თამაზ ხაზარაძე

რელატივისტური კლასიკური ფიზიკის საფუძვლები სასკოლო კურსში

თბილისის უნივერსიტეტის გამომცემლობა
თბილისი - 2005

უაკ (UDC) 53-077
ხ 161

წინამდებარე სახელმძღვანელოში გადმოცემულია ელემენტარული რელატივისტური კლასიკური ფიზიკა როგორც ცოდნის ერთიანი სისტემა, დაფუძნებული ფიზიკის უზოგადეს პრინციპებსა და კანონებზე. ფიზიკის მთლიანობის წარმოჩენა, მოძველებული ცნებების ნაცვლად თანამედროვე მეცნიერული ინტერპრეტაციის გამოყენება, ძირითადი ფორმულების მარტივი გამოყვანა ფარდობითობის თეორიის საფუძვლების გააზრების საშუალებას იძლევა.

განკუთვნილია სტუდენტების, მასწავლებლების, მოსწავლეებისა და თვითგანათლებით დაინტერესებულ პირთათვის.

წიგნი წარმოადგენს მეორე გამოცემას.

რედაქტორი პროფ. მიხეილ ზვიადაძე

რეცენზენტები: კახმეგ კუდავა
ნიკო ჩხაიძე

ISBN 99940-38-06-0

შესავალი

ფარდობითობის თეორიას ისე შეუსრულდა საუკუნოვანი იუბილე, რომ მისი საწყისები ადამიანთა უმრავლესობისათვის გაუგებარი რჩება. სირთულის, ყოველდღიურობის „საღ აზრთან“ შეუთავსებლობის გარდა ამის მიზეზი ისიც არის, რომ ფარდობითობის თეორიის საფუძვლების (ელემენტების) სწავლებამ საშუალო სკოლაში რიგიანად ვერ მოიკიდა ფეხი. ეს გლობალური პრობლემაა. საკმაო ძალისხმევა მოხმარდა პოპულარული ლიტერატურის შექმნას, მაგრამ ეს საქმეს არ შველის. ავტორი იმ აზრს იზიარებს, რომ ფიზიკის „გაპოპულარებით“ მისი შეგნებული შესწავლის პრობლემა ვერ გადაწყდება – არ არსებობს „კეისრის გზა“... ალბათ, მკითხველი იტყვის: პოპულარული ლიტერატურა ხომ დაინტერესების – შემეცნების ამ აუცილებელი მოტივის – გაღვივებისთვისაა მოწოდებული. დიახ, მაგრამ დაინტერესებისა და სისტემატური შესწავლის გათიშვა ფიზიკაში სასურველ ნაყოფს არ იძლევა. ისიც უნდა ითქვას, რომ ჭეშმარიტად პოპულარული და საფუძვლიანი ფიზიკის წიგნის შექმნა საკმაოდ რთული საქმეა, ცოტას თუ ხელეწიფება. უნდა ვეცადოთ, რომ საშუალო სკოლაში საინტერესოდ და მისაწვდომად ვასწავლოთ თანამედროვე ფუნდამენტური ფიზიკის საფუძვლები, ხოლო პოპულარულ ლიტერატურას, რა თქმა უნდა, თავისი შეუცვლელი ადგილი რჩება.

წინამდებარე ნაშრომი, სხვა მრავალთა შორის, კიდევ ერთი ცდაა საშუალო სკოლაში რელატივისტური კლასიკური ფიზიკის საფუძვლების სწავლების პრობლემის მოგვარებისა. იგი, უპირველესად, გამიზნულია *ფიზიკა-მათემატიკური სკოლებისათვის.* სხვა ზოგადსაგანმანათლებლო სკოლებისათვის საჭირო იქნება სათანადო გამარტივება, ადაპტაცია. რასაკვირველია, ავტორი ითვალისწინებს ფარდობითობის თეორიის სწავლების საყოველთაო გამოცდილებას, მაგრამ მისთვის ამოსავალი არის ის სიღრმისეული ტრადიციები, რომლებიც *ფიზიკის დიდაქტიკის ქართული სკოლის ფუძემდებელმა აკად. მათე მირიანაშვილმა* დაამკვიდრა. თუ რამდენად მიზანშეწონილი და ღირებულია შემოთავაზებული გადაწყვეტა, მომავალი გვიჩვენებს.

როგორია საშუალო სკოლაში ფარდობითობის თეორიის სწავლების ძირითადი ხარვეზები?

• სწავლებაში დაკარგულია ფიზიკის მთლიანობა, რომელიც ბუნების ერთიანობას უნდა ასახავდეს. ბუნებამ „არ იცის“, რომ იგი დაყოფილია მექანიკად, ელექტრომაგნეტიზმად, ოპტიკად, ფარდობითობის თეო-

რიად... ბუნება ერთიანია. მაგრამ სკოლაში ფიზიკა წარმოდგენილია მოვლენების, კანონებისა და თეორიების „ენციკლოპედიურ ნაკრებად“. თანამედროვე ფუნდამენტური ფიზიკის ელემენტები ტრადიციულ ნაკვეთს ეკლექტიკურად, მექანიკურად ემატება ამ უკანასკნელის გადააზრებისა და გადამუშავების გარეშე, რაც ფიზიკის „ძველ“ და „ახალ“ ნაწილებად დაყოფას იწვევს.

• სასწავლო ლიტერატურაში ჯერ კიდევ ფართოდ გამოიყენება მოძველებული ცნებები, რომლებსაც საერთო არაფერი აქვთ ფარდობითობის თეორიის არსთან – მისი ჩამოყალიბების ისტორიას ასახავენ მხოლოდ. თვალში საცემი ნიმუშია მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების საკითხი.

• ძირითადი ფორმულები, როგორც წესი, გამოყვანის გარეშეა მოცემული, რის გამართლებაც არ შეიძლება – ასეთი რამ დასაშვებია მხოლოდ როგორც იშვიათი გამონაკლისი.

ფიზიკის მთლიანობის წარმოსაჩენად აუცილებელია ტრადიციული ნაწილების – მექანიკის, ელექტრომაგნეტიზმის, ოპტიკის – გადააზრება-გადამუშავება თანამედროვე ფიზიკის თვალსაწიერიდან რელატივისტური კონცეფციის საფუძველზე, რათა მივაღწიოთ მათ ორგანულ ერთიანობას ფარდობითობის თეორიასთან, შევისწავლოთ კლასიკური ფიზიკის საფუძვლები (ელემენტები) ფუნდამენტური მეცნიერული ცოდნის ერთიანი სისტემის სახით. როგორ განვახორციელოთ ასეთი ჩანაფიქრი? პასუხი ფიზიკის სტრუქტურის ანალიზს მოითხოვს.

ფიზიკას აქვს მარტივი, ლოგიკურად მწყობრი სტრუქტურა, რომელიც მის ერთიანობას განაპირობებს. ავტორი ემყარება ნობელის პრემიის ლაურეატის, ამერიკელი ფიზიკოსის ვიგნერის კონცეფციას, რომლის თანახმადაც სამყაროს შესახებ ჩვენი ცოდნა იერარქიულია [1]. ეს იერარქია თვალსაჩინოდ შემდეგი სქემის მიხედვით შეიძლება წარმოვადგინოთ:

3. ინვარიანტობის (სიმეტრიის) პრინციპები.
2. ბუნების კანონები.
1. ბუნების მოვლენები.

ბუნების მოვლენები ჩვენი ცოდნის პირველი საფეხურია. ისინი „ნედლეულს“ წარმოადგენენ მეორე საფეხურისათვის – ბუნების კანონებისათვის. ბუნების კანონები ურთიერთკავშირს ამყარებენ მოვლენებს შორის, რაც ცნობილი მოვლენების მიხედვით უცნობი მოვლენების წინასწარმეტყველების საშუალებას იძლევა. იერარქიის მესამე, უმაღლესი საფეხურია ინვარიანტობის (სიმეტრიის) პრინციპები, რომელთათვისაც უკვე ბუნების კანონები წარმოადგენს „ნედლეულს“. კანონის ინვარიანტობა,

სიმეტრია ნიშნავს მისი სახის უცვლელობას გარკვეულ გარდაქმნათა მიმართ. არსებობს ღრმა ანალოგია, ერთი მხრივ, ბუნების კანონებისა და მოვლენების კავშირსა და, მეორე მხრივ, ინვარიანტობის პრინციპებისა და ბუნების კანონების კავშირს შორის. ინვარიანტობის პრინციპები ურთიერთკავშირს ამყარებს კანონებს შორის: ცნობილი კანონების მიხედვით შეგვიძლია, უცნობი კანონები დავადგინოთ. ეს ინვარიანტობის პრინციპების უნივერსალურ მნიშვნელობას განაპირობებს.

ფიზიკის ერთიანობის დანახვა მხოლოდ უზოგადესი პრინციპებისა და კანონების საფუძველზე შეიძლება – მის ფუნდამენტში. წარმოდგენილი სტრუქტურა გვიჩვენებს, რომ ზოგადფიზიკური პრინციპები, რომლებიც ფიზიკას ერთ მთლიანად წარმოაჩენენ,ინვარიანტობის პრინციპებია. უდავოდ, პირველ რიგში უნდა დავასახელოთ ინერციისა და ფარდობითობის პრინციპები. თუ გვსურს ფიზიკის გააზრება ცოდნის ერთიანი სისტემის სახით, აუცილებელია, ეს პრინციპები ავირჩიოთ საფუძვლად არა მხოლოდ ფარდობითობის თეორიის, არამედ მექანიკის, ელექტრომაგნეტიზმის, ოპტიკის შესწავლისასაც. ბუნებრივია, მხოლოდ ინვარიანტობის პრინციპები არ არის საკმარისი ფიზიკის ერთიანი კურსის ასაგებად: საჭიროა, საფუძვლად გარკვეული ფიზიკური კანონებიც ავირჩიოთ, რამეთუ ინვარიანტობის პრინციპები ურთიერთკავშირს კანონებს შორის ამყარებს. საშუალო სკოლისათვის უცხოა ფიზიკის ერთიანი კურსის ასეთი აგება. იბადება კითხვა: ხომ არ გართულდება ფიზიკის შესწავლა? ჩვენი გამოცდილების გათვალისწინებით, შეგვიძლია შემდეგი ვთქვათ: თუ არ გადავაბიჯებთ მისაწვდომობის ზღვარს (რისთვისაც სასწავლო მასალის სათანადო დიდაქტიკური დამუშავებაა საჭირო), საგრძნობლად იზრდება ფიზიკის შესწავლისადმი ინტერესი, რადგან ფუნდამენტური არსის გამოვლენა გზას უხსნის ადამიანის შინაგან მისწრაფებას, ჩასწვდეს მეცნიერების სიღრმეებს – ეს კი სირთულის ხარისხს ცვლის. *სწავლება ასეთი მისწრაფების ადამიანებისათვისაა ნაყოფიერი.*

ზედმეტი არ იქნება შემდეგი განმარტება. უმაღლეს სკოლაში მეცნიერება შეისწავლება, საშუალო სკოლაში კი – მხოლოდ მეცნიერების ელემენტები. ამიტომაც ეწოდება საშუალო სკოლის კურსს ელემენტარული. ჩვენში დამკვიდრებული ტრადიციით, პედაგოგიკაში ელემენტარულ სასკოლო კურსს მეცნიერების საფუძვლებს უწოდებენ. ეს გაუგებრობასაც იწვევს: ფიზიკასა და მათემატიკაში მეცნიერების საფუძვლებში სხვა რამ იგულისხმება – გავიხსენოთ, თუნდაც, რომ ნიუტონის გენიალურ ქმნილებას „ნატურალური ფილოსოფიის (ბუნებისმეტყველების) მათემატი-

კური საფუძვლები (პრინციპები)“ ჰქვია. გასაგებია, რომ მისი სწავლება საშუალო სკოლაში აზრად არავის არ მოსდის. ავხსნათ განსხვავება მეცნიერებისა და მეცნიერების ელემენტების (პედაგოგიკური ტერმინოლოგიით – საფუძვლების) სწავლებას შორის ფიზიკაში. კითხვაზე, შეიძლება თუ არა ორუცნობიანი ერთი განტოლების ცალსახა ამოხსნა, ჩვეულებრივ, უარყოფითად პასუხობენ. მაგრამ ასეთი პასუხი მისაღებია მხოლოდ ალგებრული აზროვნების დონეზე, რაც განმსაზღვრელია საშუალო სკოლისათვის. მეცნიერება ამდაგვარ (და უფრო რთულ) ამოცანებს ხსნის. ეს შესაძლებელია მხოლოდ უმაღლესი მათემატიკური აზროვნების დონეზე, (უსასრულოდ მცირე, წარმოებული, ინტეგრალი...). მოვიყვანოთ თვალსაჩინო მაგალითი. თუ ნებისმიერი ფორმის სხეულს დავმუხტავთ, უცნობი იქნება როგორც მუხტის, ასევე ელექტრული ველის განაწილება. კულონის კანონი და სუპერპოზიციის პრინციპი მხოლოდ ერთ განტოლებას – გაუსის კანონს – გვაძლევს, რომელიც ამ ორ უცნობს აკავშირებს. ასეთი ამოცანები ცალსახად იხსნება სათანადო სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით და ეს მეცნიერული მიღწევაა.

