 სმ; 28) 24 სმ; 29) 20 სმ; 30) 76 სმ.