ავტორის მიზანი არ არის სრული სასკოლო კურსის გადმოცემა. წიგნში განხილულია ის საკვანძო საკითხები, რომლებიც რელატივისტური კლასიკური ფიზიკის ფუნდამენტს, ხერხემალს ადგენს, ერთ მთლიანად წარმოაჩენს მას და ფარდობითობის თეორიის საფუძვლების გააზრების საშუალებას იძლევა. განხილვის სისრულისათვის ყოველი საკითხის (გაკვეთილის) გადაცემას წამძღვარებული აქვს ფიზიკური და მეთოდური ანალიზი. სხვა საკითხთა თაობაზე იგულისხმება, რომ მკითხველი მათ სასკოლო სახელმძღვანელოდან იცნობს და თავად შეძლებს შევსებას საჭიროებისდა მიხედვით. რა თქმა უნდა, ფიზიკის შესწავლა შეუძლებელია სავარჯიშოებისა და ამოცანების ამოხსნა-ანალიზის გარეშე. პირობების გარდა წიგნში მოცემულია მათი პასუხები და მითითებები ამოხსნისათვის. ვისაც ამოცანების ამოხსნა ეძნელება, მას შეუძლია ისარგებლოს ავტორისავე „ფიზიკის ამოცანების ამოხსნის მეთოდიკით“, რომელიც ელემენტარული ფიზიკის სრულ კურსს მოიცავს.

მექანიკა

1. მექანიკური მოძრაობა. ათვლის სისტემა

1. მექანიკური მოძრაობის რაობა, მისი ფარდობითობა და ათვლის სისტემა ტრადიციული თემებია სასკოლო კურსისათვის. ამიტომ შემოვიფარგლოთ მხოლოდ არსებითის გამოკვეთით გაკვეთილის გადაცემის გარეშე, ხოლო მეთოდური ასპექტების გაშუქება ამოცანებს დავუკავშიროთ.

სხეულის მდებარეობა სივრცეში ყოველთვის სხვა სხეულის (სხეულების) მიმართ განისაზღვრება — მდებარეობა ფარდობითია.

სივრცეში სხეულის მდებარეობის ცვლილებას დროის მიმდინარეობის მიხედვით მექანიკური მოძრაობა ეწოდება.

o რა შემთხვევაშია სხეული უძრავი?

მდებარეობის მსგავსად, მექანიკური მოძრაობა სხვა სხეულების მიმართ განისაზღვრება — ფარდობითია. სხეულს (სხეულებს), რომლის მიმართაც განიხილება მექანიკური მოძრაობა, ათვლის სხეულს უწოდებენ. ფარდობითობის გამო მოძრაობის სახე ათვლის სხეულის არჩევაზეა დამოკიდებული. მაგალითად, სახლი უძრავია დედამიწის მიმართ, მაგრამ მასთან ერთად მოძრაობს მზის გარშემო.

მოძრაობის აღწერისათვის საჭიროა ვიცოდეთ სხეულის მდებარეობა დროის ნებისმიერ მომენტში. ეს კი მანძილისა და დროის გაზომვას მოითხოვს. ამისათვის აუცილებელია ათვლის სხეულს დავუკავშიროთ კოორდინატთა სისტემა, რომლის საშუალებითაც მანძილს გავზომავთ, და *უძრავი* საათი დროის გასაზომად (იხ. მ.11.1).

ათვლის სხეული (სხეულთა ჯგუფი), მასთან დაკავშირებული კოორდინატთა სისტემა და საათი ერთად ათვლის სისტემას ადგენს.

ათვლის სისტემა ფიზიკის ერთ-ერთი ძირითადი ცნებაა. მისი არჩევის, დაკონკრეტების გარეშე აზრს მოკლებულია არა მარტო მექანიკური მოძრაობის განხილვა, არამედ ნებისმიერი ფიზიკური მოვლენისა, პროცესისა (ე. ი. ცვლილებისა დროსა და სივრცეში ფიზიკის თვალსაწიერიდან). ათვლის სისტემასთან დაკავშირებულია, აგრეთვე, დამკვირვებლის ცნებაც: იგი *თავის სისტემაში უძრავია* და მისთვის მისაწვდომია სრული ინფორმაცია სისტემის ყველა ადგილიდან (სარეგისტრაციო მოწყობილობის საშუალებით — *იდეალური დამკვირვებელი ყველა წერტილშია*), რის საფუძველზეც ხსნის შესასწავლ მოვლენას. ათვლის სისტემის ასეთი შინაარსი ფარდობითობის თეორიამ გამოავლინა.

უამრავიდან რომელი ათვლის სისტემა ავირჩიოთ?

კინემატიკის ფარგლებში ვერ დავადგენთ *ფიზიკურ კრიტერიუმს* რომელიმე ათვლის სისტემის ან ათვლის სისტემათა ჯგუფის გამოსაყოფად. ერთადერთ კრიტერიუმად რჩება ბუნებრივი მოთხოვნა, რომ არჩევანი მოსახერხებელი იყოს, ეს კი, უპირველესად, *სიმარტივეს* ნიშნავს (მხოლოდ *დინამიკა* გვაძლევს *ფიზიკურ კრიტერიუმს* ათვლის სისტემათა სიმრავლიდან ინერციული სისტემების გამოსარჩევად).

* * *

სიმარტივის მოთხოვნა იმდენად ღრმა არის, რომ იგი მეცნიერული ჭეშმარიტების რანგშიც განიხილება. ეს აზრი მრავალი გამოჩენილი მეცნიერისაგან მომდინარეობს. საგულისხმოა გეოცენტრულ (პტოლემეოსი, II ს.) და ჰელიოცენტრულ (კოპერნიკი, XVI ს.) სისტემათა შედარება. გეოცენტრული სისტემის მიხედვით, დედამიწა სამყაროს ცენტრია, რომლის გარშემო მოძრაობს მზე და პლანეტები. ეს მოძრაობა საკმაოდ რთული სახისაა. მიუხედავად ამისა, გეოცენტრული სისტემა მაინც იძლეოდა პრაქტიკული ამოცანის – ცაზე პლანეტების მდებარეობის წინასწარი გამოთვლა – გადაჭრის საშუალებას, თუმცა საკმაოდ დაბალი სიზუსტით. ადამიანის მოთხოვნათა განვითარების კვალობაზე გეოცენტრული სისტემის გამოყენება სულ უფრო რთულდებოდა. ჰელიოცენტრული სისტემის თანახმად, პლანეტები მზის, როგორც სამყაროს ცენტრის, გარშემო ბრუნავს. მათი მოძრაობა მარტივი სახისაა – პლანეტათა ტრაექტორია ელიფსებია, რომელთა ერთ-ერთ ცენტრში მზეა. ამან არსებითად გაზარდა პრაქტიკული ამოცანების გადაწყვეტის შესაძლებლობა და სიზუსტე. ეს სიმარტივე გადამწყვეტი აღმოჩნდა – კოპერნიკის მოძღვრებამ მსოფლმხედველობრივი გადატრიალება მოახდინა, დაუპირისპირდა ეკლესიის კოსმოლოგიურ შეხედულებებსა და ნიადაგი მოამზადა ფუნდამენტური საბუნებისმეტყველო მეცნიერების – ფიზიკის – შექმნისათვის.

პოპულარულად პრობლემას ასე გადმოსცემენ (რაც ისტორიულ სინამდვილეს ეხამება): მზე ბრუნავს დედამიწის გარშემო, თუ დედამიწა მზის გარშემო? *კინემატიკის ფარგლებში* ამ კითხვაზე ვერ ვუპასუხებთ (ფუნდამენტური ფიზიკა კოპერნიკის დროს ჯერ არ არსებობდა). უბრალოდ, ეს ათვლის სისტემის არჩევის საქმეა, *კინემატიკური თვალსაზრისით ნებისმიერი მოძრაობა ფარდობითია.* კითხვა სხვა რთულ კითხვას უკავშირდება: არსებობს თუ არა აბსოლუტური მოძრაობა? პასუხის რამდენადმე გასარკვევად მთელი მეცნიერული ცოდნის მოშველიებაა საჭირო...

* * *

დავაზუსტოთ, რას ნიშნავს მოძრაობის ფარდობითობა ფიზიკური თვალსაზრისით: ერთი და იმავე სხეულის მოძრაობა, განხილული ერთმანეთის მიმართ მოძრავი ათვლის სისტემების მიმართ, სხვადასხვაა – განსხვავებულია კოორდინატები, სიჩქარე, ტრაექტორია...

ხაზი გავუსვათ, რომ ერთმანეთის მიმართ მოძრავი ათვლის სისტემების განხილვისას ერთ-ერთს *პირობითად უძრავად ვთვლით* და განვიხილავთ მეორის მოძრაობას მის მიმართ – ასე გაცილებით უფრო მოსახერხებელია. თუ რომელ ათვლის სისტემას ჩავთვლით პირობითად უძრავად, ეს არჩევის საქმეა.

სასკოლო ამოცანებში მოძრაობის ფარდობითობას ძირითადად სიჩქარეთა ფარდობითობის თვალსაზრისით განვიხილავთ, რასაც სიჩქარეთა შეკრების წესი გამოხატავს:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{v}_s. \qquad (1.1)$$

უძრავი ათვლის სისტემის მიმართ სხეულის $\mathbf{v}$ *სიჩქარე ტოლია მოძრავი ათვლის სისტემის მიმართ სხეულის* $\mathbf{v}'$ *სიჩქარისა და უძრავი ათვლის სისტემის მიმართ მოძრავი ათვლის სისტემის* $\mathbf{v}_s$ *სიჩქარის ვექტორული ჯამისა.*

(1.1) ვექტორული შეკრების წესს ერთმანეთისადმი კუთხით მიმართული სიჩქარეების შემთხვევაში ვიყენებთ. როდესაც სიჩქარეები ერთი წრფის გასწვრივ არის მიმართული, სიჩქარეებს სკალარულად ვკრებთ. ზუსტად რომ ვთქვათ, (1.1) ვექტორულ ტოლობას მოძრაობის წრფის გასწვრივ მიმართულ ღერძზე ვაგეგმილებთ. დაგეგმილებისას ვექტორის გეგმილი და მოდული აუცილებლად უნდა განვასხვაოთ ერთმანეთისაგან (გეგმილი ალგებრული სიდიდეა, მოდული – არაუარყოფითი). ეს საკმაო გაუგებრობას იწვევს და სათანადო ყურადღებას დავუთმობთ.

სხვადასხვა ნიუანსი ამოცანების სახით განვიხილოთ.

2. მოძრაობის ფარდობითობის გათვითცნობიერება, უძრავი და მოძრავი ათვლის სისტემების საშუალებით აზროვნება რთულია. სათანადო უნარის გამომუშავების გარეშე შეუძლებელია ფარდობითობის თეორიის საფუძვლებში გარკვევა. ასეთი უნარის გამომუშავება საკმაო დროს საჭიროებს და აუცილებელია, მასზე კინემატიკის შესწავლიდანვე ვიზრუნოთ.

ადამიანისათვის ბუნებრივია დედამიწის ზედაპირთან დაკავშირებული ათვლის სისტემა: იგი მოძრაობას (და სხვა მოვლენებს), როგორც წესი, მის მიმართ განიხილავს. მაგრამ ეს ყოველთვის არ არის ხელსაყრელი, მისაღები, ამიტომ ყურადღება უნდა გავამახვილოთ სათანადო მაგალი-

თებსა და ამოცანებზე, რათა ხელი შევუწყოთ მოძრაობის ფარდობითობის გათავისებას. დავიწყოთ უბრალო შემთხვევიდან.

ამოცანა 1.1. რა დროში დაიჭერს მწევარი გაქცეულ მელას?

ა მ ო ხ ს ნ ა. ეს დასასმელი ამოცანაა. ასეთი ამოცანები დამკვიდრებული არ არის ფიზიკის სწავლებაში, საჭირო კია – ისინი შეუცვლელია დამოუკიდებელი, შემოქმედებითი მიდგომის გამომუშავებისათვის. მივცეთ მას მარტივი დასმული ამოცანის სახე. ვთქვათ, მწევრის სიჩქარეა v_1, ხოლო მელასი – v_2 (ცხადია, დედამიწის მიმართ); ისინი ერთდროულად იწყებენ სირბილს ერთი წრფის გასწვრივ და მელა x_0 მანძილითაა წინ. როგორც წესი, ამოცანას დედამიწის მიმართ ხსნიან. ასეთი ამოხსნა ყველასათვის ნაცნობია მათემატიკიდან ალგებრული განტოლების შედგენაზე გათვალისწინებული ამოცანების წყალობით და მკითხველისათვის მიგვინდია. ჩვენთვის მთავარი სხვაა: მსგავსი ამოხსნა ნიმუშია იმისა, თუ როგორ არ უნდა ამოიხსნას ამოცანა *ფიზიკური თვალსაზრისით* (ეს ის შემთხვევაა, როდესაც საგანთაშორისი კავშირი საქმეს არ ადგება).

საინტერესო პრობლემურ სიტუაციას ქმნის შემდეგი კითხვა: როგორ ამოხსნით ამოცანას ზეპირად და უშუალოდ დაწერთ პასუხს? გამოვიყენოთ მოძრაობის ფარდობითობა: ათვლის სისტემა მელას დავუკავშიროთ. მწევრის სიჩქარე მელასთან დაკავშირებულ ათვლის სისტემაში, ანუ მისი ფარდობითი სიჩქარე მელას მიმართ, $(v_1 - v_2)$-ის ტოლია, თანახმად (1.1) სიჩქარეთა შეკრების წესისა, და დასაჭერად მან x_0 მანძილი უნდა გაირბინოს. ნათელია, $t=x_0/(v_1-v_2)$.

მელას მიმართ მწევრის ფარდობითი სიჩქარის გამოთვლა საკმაოდ იოლია და პასუხს უშუალოდ წერენ. მაგრამ მისი გამოყვანა (1.1) წესიდან არცთუ იშვიათად უჭირთ – საჭიროა მოდულისა და გეგმილის განსხვავება. უამისოდ რთულ შემთხვევებში ვერ გავერკვევით, ამიტომ გულდასმით განვიხილოთ ეს მხარე.

ამოცანა 1.2. გზატკეცილზე ავტობუსი და ავტომობილი ერთი მიმართულებით მოძრაობს შესაბამისად 40 კმ/სთ და 60 კმ/სთ სიჩქარით, ხოლო შემხვედრად – მოტოციკლისტი 30 კმ/სთ სიჩქარით. განსაზღვრეთ ავტომობილისა და მოტოციკლისტის სიჩქარე ავტობუსის მიმართ.

ა მ ო ხ ს ნ ა. რასაკვირველია, სიჩქარეები დედამიწის მიმართაა მოცემული. მოძრავი ათვლის სისტემა ავტობუსს დავუკავშიროთ და შემდეგი აღნიშვნებით ვისარგებლოთ:

$$v_s = 40 \text{ კმ/სთ},\ v_1 = 60 \text{ კმ/სთ},\ v_2 = 30 \text{ კმ/სთ}$$

(ასოები სიჩქარეთა მოდულს აღნიშნავს). სიჩქარეთა შეკრების (1.1) წესის თანახმად, ავტომობილისა და მოტოციკლისტის სიჩქარე ავტობუსის მიმართ შესაბამისად ტოლია (ყურადღება მიაქციეთ ნიშნებს):

$$\mathbf{v}_1' = \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_s, \ \mathbf{v}_2' = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_s. \qquad (1.2)$$

X (დედამიწასთან დაკავშირებული სისტემის) და X' (ავტობუსთან დაკავშირებული სისტემის) ღერძები ავტობუსის მოძრაობის მხარეს მივმართოთ და (1.2) ტოლობანი დავაგეგმილოთ:

$$v_{1x}' = v_{1x} - v_{sx}, \ v_{2x}' = v_{2x} - v_{sx}. \qquad (1.3)$$

(1.3) ტოლობათა მარჯვენა მხარეში ვექტორთა გეგმილები მოდულებით შევცვალოთ. ამის გაკეთება მხოლოდ იმ შემთხვევაში შეიძლება, როდესაც ვექტორის მიმართულება ცნობილია:

$$v_{1x} = v_1 > 0, \ v_{sx} = v_s > 0, \ v_{2x} = -v_2 < 0.$$

მარცხენა მხარეში გეგმილებს ვტოვებთ, ვინაიდან მიმართულება გამოთვლის შემდეგ გაირკვევა. შევიტანოთ მნიშვნელობები (1.3)-ში:

$$v_{1x}' = v_1 - v_s = 20 \text{ კმ/სთ} = v_1' > 0,$$

$$v_{2x}' = -v_2 - v_s = -70 \text{ კმ/სთ} = -v_2' < 0.$$

$v_2'<0$ ნიშნავს, რომ მოტოციკლისტი ავტობუსის მიმართ X, X' ღერძების მიმართულების საპირისპიროდ გადაადგილდება.

სათანადო უნარ-ჩვევებისა და გამოცდილების შეძენის შემდეგ რთული არ არის სიჩქარეთა შეკრების წესის კორექტული ჩაწერა უშუალოდ მოდულებისათვის, როცა სიჩქარეები ერთი წრფის გასწვრივაა მიმართული (დაგეგმილების გამოტოვებით – ასეც მოვიქეცით მწევრის ფარდობითი სიჩქარის გამოთვლისას). მაგრამ უნდა გვახსოვდეს, რომ ამის გაკეთება მხოლოდ მაშინ შეიძლება, თუ ცნობილია სიჩქარეთა მიმართულება. როდესაც მიმართულება უცნობია, დაგეგმილება აუცილებელია.

ამოცანა **1.3.** აეროსტატიდან, რომელიც $\mathbf{u}$ სიჩქარით ეშვება, ზევით ისვრიან სხეულს $\mathbf{v}_0$ სიჩქარით დედამიწის მიმართ. რა დროის შემდეგ გაუსწორდება სხეული აეროსტატს და მანამდე რისი ტოლი იქნება მათ შორის უდიდესი მანძილი? რას უდრის მათ შორის მანძილი იმ მომენტში, როდესაც სხეული უდიდეს სიმაღლეს მიაღწევს დედამიწის მიმართ?

ა მ ო ხ ს ნ ა. ათვლის სისტემა აეროსტატს დავუკავშიროთ. (1.1) სიჩქარეთა შეკრების წესის თანახმად, აეროსტატის მიმართ სხეულის ასროლის საწყისი სიჩქარე $\mathbf{v}_0' = \mathbf{v}_0 - \mathbf{u}$. რადგან $\mathbf{v}_0$ და $\mathbf{u}$ ვექტორები საპირისპიროდაა მიმართული, მოდულებისათვის გვექნება: $v_0' = v_0 + u$ (მიაქციეთ ყურადღება, რომ მოდულებისათვის დაწერილი ტოლობა სა-

კოორდინატო ღერძის მიმართულების არჩევაზე არ არის დამოკიდებული). აეროსტატი თანაბრად მოძრაობს, ამიტომ მის მიმართაც სხეულის აჩქარება g-ს ტოლია – ყველა ინერციულ სისტემაში სხეულის აჩქარებას ერთნაირი მნიშვნელობა აქვს. ასე რომ, აეროსტატის მიმართ გვაქვს v_0' საწყისი სიჩქარით ვერტიკალურად ასროლილი სხეულის მოძრაობა g აჩქარებით. ახლა საკმარისია ცნობილი ფორმულები გამოვიყენოთ.

დედამიწის მიმართ უდიდესი სიმაღლის მიღწევისას სხეული უძრავია. ამიტომ აეროსტატის მიმართ სხეულის სიჩქარის v' მოდული აეროსტატის სიჩქარის მოდულის ტოლია: $v' = u$ (მიმართულებით ეს სიჩქარეები საპირისპიროა) და საძიებელი მანძილისათვის მივიღებთ:

$$l = \frac{(v_0')^2 - (v')^2}{2g} = \frac{v_0^2 + 2v_0 u}{2g}.$$

შეხვედრამდე მანძილი (გასწრების შემდეგ იგი თანდათან იზრდება) უდიდესი იქნება, როდესაც სხეული აეროსტატის მიმართ გაჩერდება: $v' = 0$:

$$l_m = \frac{(v_0')^2}{2g} = \frac{(v_0 + u)^2}{2g}.$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ უდიდესი სიმაღლის მიღწევისა და უკან ჩამოვარდნის დროები ტოლია, იოლად დავწერთ აგდებიდან რა დროის შემდეგ გაუსწორდება სხეული აეროსტატს:

$$\tau = 2\frac{v_0'}{g} = 2\frac{(v_0 + u)}{g}.$$

ამოხსენით ამოცანა დედამიწასთან დაკავშირებული ათვლის სისტემის მიმართ და დარწმუნდებით, რამდენად მოუხერხებელია იგი.

როდესაც მოძრაობის ფარდობითობას *კინემატიკური თვალსაზრისით* ვიხილავთ, მთავარია მოხერხებული ათვლის სისტემა ავირჩიოთ, ხოლო იგი ინერციული იქნება თუ არა, გადამწყვეტი მნიშვნელობა არა აქვს.

ამოცანა 1.4. H სიმაღლიდან სხეული თავისუფლად ვარდება უსაწყისო სიჩქარით. ერთდროულად უფრო მცირე h სიმაღლიდან ვერტიკალურად ზევით ისვრიან მეორე სხეულს. განსაზღვრეთ მისი საწყისი სიჩქარე, თუ ორივე სხეული მიწაზე ერთდროულად ეცემა.

ა მ ო ხ ს ნ ა. ნაცვლად კინემატიკური განტოლებების ანალიზისა (დედამიწის მიმართ), შემდეგნაირად მოვიქცეთ: ათვლის სისტემა აგდებულ სხეულს დავუკავშიროთ. რადგან ორივე სხეული ერთნაირი g აჩქარებით მოძრაობს, მათი ფარდობითი აჩქარება ნულის ტოლია. ე. ი. პირველი სხეული ამ ათვლის სისტემაში (მეორის მიმართ) თანაბარწრფივად

მოძრაობს. ნათელია, შეხვედრამდე ის H-h მანძილს გაივლის, ხოლო დრო მისი ვარდნის $t=(2H/g)^{1/2}$ დროის ტოლია, ვინაიდან შეხვედრა დედამიწის ზედაპირზე მოხდა. აქედან მეორე სხეულის აგდების სიჩქარე

$$v_0=(H-h)\sqrt{\frac{g}{2H}}.$$

ფაქტობრივად, ამოცანა ზეპირად ამოვხსენით ათვლის სისტემის მოხერხებულად არჩევის წყალობით. შეადარეთ კინემატიკური განტოლებების საფუძველზე ამოხსნას.

ამოცანა **1.5.** ლიფტი მოძრაობს ზევით 0,2 მ/წმ^2 აჩქარებით. ჭერიდან მოწყდა ქანჩი. რა დროში დაეცემა იგი იატაკზე, თუ ლიფტის სიმაღლეა 2,5 მ? რისი ტოლია ამავე დროში ქანჩის გადაადგილება შახტის მიმართ, თუ მისი მოწყვეტის მომენტში ლიფტის სიჩქარეა 2,0 მ/წმ?

ა მ ო ხ ს ნ ა. ათვლის სისტემა ლიფტს დავუკავშიროთ. რადგან იგი არ არის ინერციული სისტემა, სხეულის ვარდნის აჩქარება მის მიმართ აღარ იქნება $\mathbf{g}$-ს ტოლი. როდესაც მოძრავი სისტემა არაინერციულია (აჩქარებულად მოძრაობს უძრავი ინერციული სისტემის მიმართ) აჩქარებები სიჩქარეთა მსგავსად იკრიბება – შდრ. (1.1), იხ. ამოცანა 1.14:

$$\mathbf{a}=\mathbf{a}'+\mathbf{a}_s. \qquad (1.4)$$

სხეულის $\mathbf{a}$ აჩქარება უძრავი ინერციული ათვლის სისტემის (შახტის) მიმართ ტოლია მოძრავი არაინერციული სისტემის (ლიფტის) მიმართ სხეულის $\mathbf{a}'$ აჩქარებისა და უძრავი სისტემის მიმართ მოძრავი სისტემის $\mathbf{a}_s$ აჩქარების ვექტორული ჯამისა.

ჩვენს შემთხვევაში $\mathbf{a}=\mathbf{g}$ და (1.4)-დან $\mathbf{a}'=\mathbf{g}-\mathbf{a}_s$. $\mathbf{g}$ და $\mathbf{a}_s$ ვექტორები საპირისპიროდაა მიმართული, ამიტომ მოდულებისათვის მივიღებთ: $a'=g+a_s$, $a'=9{,}8+0{,}2=10$ მ/წმ^2. ვარდნის დროს თანაბარაჩქარებული მოძრაობის ფორმულიდან ვიპოვით:

$$t=\sqrt{2h/a'}=0{,}7 \text{ წმ.}$$

მოწყვეტის მომენტში სხეულს შახტის მიმართ იგივე სიჩქარე აქვს, რაც ლიფტს. შახტის (ინერციული სისტემის) მიმართ სხეული თავისუფლად ვარდება ზევით მიმართული საწყისი სიჩქარით, ამიტომ გადაადგილება

$$s=-v_0t+\frac{gt^2}{2}. \qquad (1.5)$$

გადაადგილება სხვანაირადაც შეგვიძლია გამოვთვალოთ, კერძოდ:

$$s=h-(v_0t+a_st^2/2). \qquad (1.6)$$

ახსენით (1.6) ტოლობის შინაარსი. შეამოწმეთ, რამდენად კორექტულად ფლობთ მიახლოებითი გამოთვლების წესებს: (1.5) და (1.6) ორივე ფორმულიდან უნდა მიიღოთ, რომ $s = 1{,}0$ მ.

კითხვები, ამოცანები

1.6. მეტროს ესკალატორს მასზე ქვევით მიმავალი მგზავრი ორ წუთში ჩაჰყავს. თუ მგზავრი ორჯერ სწრაფად იმოძრავებს, იგი 1,5 წუთში ჩავა. რა დროში ჩაიყვანს ესკალატორი მასზე მდგომ მგზავრს?

1.7. ორი მატარებელი პარალელურ ლიანდაგებზე შემხვედრად მოძრაობს v_1 და v_2 სიჩქარეებით. პირველი მატარებლის თითოეული ვაგონის სიგრძეა l_1, ვაგონების რიცხვი – n_1, მეორე მატარებლისა – შესაბამისად l_2, n_2. რა დროის განმავლობაში ხედავენ მგზავრები ფანჯარაში შემხვედრ მატარებელს?

1.8. რომელ შემთხვევაში აავსებს უფრო სწრაფად წვიმა თავლია კასრს: უქარო თუ ქარიან ამინდში?

1.9. ტანკი v სიჩქარით მოძრაობს. რას უდრის დედამიწის მიმართ მუხლუხის შემდეგი წერტილების სიჩქარე: ზედასი, ქვედასი, ტანკის მიმართ ვერტიკალურად მოძრავისა?

1.10. ორი ავტომობილი ურთიერთმართობი მიმართულებით უახლოვდება გზაჯვარედინს v_1 და v_2 სიჩქარეებით. განსაზღვრეთ პირველი ავტომობილის სიჩქარე მეორის მიმართ და მეორის სიჩქარე პირველის მიმართ.

1.11. მოცურავემ მდინარე დინებისადმი α კუთხით უნდა გადაცუროს. როგორი მინიმალური $\mathbf{v}'$ სიჩქარე უნდა ჰქონდეს მას წყლის მიმართ, რომ ეს შეძლოს? დინების სიჩქარეა $\mathbf{v}_0$.

1.12. $h = 100$ მ-ით დაშორებულ ერთ შვეულზე მდებარე ორი წერტილიდან ერთდროულად ისვრიან ორ სხეულს: ზედას – ვერტიკალურად ქვევით, ქვედას – ვერტიკალურად ზევით ერთნაირი $v_0 = 10$ მ/წმ მოდულის მქონე სიჩქარით. რა დროის შემდეგ და რა სიმაღლეზე შეხვდებიან ისინი ერთმანეთს?

1.13. ვერტიკალურად ზევით გასროლილი შუშხუნა ტრაექტორიის უმაღლეს წერტილში სკდება უამრავ პატარა ნაწილად, რომლებიც ყველა მიმართულებით იტყორცნება ერთნაირი სიჩქარით. როგორ ზედაპირზე მდებარეობენ ისინი დროის ნებისმიერ მომენტში?

1.14. გამოიყვანეთ (1.4) თანაფარდობა.

2. ინერციის პრინციპი. ინერციული ათვლის სისტემა

1. სხვადასხვა ქვეყნის სახელმძღვანელოებში ნიუტონის პირველი, ანუ ინერციის კანონის (ქვემოთ დავასაბუთებთ, რომ უპრიანია მას ინერციის პრინციპი ვუწოდოთ) გადაცემის დაკვირვებული ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მისი სწავლების ტრადიცია და მეთოდიკა არადამაკმაყოფილებელია. შორს არის ჭეშმარიტებისაგან ის გავრცელებული აზრი, რომ ინერციის კანონი ფიზიკის სწავლების ერთ-ერთი იოლი საკითხია. გავაანალიზოთ თემის როგორც ფიზიკური, ასევე მეთოდური მხარე.

ნიუტონმა პირველი კანონი შემდეგნაირად ჩამოაყალიბა [2]:

ყოველი სხეული ინარჩუნებს თავისი უძრაობისა ან თანაბარი და წრფივი მოძრაობის მდგომარეობას, ვიდრე და რამდენადაც მოდებული ძალები არ აიძულებს მას შეცვალოს ეს მდგომარეობა.

ნიუტონს არ დაუკონკრეტებია, რომ I კანონი (და სხვებიც) ინერციული ათვლის სისტემების მიმართაა მართებული. საქმე ის არის, რომ ნიუტონი აღიარებდა აბსოლუტური, ჭეშმარიტი მოძრაობის არსებობას, როგორც აბსოლუტური სივრცისა და დროის მიმართ მიმდინარე პროცესს და ასეთი მოძრაობისათვის ჩამოაყალიბა მექანიკის კანონები. აბსოლუტური დრო და სივრცე აბსოლუტური, გამოყოფილი სისტემის როლს ასრულებდა და, პრინციპული თვალსაზრისით, ნიუტონს არ სჭირდებოდა სხვა ათვლის სიტემა. რასაკვირველია, ნიუტონი სხეულების ფარდობით (მისი ტერმინოლოგიით, მოჩვენებით) მოძრაობასაც განიხილავდა, მაგალითად, პლანეტის გარშემო თანამგზავრის ბრუნვას. ასეთ შემთხვევაში, ნათელია, ათვლის სისტემას პლანეტას უკავშირებდა, ე. ი. ფაქტობრივად დაასაბუთა, რომ ასეთი, აბსოლუტური სისტემის მიმართ თანაბარწრფივად მოძრავი (გარკვეული მიახლოებით) სისტემა ინერციულია. უფრო მეტიც, მან პირველმა მოგვცა გალილეის ფარდობითობის პრინციპის ზოგადი ფორმულირება. მაგრამ მას ცალკე არ გამოუყვია ინერციული ათვლის სისტემათა ერთობლიობა, რადგან მისთვის ამოსავალი აბსოლუტური სისტემისა და აბსოლუტური მოძრაობის არსებობა იყო.

აბსოლუტური სივრცისა და დროის კრიტიკამ ფიზიკური თვალსაზრისით არსებითი შედეგი მოგვცა – თანდათან გამოიკვეთა ინერციული ათვლის სისტემების მნიშვნელობა (ინერციული სისტემის იდეა 1870 წელს წამოაყენა კ. ნეიმანმა), ხოლო ფარდობითობის სპეციალური თეორიის შექმნის შემდეგ ნათელი გახდა, რომ აბსოლუტური, გამოყოფილი ათვლის სისტემა არ არსებობს.

* * *

არ გვინდა გამარტივებული წარმოდგენა შეიქმნას ნიუტონის ნაღვაწზე, რომლის სიდიადეზე დრო არ მოქმედებს, ამიტომ მოვიყვანთ აინშტაინის გამონათქვამს ნიუტონზე: „შენ იპოვე შენ დროში შესაძლებელი ერთადერთი გზა“. თანამედროვე ფიზიკა უარყოფს აბსოლუტური სივრცისა და დროის, სისტემის არსებობას, მაგრამ არ უარყოფს აბსოლუტურ მოძრაობას. ზემოთაც ითქვა, რომ პრობლემაში რამდენადმე გარკვევისათვის მთელი მეცნიერული ცოდნის მოშველიებაა საჭირო. დაინტერესებულ მკითხველს ორიენტაციისათვის [3] შრომებზე მივუთითებთ.

* * *

ამრიგად, ინერციის კანონის სრულყოფილი ჩამოყალიბებისათვის აუცილებელია იმის ხაზგასმა, რომ იგი მართებულია მხოლოდ ინერციული ათვლის სისტემების მიმართ. ერთი შეხედვით, საკმარისია ნიუტონისეულ ფორმულირებას დავუმატოთ გამოთქმა „ინერციული ათვლის სისტემების მიმართ“. ასეც იქცეოდნენ ადრე და ზოგჯერ – ახლაც. მაგრამ ეს შეკრულ წრეს გვაძლევს: ნიუტონის I კანონი ის კანონია, რომელიც ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ სრულდება, ხოლო ინერციული ათვლის სისტემა ისეთი სისტემაა, რომლის მიმართაც სრულდება I კანონი (?!). ფაქტობრივად, საქმე ტავტოლოგიამდე დადის, რომლის გახსნა არც ისე მარტივია [4].

საკმაო ხანი გავიდა მას შემდეგ, რაც დამკვიდრდა სხვა ფორმულირება, როგორც თითქოსდა ტავტოლოგიისაგან თავისუფალი:

არსებობს ისეთი ათვლის სისტემები, რომელთა მიმართ სხეული უძრავია ან თანაბარწრფივად მოძრაობს, თუ მასზე სხვა სხეულები არ მოქმედებს.

ამ ფორმულირებაში მახვილი გადატანილია იმ ცდისეულ ფაქტზე, რომ ასეთი სისტემები რეალურად არსებობს (გარკვეული სიზუსტით). შემდეგ აღნიშნავენ, რომ მათ ინერციული ათვლის სისტემები ეწოდება. მაგრამ ეს *დარქმევაა*, შეკრული წრისათვის გვერდის ავლა, და არა – ლოგიკურად გამართული განსაზღვრება. ტავტოლოგია მაშინვე იჩენს თავს, თუ შევეცდებით, ვუპასუხოთ კითხვაზე: რას ეწოდება ინერციული ათვლის სისტემა? არც მოყვანილი ფორმულირების არსის აღქმაა მარტივი, როგორც ეს ჰგონიათ. შევადაროთ იგი შემდეგ გამონათქვამს:

არსებობს ისეთი ათვლის სისტემები, რომელთა მიმართ ნებისმიერი სხეული უძრავია ან თანაბარწრფივად მოძრაობს.

ორი მსგავსი მტკიცებიდან პირველი ფიზიკის უზოგადესი კანონია,

მერე – ტრივიალური კინემატიკური მოსაზრება. რატომ? კითხვაზე თუ არ ვუპასუხეთ, ნიუტონის I კანონის მოყვანილი ფორმულირება სიტყვების უბრალო თამაშად გამოიყურება. განსხვავება განპირობებულია სივრცისა და დროის თვისებებით. პირველ შემთხვევაში გამოყოფილია ისეთი ათვლის სისტემები, რომელთა მიმართ სივრცე და დრო ერთგვაროვანია და იზოტროპიული, მეორეში – არა. ამრიგად, I კანონის ამ ფორმულირების ღრმა გააზრებისათვის აუცილებელია მის განხილვამდე სივრცე-დროის თვისებების შესწავლა. ასეა მირიანაშვილის ცნობილ ზოგადი მექანიკის კურსში [5]. მაგრამ ამდაგვარი გადაწყვეტა საშუალო სკოლის კურსისათვის რთულია, არ გამოდგება.

ამრიგად, ინერციის კანონის სწავლების დამკვიდრებული მეთოდიკა ვერ სცილდება შეკრული წრის ფარგლებს. უფრო მეტიც, აინშტაინი შეკრულ წრეს ინერციის კანონის მეცნიერულად სუსტ ადგილად თვლიდა, რომელიც ფარდობითობის ზოგადმა თეორიამ გამოასწორა [31, გვ. 46].

2. ჭკუის სასწავლებელია თვალი გავადევნოთ ნიუტონის I კანონის გადაცემის „ევოლუციას“ [6] სახელმძღვანელოში. მართალია, ეს სახელმძღვანელო „სცენიდან ჩამოვიდა“, მაგრამ, ჯერ ერთი, მის მეთოდოლოგიაზე სხვადასხვა თაობის მასწავლებლები აღიზარდნენ, და მეორეც, ხარვეზები დღესაც ტიპურია და გამოუსწორებელი რჩება, ბრმად იმეორებენ.

ადრეულ გამოცემაში, რომელსაც დამხმარე სახელმძღვანელოს გრიფი ჰქონდა, ასეთი ფორმულირებაა მოცემული:

სხეული მოძრაობს აჩქარების გარეშე, ე. ი. წრფივად და თანაბრად ან უძრავია, თუ მასზე ყველა სხვა სხეულის მოქმედება კომპენსირებულია.

შემდეგ აღნიშნულია, რომ I კანონი მართებულია ინერციული ათვლის სისტემების მიმართ. ეს კი, როგორც გავარკვიეთ, შეკრულ წრეს იძლევა. მაგრამ არსებითი სხვა არის. ავტორების „წვლილი“ ტრადიციულთან შედარებით იმით გამოიხატება, რომ ცნება „სხეული, რომელზედაც სხვა სხეულები არ მოქმედებს“ შეცვლილია ცნებით – „სხეულზე სხვა სხეულების მოქმედება კომპენსირებულია“. როგორც ჩანს, ავტორების თვალსაზრისით, ეს უკანასკნელი უფრო მისაწვდომია მოსწავლისათვის, ვიდრე პირველი. მაგრამ დავსვათ კითხვა: როგორ დავადგინოთ, რომ სხეულზე სხვა სხეულების მოქმედება კომპენსირებულია? პასუხი შემდეგია: ასეთი სხეული ინერციულ სისტემათა მიმართ ან უძრავია, ან თანაბარწრფივად მოძრაობს. რა გამოდის? ათვლის სისტემის ინერციულობის დასადგენად გვჭირდება სხეული, რომელზედაც სხვა სხეულების მოქმედება კომპენსირებულია, ხოლო იმის დასადგენად, რომ სხეულზე სხვა

სხეულების მოქმედება კომპენსირებულია, უნდა ვიცოდეთ, რომელია ინერციული ათვლის სისტემა. კვლავ შეკრული წრე მივიღეთ, რომლის გახსნაც უკვე შეუძლებელია. ეს კი ცნებათა შეცვლამ გამოიწვია.

პრობლემას აქვს სხვა, უფრო ღრმა მხარე. გალილეი პირველ ფიზიკოსად ითვლება უპირველესად იმიტომ, რომ მან აღმოაჩინა ფიზიკური კვლევის მეთოდი, მანამდე სრულიად უცნობი: რეალური ცდების საფუძველზე, არაძირითადის უგულებელყოფით, წარმოსახვითი, იდეალიზებული ცდების განხილვაზე გადასვლა და მათი გამოკვლევით ბუნების ზოგადი კანონების დადგენა – უამისოდ, ასეთი *აბსტრაქციის, მოდელირების* გარეშე, შეუძლებელია ფიზიკის შექმნა და შესწავლა. ცნებათა ზემოაღნიშნული შეცვალა კი აბსტრაქციის აუცილებლობას უგულებელყოფს. ეს არ არის ფიზიკის შესწავლის გზა.

შემდგომ გამოცემაში, რომელსაც უკვე სახელმძღვანელოს გრიფი აქვს, ავტორები იძლევიან „კრიტერიუმს", თუ რა შემთხვევაშია კომპენსირებული სხეულზე სხვა სხეულების მოქმედება: ასეთი სხეული დედამიწის მიმართ ან უძრავია, ან თანაბარწრფივად მოძრაობს. ამით ყველა ინერციული სისტემიდან გამოყოფილია დედამიწა, ეს კი ეწინააღმდეგება ფიზიკის ერთ-ერთ ფუნდამენტურ პრინციპს – ფარდობითობის პრინციპს, რომლის თანახმად *ყველა* ინერციული ათვლის სისტემა ტოლფასია. ასეთი „მიგნება" ფიზიკური აზროვნების განვითარების ნაცვლად ამახინჯებს მას, ბარიერს ქმნის ფარდობითობის თეორიის გაგებისათვის.

რაც შეეხება ინერციის კანონს, ავტორები იყენებენ ზემომოყვანილ ფორმულირებას და ვარიაციების შემდეგ ასეთ საბოლოო სახეს აძლევენ:

არსებობს ისეთი ათვლის სისტემები, რომელთა მიმართ გადატანით მოძრავი სხეული ინარჩუნებს მუდმივ სიჩქარეს, თუ მასზე სხვა სხეულები არ მოქმედებს ანდა მათი მოქმედება კომპენსირებულია.

როგორც ვხედავთ, ავტორები ჯიუტად არ ეშვებიან ცნებას სხეულისა, რომელზედაც სხვა სხეულების მოქმედება კომპენსირებულია, თუმცა ლოგიკურად იგი ზედმეტია, რამეთუ ნახსენებია „სხეული, რომელზედაც სხვა სხეულები არ მოქმედებს" (ის, რომ შემდეგ ავტორებმა მათი გამორჩეული ცნება ფრჩხილებში მოათავსეს, საქმის არსს არ ცვლის). მაგრამ პრინციპულად მიუღებელი სხვა რამეა. ავტორები სათანადო პარაგრაფის მთელ ტექსტში მხოლოდ ისეთ მაგალითებს იხილავენ, როდესაც სხეულზე სხვა სხეულების მოქმედება კომპენსირებულია. ფორმულირებაში კი მოულოდნელად ჩნდება „სხეული, რომელზედაც სხვა სხეულები არ მოქმედებს" და იგი სხვაგან არსად არ მოიხსენიება. საკვანძო ცნების

ასეთი „პარტიზანული" გზით შემოპარება ყოვლად დაუშვებელია. არც ის არის სრულად ახსნილი, რა შუაშია გადატანითი მოძრაობა.

3. როგორ გადავჭრათ ნიუტონის I კანონის სწავლების პრობლემა? საჭიროა სწორად გავიაზროთ ამ კანონის „რანგი" და დავეყრდნოთ თავისუფალი სხეულის საკვანძო ცნებას.

ნიუტონის I კანონი ფიზიკის უზოგადესი კანონია – არ შემოისაზღვრება მხოლოდ მექანიკური მოძრაობით. იგი საშუალებას გვაძლევს ათვლის სისტემების სიმრავლიდან გამოვყოთ ინერციული ათვლის სისტემები, რომელთა მიმართ ფიზიკური (არა მხოლოდ მექანიკური) მოვლენები ყველაზე *მარტივი* სახით მიმდინარეობს. ეს კანონი ინვარიანტობის ერთ-ერთი პრინციპია და ფიზიკის სტრუქტურული იერარქიის მესამე, და არა მეორე, საფეხურს განეკუთვნება (იხ. სქემა შესავალში). ამიტომ უპრიანია მას ინერციის პრინციპი ვუწოდოთ. ასეთი გააზრებით ადვილად გავასწორებთ იმ არცთუ იშვიათ პრინციპულ შეცდომას, როდესაც ამტკიცებენ, რომ ნიუტონის I კანონი II კანონის შედეგია: თუ $\mathbf{F} = 0$, მაშინ $\mathbf{a} = 0$. სინამდვილეში ეს ნიშნავს, რომ II კანონი, რომელიც მექანიკური მოძრაობის კანონია (ე. ი. „რანგით" უფრო დაბალია – განეკუთვნება მეორე სტრუქტურულ საფეხურს), არ შეიძლება ეწინააღმდეგებოდეს ფიზიკის ფუნდამენტურ დებულებას – ინერციის პრინციპს (შთამბეჭდავია ნიუტონის შორსმჭვრეტელობა, რომელმაც I კანონი ცალკე გამოყო).

ლოგიკურია კითხვა: შესაძლებელი კი არის ასეთი უზოგადესი პრინციპის სრულფასოვანი გააზრება მხოლოდ მექანიკის ფარგლებში? დაკვირვებული განხილვა გვიჩვენებს, რომ პასუხი უარყოფითია. მიზეზი დაკავშირებულია მექანიკაში იმის უგულებელყოფასთან, რომ სხეულები შედგება ელემენტარული ნაწილაკებისაგან და არა წერტილებისაგან, რომლებსაც არ გააჩნიათ საკუთარი ველი და თვითმოქმედება. თანაბარწრფივი მოძრაობის „იდუმალების" რამდენადმე გახსნა ამას უკავშირდება.

დავაზუსტოთ თავისუფალი სხეულის ცნება. ერთი შეხედვით, ეს ადვილია: ჯერ კიდევ გალილეიმ და ნიუტონმა შემოიტანეს ცნება სხეულისა, რომელზედაც სხვა სხეულები არ მოქმედებს. თანამედროვე ფიზიკა ასაბუთებს ასეთი *აბსტრაქციის* მართებულობას. სხეულთა ურთიერთქმედება მცირდება მათ შორის მანძილის გაზრდისას (და პირიქით). ამიტომ, თუ წარმოვიდგენთ სხვა სხეულებიდან ძალზე დაშორებულ სხეულს (სწორედ ეს არის აბსტრაქცია), შეგვიძლია მასზე დანარჩენი სხეულების მოქმედება უგულებელვყოთ. მაგრამ ასეთი განცალკევებული სხეული შეიძლება არც მოძრაობდეს თავისუფლად, ანუ აჩქარების გარეშე ათვლის

ინერციული სისტემების მიმართ. მაგალითად, სხეული მოძრაობისას შეიძლება ბრუნავდეს მასათა ცენტრის გარშემო *სხვა სხეულების მოქმედების გარეშე*. თუ არ დავივიწყებთ, რომ ამ შემთხვევაში ელემენტარული ნაწილაკები აჩქარებით მოძრაობს მასათა ცენტრის გარშემო, ხოლო აჩქარებისას კი ისინი გამოასხივებენ, უნდა გავითვალისწინოთ გამოსხივების რეაქტიული მოქმედება სხეულზე: მისი მასათა ცენტრი აჩქარებით იმოძრავებს (ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ). მნიშვნელობა არა აქვს, რომ ეფექტი უმნიშვნელოა. ლაპარაკია პრინციპულ მხარეზე: თუ სხეულის ნაცვლად ნაწილაკების მოძრაობას განვიხილავთ, გამოსხივების რეაქცია უკვე არსებითი იქნება. გაკვრით შევეხოთ პრობლემის არსს. ელემენტარული ნაწილაკი ველის გარეშე არ არსებობს. როდესაც ნაწილაკი თავისი ველის მიმართ უძრავია, ასეთი უძრაობა ფარდობითია. ამის საფუძველზე შეიძლება ინერციის პრინციპის გაგება. თუ ნაწილაკი თავისი ველის მიმართ აჩქარდება, იგი გამოასხივებს და მოძრაობა აბსოლუტურ ხასიათს იძენს. დაწვრილებით იხ. [3].

მაშასადამე, *განცალკევებული სხეული ჭეშმარიტად თავისუფალია, თუ არ ასხივებს*. ამისათვის თავისუფალი სხეული გადატანით უნდა მოძრაობდეს (ძირითად მდგომარეობაში). ასეთ შემთხვევაში მისი არც ერთი წერტილი არ იმოძრავებს აჩქარებით და არ გვექნება გამოსხივება — თავისუფალი სხეული შეგვიძლია ნივთიერ წერტილად ჩავთვალოთ. ასეთია მისი მოდელური წარმოდგენა.

o განასხვავეთ თავისუფალი სხეულისა და სხეულის გადატანითი მოძრაობა.

თავისუფალი სხეულის ცნებაზე დაყრდნობით, ადვილია ინერციის პრინციპის ჩამოყალიბება და ინერციული ათვლის სისტემის განსაზღვრა ისე, რომ არ მივიღოთ შეკრული წრე.

თავისუფალ სხეულთან დაკავშირებულ ათვლის სისტემას ინერციული ათვლის სისტემა ეწოდება.

ინერციის პრინციპია: *ორი თავისუფალი სხეული ერთმანეთის მიმართ თანაბარწრფივად მოძრაობს ან უძრავია.*

ვინაიდან ინერციული ათვლის სისტემა ინერციის კანონისაგან დამოუკიდებლად, თავისუფალი სხეულის ცნების საფუძველზე, განვსაზღვრეთ, თვით კანონი ასეც შეგვიძლია ჩამოვაყალიბოთ:

თავისუფალი სხეული ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ თანაბარწრფივად, ანუ მუდმივი სიჩქარით მოძრაობს ან უძრავია.

მოყვანილი ფორმულირება წარმოაჩენს ინერციის პრინციპის შემდეგ შინაარსს: იგი გვაძლევს შესაძლებლობას სივრცე-დროის ეტალონების

ისეთი შერჩევისა (უამისოდ ათვლის სისტემა არ არსებობს), რომ თავისუფალი სხეულის მოძრაობა უმარტივესი იყოს – თანაბარწრფივი. ამაზე პირველად ლანგემ მიუთითა XIX ს-ის 80-იან წლებში [7]. მართლაც, წარმოვიდგინოთ, რომ დამზადებულია უჩვეულო საათი, მაგალითად, ლოგარითმული სკალით. ასეთი საათის მიხედვით, თავისუფალი სხეულის მოძრაობა აღარ იქნება თანაბარწრფივი (ინერციული სისტემის მიმართ).

ამასთან დაკავშირებით, ზედმეტი არ იქნება, თუ დრო-სივრცის თვისებებს შევეხებით. თავისუფალი სხეული უძრაობისა და თანაბარწრფივი მოძრაობის მდგომარეობას განუსაზღვრელად ინარჩუნებს ინერციული სისტემების მიმართ, ანუ მისი მდგომარეობა არ არის დამოკიდებული:

- დროის საწყისი მომენტის არჩევაზე – დროის ყოველი მომენტი ტოლფასია, დრო ერთგვაროვანია;
- კოორდინატთა სისტემის სათავის არჩევაზე – სივრცის ყოველი წერტილი ტოლფასია, სივრცე ერთგვაროვანია;
- კოორდინატთა სისტემის ღერძთა მიმართულების არჩევაზე – სივრცეში ყველა მიმართულება ტოლფასია, სივრცე იზოტროპიულია.

მაშასადამე, ინერციული ათვლის სისტემების მიმართ დრო ერთგვაროვანია, სივრცე – ერთგვაროვანი და იზოტროპიული. არაინერციულ ათვლის სისტემათა მიმართ დრო-სივრცეს ეს თვისებები არ გააჩნია. მართლაც, ინერციული სისტემის მიმართ უძრავი თავისუფალი სხეული არაინერციულის მიმართ აჩქარებულად მოძრაობს სხვა სხეულების მოქმედების გარეშე – დრო-სივრცე არაერთგვაროვანი და ანიზოტროპიულია.

„დიდი აფეთქების" თეორიის თანახმად, სამყარო შეიქმნა ზემკვრივი მატერიის აფეთქების შედეგად. წარმოშობილი ნივთიერებისა და ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ურთიერთგარდაქმნა შემდგომ შეწყდა... გამოსხივება აგრძელებს განცალკევებულად არსებობას. ასეთი რელიქტური (ნარჩენი) გამოსხივება ექსპერიმენტულად იქნა დაფიქსირებული 1965 წელს. ცდით დადგინდა, რომ რელიქტური გამოსხივების მიმართ უძრავ ათვლის სისტემაში იგი ერთგვაროვანი და იზოტროპიულია (გამოსხივების ინტენსივობა ყველა მიმართულებით ერთნაირია). ათვლის ასეთი სისტემა ტოლფასია უძრავ ვარსკვლავებთან დაკავშირებული სისტემისა. ამიტომ ინერციული ათვლის სისტემა ასეც შეიძლება განისაზღვროს: მის მიმართ რელიქტური გამოსხივება ერთგვაროვანი და იზოტროპიულია.

4. ვნახოთ, როგორ მივაწოდოთ წარმოდგენილი ანალიზი მოსწავლეს.

გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. დინამიკა მოძრაობას მის გამომწვევ მიზეზებთან კავშირში სწავლობს. დავიწყოთ უმარტივესი შემთხვევის განხილვით, როდესაც სხეულზე სხვა სხეულები არ მოქმედებს. როგორ იმოძრავებს ასეთი სხეული?

პირველად ამ კითხვაზე ძველი საბერძნეთის გამოჩენილმა ფილოსოფოსმა არისტოტელემ (IV ს. ძვ. წ.) უპასუხა: თუ სხეულზე სხვა სხეულები არ მოქმედებს, იგი უძრავია, ხოლო სხეულის თანაბარი მოძრაობისათვის მასზე გამუდმებით უნდა ვიმოქმედოთ. დაკვირვებები თითქოს ადასტურებს ასეთ დასკვნას. სხეული უძრავია, ვიდრე მასზე არ ვიმოქმედებთ; მოძრავი სხეული გაჩერდება, თუ მოქმედებას შევწყვეტთ. ორი ათასი წლის განმავლობაში არისტოტელეს მოსაზრება ჭეშმარიტებად ითვლებოდა. ეს იმაზე მიუთითებს, რომ მექანიკური მოძრაობის არსის გარკვევა საკმაოდ რთულია. შეცდომა გამოასწორა დიდმა იტალიელმა მეცნიერმა გალილეიმ (XVII ს.).

რანაირად და როგორ დასკვნამდე მივიდა გალილეი? კინემატიკიდან ვიცით, რომ მოძრაობა ფარდობითია. ამიტომ სიმარტივისათვის მოძრაობა ჯერ დედამიწის მიმართ განვიხილოთ. გალილეიმ ცდების საშუალებით შეისწავლა სხვადასხვა სხეულის „თავისთავადი“ მოძრაობა დახრილ სიბრტყეზე. მან დაადგინა, რომ დახრილ სიბრტყეზე ქვევით დაშვებისას სხეულები აჩქარებულად მოძრაობს – სიჩქარე იზრდება; ზევით ბიძგის შემდეგ – შენელებულად, სიჩქარე მცირდება. გალილეიმ დაასკვნა, რომ, თუ სიბრტყეს დახრა არ ექნება, მოძრაობა არც აჩქარდება და არც შენელდება. მაშასადამე, ჰორიზონტალურ ზედაპირზე სხეულები თანაბრწრფივად უნდა მოძრაობდეს. სინამდვილეში კი ასე არ ხდება: ჰორიზონტალურ ზედაპირზე გაგორებული ბირთვი ბოლოს მაინც ჩერდება. რატომ? ბირთვზე სხვა სხეულები მოქმედებს – დედამიწა, საყრდენი, ჰაერი. ეს მოქმედება ხახუნს იწვევს და შედეგად იგი ჩერდება. გალილეიმ, უგულებელყო რა სხვა სხეულების მოქმედება, ცდის შედეგები შემდეგნაირად განაზოგადა:

თუ სხეულზე სხვა სხეულები არ მოქმედებს, იგი ან უძრავია, ან თანაბარწრფივად მოძრაობს.

ასე გასწორდა არისტოტელეს შეცდომა და გადაიჭრა რთული პრობლემა. ამგვარად, თუ სხეულზე სხვა სხეულები არ მოქმედებს, მისი მოძრაობა უმარტივესი სახისაა. დავუკვირდეთ, როგორ მივიდა გალილეი ასეთ დასკვნამდე. ნამდვილი, რეალური ცდების საფუძველზე იგი გადავიდა წარმოსახვითი, იდეალიზებული ცდების განხილვაზე, უგულებელყო რა არამთავარი მხარე მოვლენისა. მსგავსი იდეალიზაციის, არაძირითადის უგულებელყოფის, აბსტრაქციის გარეშე საერთოდ შეუძლებელია ფიზიკის შექმნა და შესწავლა. ეს იყო უდიდესი აღმოჩენა არა მარტო ფიზიკის ერთ-ერთი უზოგადესი კანონისა, არამედ ფიზიკური კვლევის მეთოდისაც. გალილეის შემდეგ დამკვიდრდა ფიზიკური კვლევის ექსპე-

რიმენტული მეთოდი: *ცოდნის წყარო და ჭეშმარიტების კრიტერიუმი არის ცდა, დაკვირვება.* ამიტომაც შეიძლება შეხვდეთ ასეთ გამონათქვამს: გალილეი არის პირველი ფიზიკოსი, ხოლო ნიუტონმა ფიზიკის ხელთუქმნელი შენობა ააგო.

როგორი იყო ბუნების კვლევის მეთოდი გალილეიმდე? განსაკუთრებით ნათლად იგი ძველ საბერძნეთში გამოიკვეთა. მას შეიძლება განჭვრეტის მეთოდი ვუწოდოთ. ცოდნის წყაროა დაკვირვებათა შედეგად მიღებული შეგრძნებები, რომელთა საფუძველზე ხდება გონებრივი განზოგადება. ამით ამოიწურებოდა დაკვირვებასთან, ცდასთან კავშირი. ჭეშმარიტებად ითვლებოდა გონების ლოგიკური აბსტრაქტული ნაღვაწი (ასეა მათემატიკაში). აზრი მისი ცდით შემოწმებისა მიუღებელი იყო, „მდაბიურად“ ითვლებოდა. ამიტომაც შეცდა არისტოტელე და 2000 წლის განმავლობაში ეს ვერავინ აღმოაჩინა. შთამბეჭდავი მაგალითია იმის გასათვითცნობიერებლად, რომ უპირველესი მნიშვნელობა აქვს ჭეშმარიტად მეცნიერული კვლევის მეთოდის აღმოჩენას.

დედამიწა არაფრით გამორჩეული ათვლის სისტემაა. დედამიწის პირობებში არც კი არსებობს სხეული, რომელზედაც სხვა სხეულების მოქმედება შეგვიძლია უგულებელვყოთ. პრობლემის არსს უფრო ღრმად რომ ჩავწვდეთ, გავაგრძელოთ წარმოსახვითი განყენება, აბსტრაპირება. წარმოვიდგინოთ სამყაროში განცალკევებული სხეული, რომელიც ყველა სხვა სხეულიდან ძალზე დაშორებულია. მრავალრიცხოვანი დაკვირვებები და ცდები გვიჩვენებს, რომ სხეულთა მოძრაობის მიზეზი მათი ურთიერთქმედებაა, რომელიც სხეულთა შორის მანძილის გაზრდისას მცირდება (და, ცხადია, პირიქით). ამიტომ განცალკევებულ სხეულზე სხვა სხეულების მოქმედება შეგვიძლია უგულებელვყოთ. ასეთი სხეულის კარგ მაგალითს წარმოადგენს *ცალკეული* ვარსკვლავები (სამყაროში საკმაოდ ბევრია ერთმანეთთან გრავიტაციული მიზიდვით შეკავშირებული ორმაგი, სამმაგი და ა.შ. ვარსკვლავები).

განცალკევებულ სხეულს, რომელზედაც სხვა სხეულები არ მოქმედებს, თავისუფალი სხეული ეწოდება.

დავსვათ კითხვა: როგორ მოძრაობს თავისუფალი სხეული? ნათელია, მოძრაობის ფარდობითობის გამო აუცილებელია მივუთითოთ ათვლის სისტემაზე. ამჯერად ყველაზე მოსახერხებელია ათვლის სისტემა შორეულ უძრავ ვარსკვლავებს დავუკავშიროთ – ჩვენ ხელსაწყოებს არ შეუძლია აღმოაჩინოს მათი ურთიერთფარდობითი გადაადგილება და აჩქარება. ამ სისტემაში, გალილეის თანახმად, თავისუფალი სხეული ან უძრავია, ან თანაბარწრფივად იმოძრავებს. ახლა კი აუცილებელია დავაზუსტოთ შემდეგი: თავისუფალი სხეულის თანაბარწრფივ მოძრაობაში *მხოლოდ*

გადატანითი მოძრაობა იგულისხმება. ასეთ შემთხვევაში თავისუფალი სხეული ნივთიერ წერტილად შეგვიძლია ჩავთვალოთ.

თავისუფალ სხეულს შეუძლია ისე იმოძრაოს, რომ სიმძიმის ცენტრის გარშემო ბრუნავდეს. მბრუნავი სხეულის წერტილებს აჩქარება გააჩნია. თუ რატომ არ იმოძრავებს თავისუფალი სხეულის სიმძიმის ცენტრი ასეთ შემთხვევაში თანაბარწრფივად, ფაკულტატიურ გაკვეთილში გამოვარკვევთ.

ასეთი მარტივი სახის იქნება თავისუფალი სხეულის მოძრაობა ნებისმიერი ათვლის სისტემის მიმართ? წარმოვიდგინოთ ვარსკვლავთაშორის სივრცეში აჩქარებულად მოძრავი (უძრავ ვარსკვლავთა მიმართ) კოსმოსური ხომალდი. დავუკავშიროთ ათვლის სისტემა თვით ხომალდს. როგორ იმოძრავებს თავისუფალი სხეული — ვთქვათ, ცალკეული ვარსკვლავი — ამ სისტემის, ე. ი. ხომალდის მიმართ? მსგავსი ამოცანები მოძრაობის ფარდობითობაზე კინემატიკაში განვიხილეთ და პასუხის გაცემა არ უნდა გაგვიჭირდეს. თავისუფალი სხეული იმოძრავებს ხომალდის მოძრაობის მიმართულების საპირისპირო მხარეს მოდულით ისეთივე აჩქარებით. მაშასადამე, ხომალდთან დაკავშირებულ ათვლის სისტემაში თავისუფალი სხეულის მოძრაობა აღარ არის უმარტივესი სახისა — აჩქარებულია. ამიტომ ყველა შესაძლო ათვლის სისტემას შორის უნდა გამოვარჩიოთ ისეთები, რომელთა მიმართ თავისუფალი სხეული თანაბარწრფივად, უმარტივესი სახით მოძრაობს. ასეთ მოძრაობაზე ამბობენ, რომ სხეული ინერციით მოძრაობს, ხოლო სათანადო ათვლის სისტემებს ინერციულს უწოდებენ. როგორ განვსაზღვროთ, რა არის ინერციული ათვლის სისტემა?

თავისუფალ სხეულთან დაკავშირებულ ათვლის სისტემას ინერციული ათვლის სისტემა ეწოდება.

რადგან ინერციული ათვლის სისტემა თავისუფალ სხეულს დავუკავშირეთ, ინერციის კანონის ჩამოყალიბებისათვის მეორე თავისუფალი სხეულიც დაგვჭირდება:

ორი თავისუფალი სხეული ერთმანეთის მიმართ თანაბარწრფივად მოძრაობს ან უძრავია.

სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, *თავისუფალი სხეული ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ თანაბარწრფივად მოძრაობს ან უძრავია.*

ინერციის კანონს ნიუტონის I კანონსაც უწოდებენ, რადგან მექანიკის კანონების ჩამოყალიბებისას ნიუტონმა იგი პირველ ნომრად მოგვცა. ინერციის კანონი არის არა მხოლოდ მექანიკის, არამედ მთელი ფიზიკის უზოგადესი დებულება. უზოგადეს, ამოსავალ დებულებას პრინციპი ეწო-

დება, ამიტომ უპრიანია, მას ინერციის პრინციპი ვუწოდოთ. მის საფუძველზე ათვლის სისტემათა სიმრავლიდან ინერციულ ათვლის სისტემებს გამოვყოფთ, რომლებიც არა მარტო მექანიკური, არამედ ნებისმიერი ფიზიკური მოვლენის შესასწავლად გვჭირდება. მათ მიმართ მოვლენებს ყველაზე მარტივი სახე აქვს.

რამდენი ინერციული ათვლის სისტემის შერჩევა შეიძლება?

თუ ცნობილია ერთი მათგანი მაინც, მაშინ მის მიმართ თანაბარწრფივად, ნებისმიერი მუდმივი სიჩქარით, მოძრავი ათვლის სისტემა ინერციული იქნება. ეს ადვილად გასაგებია. სიჩქარეთა შეკრების წესის თანახმად, ასეთი სისტემების მიმართ თავისუფალი სხეული სხვადასხვა, მაგრამ მუდმივი სიჩქარით იმოძრავებს. არჩევანი შემოსაზღვრული არ არის.

თავისუფალი სხეულისა და ათვლის ინერციული სისტემის ცნება ჩვენ წარმოსახვითი ექსპერიმენტების, აბსტრაქციის საფუძველზე შემოვიტანეთ. როგორ დავადგინოთ პრაქტიკულად ინერციულია თუ არა არჩეული რეალური ათვლის სისტემა? ამის გარკვევა შესაძლებელია მხოლოდ ცდების საფუძველზე გარკვეული მიახლოებით, რომელიც გაზომვის სიზუსტეზეა დამოკიდებული.

ჩვენთვის ბუნებრივია დედამიწის ზედაპირთან დაკავშირებული ათვლის სისტემა. ასეთ სისტემებს შორის ფიზიკოსები *ლაბორატორიულ სისტემას* გამოყოფენ: ეს არის ფიზიკური ლაბორატორია, რომელთანაც დაკავშირებულია კოორდინატთა სისტემა და საათი. დედამიწის მახლობელ სივრცეში მიმდინარე ბევრი მოვლენის შესწავლისას ლაბორატორიული სისტემა შეიძლება ინერციულად ჩავთვალოთ, მაგრამ ყოველთვის არა. მასზე „უკეთესი“ ინერციული სისტემაა *გეოცენტრული სისტემა*. მისი სათავე დედამიწის ცენტრს ემთხვევა, ხოლო ღერძები მიმართულია შორეული ვარსკვლავებისაკენ. ღერძების რეალიზება ვარსკვლავებიდან წამოსული სინათლის სხივების საშუალებით ხდება. მაგრამ გეოცენტრული სისტემის მიმართ მზისა და პლანეტების მოძრაობის განხილვისას მას ინერციულად ველარ ჩავთვლით. ამ შემთხვევაში შეუძლებელია დედამიწის დღეღამური და წლიური ბრუნვით განპირობებულ აჩქარებათა უგულებელყოფა. არაინერციულობის გამო გეოცენტრული სისტემის მიმართ პლანეტების მოძრაობა რთული სახისაა, ხოლო ცალკეული შორეული ვარსკვლავები — ფაქტობრივად, თავისუფალი სხეულები — წრიულ ორბიტებზე ცენტრისკენული აჩქარებით ბრუნავს დედამიწის გარშემო.

მზის სისტემის მოძრაობის შესწავლისათვის საუკეთესოა *ჰელიოცენტრული სისტემა*. მისი სათავე მზის ცენტრშია (უფრო ზუსტად, მზის

სისტემის ცენტრში – მზის დიდი მასის გამო ეს წერტილები პრაქტიკულად ერთმანეთს ემთხვევა), ხოლო ღერძები შორეული ვარსკვლავებისკენაა მიმართული. მზეს მცირე აჩქარება გააჩნია ჩვენი გალაქტიკის ცენტრის მიმართ. მისი შეფასება ისეთ უმნიშვნელო სიდიდეს გვაძლევს, რომლის აღმოჩენა ჩვენ ხელსაწყოებს არ შეუძლია. რადგან ჰელიოცენტრული სისტემა საუკეთესო ინერციული სისტემაა, ამიტომაც ჰქონდა გადამწყვეტი მნიშვნელობა კოპერნიკის აღმოჩენას. ხოლო დიდ მასშტაბებში სამყაროს აგებულების შესწავლისათვის მოსახერხებელია შორეულ უძრავ ვარსკვლავებთან დაკავშირებული ინერციული ათვლის სისტემა. საჭიროა ოთხი ცალკეული ვარსკვლავის არჩევა: ერთი სისტემის სათავისათვის, სამი, რომლებიც ერთ სიბრტყეში არ მდებარეობენ, ღერძების მიმართულების გამოსაყოფად.

5. ფ ა კ უ ლ ტ ა ტ ი უ რ ი გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. ინერციის პრინციპი ფიზიკის უზოგადესი დებულებაა. ბუნებრივია, დავსვათ კითხვა: შეიძლება კი ასეთი ფუნდამენტური პრინციპის სიღრმისეული გააზრება მხოლოდ მექანიკის ფარგლებში? ირკვევა, რომ არა. მიზეზი ის არის, რომ მექანიკაში უგულებელვყოფთ სხეულის აგებულებას. ნებისმიერი სხეული უბრალოდ წერტილებისაგან კი არ შედგება, არამედ ატომებისაგან, რომლებიც ელემენტარულ ნაწილაკებს შეიცავს. შევეცადოთ გავარკვიოთ, რა მნიშვნელობა აქვს ამას ინერციის პრინციპის გაგებისათვის.

ჩვენ ხაზი გავუსვით, რომ თავისუფალი სხეულის თანაბარწრფივ მოძრაობაში მხოლოდ გადატანითი მოძრაობა იგულისხმება. რატომ? საქმე ის არის, რომ შესაძლებელია თავისუფალი სხეული მოძრაობისას სიმძიმის ცენტრის გარშემო თავისთავად ბრუნავდეს (მსგავსად ბუმერანგისა). ასეთ შემთხვევაში სხეულის შემადგენელი ნაწილაკები სიმძიმის ცენტრის გარშემო წრეწირზე ბრუნავს. ეს კი ნიშნავს, რომ ისინი აჩქარებულად მოძრაობენ. რა მნიშვნელობა აქვს მათ აჩქარებულ მოძრაობას? ფიზიკის კანონების თანახმად, აჩქარებულად მოძრავი ნაწილაკები გამოასხივებს. მაგალითად, თუ ნაწილაკები დამუხტულია, ელექტრომაგნიტური ტალღები გამოსხივდება.

სხვა სახის გამოსხივებაც არსებობს. სახელდობრ, გამოსხივდება გრავიტაციული ტალღებიც. მაგრამ ისინი ძალზე სუსტია. ჩვენი ხელსაწყოები ჯერჯერობით მხოლოდ ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას აფიქსირებს. ამიტომ შემოვისაზღვროთ ამ სახის გამოსხივების განხილვით.

რა გავლენას ახდენს გამოსხივება მოძრაობაზე? ამის გასარკვევად შემდეგი ანალოგიით ვისარგებლოთ. ყველას წარმოგვიდგენია, როგორ

მოძრაობს რაკეტა. საწვავის წვის შედეგად რაკეტიდან დიდი სიჩქარით გამოიტყორცნება აირი, ხოლო რაკეტა საპირისპირო მიმართულებით მოძრაობს აჩქარებულად. რაკეტის აჩქარების მიზეზია გამოტყორცნილი აირის უკუმოქმედება მასზე (სათანადო კანონზომიერებებს მოგვიანებით შევისწავლით). ამ უკუმოქმედებას რეაქტიულ მოქმედებას უწოდებენ. მაშასადამე, თუ სხეულიდან გამოიტყორცნება ნივთიერება, რეაქტიული მოქმედების გამო სხეული საპირისპირო მიმართულებით აჩქარებულად იმოძრავებს (სანამ გამოტყორცნა ხდება). მაგრამ სხეულზე რეაქტიულად მოქმედებს არა მხოლოდ გამოტყორცნილი ნივთიერება, არამედ გამოსხივებაც. ამიტომ, თუ თავისუფალი სხეული გადაადგილებისას ბრუნავს, გამოსხივების რეაქტიული მოქმედების გამო სიმძიმის ცენტრი არ იმოძრავებს თანაბარწრფივად.

განცალკევებული სხეული – მასზე სხვა სხეულები არ მოქმედებს – თავისუფალია, თუ იგი არ ასხივებს.

გამოსხივება არ გვექნება, თუ სხეულის წერტილებს აჩქარება არ გააჩნია. ამიტომაც იგულისხმება თავისუფალი სხეულის თანაბარწრფივ მოძრაობაში მხოლოდ გადატანითი მოძრაობა.

გადატანით მოძრავმა თავისუფალმა სხეულმაც შეიძლება გამოასხივოს, თუ იგი აღგზნებულ მდგომარეობაშია. ამიტომ, ზუსტად რომ ვთქვათ, თავისუფალი სხეული გადატანით ძირითად მდგომარეობაში უნდა მოძრაობდეს.

რა თქმა უნდა, სხეულებზე გამოსხივების რეაქტიული მოქმედება უმნიშვნელოა და მისი უგულებელყოფა თავისუფლად შეიძლება. ასეც ვიქცევით, როდესაც ათვლის სისტემას ვარსკვლავებს ვუკავშირებთ. მაგრამ ნაწილაკების აჩქარებული მოძრაობისას გამოსხივების რეაქტიული მოქმედება შეიძლება მნიშვნელოვანი იყოს. ეს პრობლემის პრინციპული მხარეა, რომელიც ფიზიკის ერთიანობას ასახავს. ინერციის მოვლენაში საფუძვლიანად გარკვევისათვის საკმარისი არ არის მხოლოდ გარე ფაქტორის – სხვა სხეულების მოქმედების – უგულებელყოფა, საჭიროა შინაგანი ფაქტორის – ნივთიერების აგებულების – გათვალისწინებაც.

6. დავაკონკრეტოთ, გაზომვის სიზუსტის მიხედვით როგორ შეიძლება გავარკვიოთ ათვლის სისტემა ინერციულად ჩაითვლება თუ არა.

ამოცანა 2.1. მოსწავლემ ლაბორატორიაში სიმძიმის ძალის აჩქარება 1%-ის სიზუსტით გაზომა. შეიძლება თუ არა ლაბორატორია ინერციულ ათვლის სისტემად ჩაითვალოს?

ა მ ო ხ ს ნ ა. ლაბორატორიული სისტემის არაინერციულობას განაპირობებს დედამიწის დღეღამური და წლიური ბრუნვა. შევაფასოთ დედა-

მიწის ზედაპირის a_c ცენტრისკენული აჩქარება, გამოწვეული დღეღამური ბრუნვით. ბრუნვის პერიოდი 24 საათია, ამიტომ კუთხური სიჩქარე

$$\omega = \frac{2\pi}{24 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3} = 7{,}3 \cdot 10^{-5} \text{ წმ}^{-1}.$$

გავითვალისწინოთ, რომ დედამიწის რადიუსი $R = 6{,}4 \cdot 10^8$ სმ:

$$a_c \approx \omega^2 R \approx 3 \text{ სმ/წმ}^2.$$

ცენტრისკენული აჩქარების ფორმულაში მიახლოების ნიშანი დავწერეთ, რადგან არ ვითვალისწინებთ მის დამოკიდებულებას განედზე.

თავისუფალი ვარდნის აჩქარება $g \approx 980$ სმ/წმ^2, ამიტომ 1%-იანი ცდომილება $\Delta g \approx 10$სმ/წმ^2. ვხედავთ, რომ Δg საკმაოდ აღემატება a_c-ს, ამიტომ ამ უკანასკნელის, ე. ი. დედამიწის დღეღამური ბრუნვის გავლენის, უგულებელყოფა შეიძლება და ლაბორატორია გაზომვის მოცემული სიზუსტისათვის ინერციულ ათვლის სისტემად ჩაითვლება.

დავრწმუნდეთ, რომ მით უმეტეს არ არის საჭირო დედამიწის წლიური ბრუნვის გათვალისწინება. რადგან 1 წ=$3 \cdot 10^7$ წმ და მზემდე მანძილი $r = 1{,}5 \cdot 10^{13}$ სმ, მივიღებთ:

$$\omega_წ = 2\pi / 3 \cdot 10^7 \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ წმ}^{-1}, \quad \Rightarrow \quad a_წ = \omega_წ^2 r \approx 0{,}6 \text{ სმ/წმ}^2.$$

მართლაც, $a_წ$ ~5-ჯერ ნაკლებია a_c-ზე.

იმავეს სხვა კუთხითაც შეიძლება შევხედოთ. დავუშვათ, გაზომვები ლაბორატორიაში 1 საათს გაგრძელდა. რადგან დედამიწის ორბიტული სიჩქარე $v = \omega_წ r = 3 \cdot 10^6$სმ/წმ, მის მიერ გავლილი წრიული ორბიტის რკალის სიგრძე $l = 3 \cdot 10^6 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3 \approx 10^{10}$სმ. რკალის ეს სიგრძე გაცილებით ნაკლებია ორბიტის რადიუსზე, ამიტომ დიდი სიზუსტით იგი მისი მომჭიმავი ქორდით შეიძლება შევცვალოთ. 1 საათში არც დედამიწის თავისი ღერძის გარშემო შემობრუნება იქნება მნიშვნელოვანი. მაშასადამე, შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ ექსპერიმენტის განმავლობაში დედამიწა მზის მიმართ თანაბარწრფივად და გადატანით მოძრაობს და ამიტომ ლაბორატორია საკმარისი სიზუსტით ინერციულ სისტემას წარმოადგენს.

კითხვები, ამოცანები

2.2. რაზე მიუთითებს ის ფაქტი, რომ არისტოტელეს მცდარი აზრი მოძრაობაზე 20 საუკუნის მანძილზე მართებულად ითვლებოდა?

2.3. თუ შეძლებდა გალილეი ინერციის· კანონის აღმოჩენას მხოლოდ რეალური ექსპერიმენტების შედეგების საფუძველზე?

2.4. რა ფიზიკურ კანონზომიერებას ემყარება მტკიცება, რომ სხვა სხეულებიდან ძალზე დაშორებულ, განცალკევებულ სხეულზე მათი მოქმედება შეიძლება უგულებელვყოთ?

2.5. რას ეწოდება თავისუფალი სხეული?

2.6. რას ეწოდება ინერციული ათვლის სისტემა?

2.7. ჩამოაყალიბეთ ინერციის პრინციპი. რატომ ეწოდება მას პრინციპი?

2.8. ზოგიერთ წიგნში ნათქვამია, რომ ინერციული ათვლის სისტემა ისეთი ათვლის სისტემაა, რომლის მიმართ სხეული, რომელზედაც სხვა სხეულები არ მოქმედებს, მუდმივი სიჩქარით მოძრაობს. ინერციის კანონი კი ასეა ჩამოყალიბებული: თუ სხეულზე სხვა სხეულები არ მოქმედებს, იგი მუდმივი სიჩქარით მოძრაობს ინერციული ათვლის სისტემების მიმართ. ლოგიკურად გამართულია თუ არა მასალის ასეთი გადაცემა?

2.9. რამდენი ინერციული ათვლის სისტემა არსებობს?

2.10. მატარებელი (თვითმფრინავი) თანაბარწრფივად მოძრაობს. რა სიზუსტითაა ინერციული მასთან დაკავშირებული ათვლის სისტემა?

2.11. თავისუფალი სხეულის თანაბარწრფივ მოძრაობაში რატომ იგულისხმება მხოლოდ გადატანითი მოძრაობა?

2.12. შეაფასეთ მზის აჩქარება ჩვენი გალაქტიკის ცენტრის მიმართ. მისი წრფივი სიჩქარეა $3\cdot10^{7}$ სმ/წმ, ცენტრიდან დაშორება – $3\cdot10^{22}$ სმ.

2.13. დედამიწის დღეღამური ბრუნვის გამო შორეული ვარსკვლავები მის მიმართ წრეწირზე მოძრაობს. შეაფასეთ ცენტრისკენული აჩქარება. ვარსკვლავამდე მანძილია $3\cdot10^{18}$ სმ (შეადარეთ წინა პასუხს).

3. ფარდობითობის პრინციპი

1. შესავალში, ფიზიკის სტრუქტურის განხილვისას, ინვარიანტობის პრინციპებიდან ინერციისა და ფარდობითობის პრინციპები გამოვყავით, როგორც ფიზიკის ის ქვაკუთხედი, რომელიც მის ერთიანობას გამოავლენს. ამიტომ ფარდობითობის პრინციპის შესწავლა მექანიკიდანვე უნდა დავიწყოთ. არსებობს ორი შესაძლებლობა მექანიკის კურსში ფარდობითობის პრინციპის შესწავლის ადგილის განსაზღვრისათვის: ან უშუალოდ ინერციის პრინციპის, ან ნიუტონის კანონების შემდეგ. გაღრმავებული სწავლების კურსისათვის, რომლისთვისაც არის განკუთვნილი წინამდებარე წიგნი, უმჯობესია პირველი ვარიანტი (ისევე, როგორც ზოგადი ფიზიკის კურსისათვის).

ფარდობითობის პრინციპის სწავლების მეთოდიკის საკვანძო საკითხია მისი ფორმულირება. სასწავლო და მეთოდურ ლიტერატურაში გავრცელებულია ფორმულირება მოვლენათა ენაზე. სახელდობრ, გალილეის ფარდობითობის პრინციპი ასეა ჩამოყალიბებული:

მექანიკის მოვლენები ერთნაირად, იგივურად მიმდინარეობს ყველა ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ.

დამატებითი განმარტების გარეშე ამ მტკიცების გაგება ადვილი არ არის. მოვიყვანოთ მარტივი მაგალითი. ლაბორატორიული დამკვირვებლისათვის უსაწყისო სიჩქარით ვარდნილი სხეული ვერტიკალურად მოძრაობს, ხოლო თანაბარწრფივად მოძრავი ავტომობილის დამკვირვებლისათვის იგივე სხეული პარაბოლაზე მოძრაობს. მოძრაობა აშკარად არაა ერთნაირი სახის ორივე ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ. მიზეზი საწყისი პირობების განსხვავებაშია: სხეულს ავტომობილის მიმართ აქვს ამ უკანასკნელის სიჩქარის საპირისპიროდ მიმართული იმავე მოდულის საწყისი სიჩქარე. *მოვლენები ერთნაირად მიმდინარეობს, როდესაც საწყისი პირობები ერთნაირია.* მართლაც, თუ თანაბარწრფივად მოძრავი ავტომობილის მიმართ ვარდნილი სხეულის საწყისი სიჩქარე ნულის ტოლი იქნება, იგი მის მიმართ ვერტიკალურად იმოძრავებს. ასეთი აუცილებელი განმარტების დამატება პრინციპის ფორმულირებას ამძიმებს. ამიტომ უმჯობესია ფარდობითობის პრინციპი არა მოვლენების, არამედ კანონების ენაზე ჩამოვაყალიბოთ, რადგან კანონები არ არის დამოკიდებული საწყის პირობებზე (ორივე ათვლის სისტემის მიმართ ნიუტონის II კანონს ერთნაირი სახე აქვს). ეს ღრმა საკითხია. ფიზიკის იერარქიული სტრუქტურიდან (იხ. სქემა შესავალში) ნათლად ჩანს, რომ ფარდობითობის – ინვარიანტობის ერთ-ერთი – პრინციპი უშუალოდ კანონებს და არა მოვლენებს შორის ამყარებს ურთიერთკავშირს.

შეიძლება დაიბადოს კითხვა: ზედმეტად აბსტრაქტული ხომ არ იქნება ფარდობითობის პრინციპის ჩამოყალიბება კანონების ენაზე, როდესაც დინამიკის არც ერთი კანონი ჯერ არ არის შესწავლილი? პასუხი მარტივია. რელატივისტური კლასიკური ფიზიკის კურსის შემოთავაზებული აგება გათვალისწინებულია ფიზიკის სწავლების II საფეხურისათვის, პირველი, საბაზო განათლების საფეხურიდან კი მოსწავლეებს საკმარისი წარმოდგენა აქვთ ფიზიკის და არა მხოლოდ მექანიკის კანონებზე.

ამრიგად, ფარდობითობის პრინციპის ფორმულირებისას მოვლენების ნაცვლად უმჯობესია კანონებზე ვისაუბროთ. მაგრამ არსებითი სხვა მხარეა. იმ იშვიათ შემთხვევაში, როდესაც გალილეის ფარდობითობის

პრინციპი მექანიკის სასკოლო კურსში ისწავლება, საქმე ამის იქით არ მიდის. ეს კი ჩვენეული გადაწყვეტისათვის პრინციპულად მიუღებელია. გალილეის ფარდობითობის პრინციპი არ არის ფიზიკის ფუნდამენტური პრინციპი. იგი მხოლოდ მექანიკას ეხება – არ ასახავს ფიზიკის ერთიანობას. თუ გვსურს რელატივისტური კლასიკური ფიზიკა გავიაზროთ როგორც ცოდნის ერთიანი სისტემა, თავიდანვე, მექანიკის კურსშივე, ფარდობითობის პრინციპი ფიზიკის უზოგადესი დებულების სახით უნდა შევისწავლოთ. სათანადო ფორმულირება პირველად პუანკარემ [8] და აინშტაინმა [9] მოგვცეს.

დაისვა საინტერესო მეთოდური პრობლემა: გალილეის ფარდობითობის პრინციპიდან, ნიუტონის მექანიკის ფარგლებში, როგორ გადავიდეთ აინშტაინის ფარდობითობის პრინციპზე, როდესაც ფარდობითობის თეორია ჯერ შესწავლილი არა გვაქვს? მისი გადაჭრა საკმაოდ იოლია, თუკი კურსის აგებისათვის ამოსავალი იქნება ფიზიკის ერთიანობის მეთოდოლოგიური დებულება, რომელიც ბუნების მთლიანობას ასახავს.

თემა სრულად გაკვეთილის სახით განვიხილოთ.

2. გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. ინერციის პრინციპის შესწავლისას გავარკვიეთ, რომ თავისუფალი სხეული ერთნაირად – თანაბარწრფივად – მოძრაობს ათვლის ყველა ინერციული სისტემის მიმართ. მაშასადამე, ასეთი უმარტივესი მოძრაობის თვალსაზრისით, ინერციულ ათვლის სისტემებს შორის განსხვავება არ არსებობს, ისინი ტოლფასია. დავსვათ კითხვა: თუ არის ტოლფასი, ეკვივალენტური ინერციული ათვლის სისტემები რთული, აჩქარებული მოძრაობის თვალსაზრისით?

პირველად ასეთი საკითხი გალილეიმ გამოიკვლია. ის ემყარებოდა დაკვირვებებსა და ცდებს, იყენებდა მის მიერვე აღმოჩენილ მეცნიერული კვლევის მეთოდს. რეალური ცდების საფუძველზე იგი აანალიზებდა წარმოსახვით, იდეალიზებულ ცდებს. განზოგადების შედეგად გალილეი მივიდა დასკვნამდე, რომ მოძრაობა ერთნაირად მიმდინარეობს უძრავსა და თანაბარწრფივად მოძრავ ინერციულ ათვლის სისტემებში. მას არ მოუცია ფარდობითობის პრინციპის ფორმულირება, მაგრამ აღწერა არსი.

წარმოვიდგინოთ, რომ ვიმყოფებით გემის ტრიუმში, რომლის სარკმელთა ფარდები ჩამოშვებულია და ვაკვირდებით სხვადასხვა მოძრაობას: თევზების ცურვას აკვარიუმში, პეპლების ფრენას, ვისვრით რაიმე სხეულს, ვხტებით ნებისმიერი მიმართულებით და სხვ. ასეთ დაკვირვებათა საფუძველზე შეუძლებელია გავარკვიოთ გემი უძრავია, თუ თანაბარწრფივად მოძრაობს, ვიგრძნოთ გემის მოძრაობის მუდმივი სიჩქარე. რადგან

დასკვნა დამოკიდებული არ არის მუდმივი სიჩქარის სიდიდეზე, იგი ნებისმიერი ინერციული სისტემისათვის არის მართებული. ამით გალილეიმ უპასუხა თავისი დროის ერთ-ერთ რთულ კითხვაზე: თუ დედამიწა მზის გარშემო მოძრაობს, რატომ ვერ გრძნობენ ადამიანები ასეთ მოძრაობას? ინერციის პრინციპის შესწავლისას დავრწმუნდით, რომ დაკვირვების საკმაო დროის განმავლობაში დედამიწა ორბიტის მონაკვეთზე პრაქტიკულად თანაბარწრფივად მოძრაობს, კარგი სიზუსტით არის ინერციული ათვლის სისტემა და ამიტომაც არ იგრძნობა მისი მოძრაობა.

პირველად ფარდობითობის პრინციპი, როგორც მექანიკის ერთ-ერთი ძირითადი დებულება, ნიუტონმა ჩამოაყალიბა. შემდგომში მას გალილეის ფარდობითობის პრინციპი ეწოდა. ფიზიკის განვითარების კვალობაზე სხვადასხვა ფორმულირება გაჩნდა. ეს არ არის გასაკვირი: ერთი და იგივე აზრი განსხვავებულად შეიძლება გამოვხატოთ. ავირჩიოთ გალილეის ფარდობითობის პრინციპის შემდეგი ფორმულირება:

მექანიკის ყველა კანონს ერთნაირი სახე აქვს ათვლის ყველა ინერციული სისტემის მიმართ.

ამრიგად, ნებისმიერი რთული მექანიკური მოძრაობისათვის ინერციული ათვლის სისტემები ტოლფასია, ეკვივალენტურია.

სხვა წიგნებში შეიძლება განსხვავებული ფორმულირება ნახოთ: მექანიკური მოვლენები ერთნაირად მიმდინარეობს ყველა ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ. ასეთმა ფორმულირებამ შეიძლება გაუგებრობაც გამოიწვიოს. განვიხილოთ მაგალითი. თანაბარწრფივად მოძრავი მატარებლის დამკვირვებლისათვის უსაწყისო სიჩქარით ხელიდან გაშვებული სხეული ვერტიკალურ წრფეზე ვარდება, ხოლო დედამიწაზე უძრავად მდგომ დამკვირვებლისათვის იგივე სხეული პარაბოლაზე მოძრაობს. ეს განპირობებულია იმით, რომ განსხვავებულია საწყისი პირობები. თუ მატარებლის მიმართ საწყისი სიჩქარე ნულის ტოლია, დედამიწის მიმართ იგი ნულისაგან განსხვავდება — მატარებლის სიჩქარის ტოლია. ამ მაგალითიდან გამომდინარეობს, რომ მექანიკური მოვლენები სხვადასხვა ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ ერთნაირად, იგივურად მიმდინარეობს, როცა საწყისი პირობები ერთნაირია. მართლაც, თუ დედამიწის დამკვირვებელი გაიმეორებს მატარებლის დამკვირვებლის ცდას იმავე საწყის პირობებში, ზუსტად ისეთსავე მოძრაობას დააკვირდება: უსაწყისო სიჩქარით სხეული შვეულად ვარდება. მაშასადამე, მოვლენების ენაზე ფორმულირება დამატებით განმარტებას მოითხოვს. არჩეული ფორმულირება ასეთ განმარტებას არ საჭიროებს, რამეთუ კანონთა სახე საწყის პირობებზე არ არის დამოკიდებული.

დავსვათ კითხვა: არის თუ არა გალილეის ფარდობითობის პრინციპი ფიზიკის ფუნდამენტური პრინციპი? არა, რადგან იგი მხოლოდ მექანი-

კურ მოძრაობას ეხება. ბუნებაში მექანიკური, ელექტრული, მაგნიტური, ოპტიკური და სხვ. მოვლენები ერთმანეთთან ურთიერთკავშირში მიმდინარეობს. ეს ბუნების ერთიანობის გამოვლენაა. ფიზიკა, როგორც ფუნდამენტური საბუნებისმეტყველო მეცნიერება, უცილებლად უნდა ასახავდეს ბუნების ერთიანობას. მეცნიერების განვითარების მთელი გამოცდილება, ყველა დაკვირვება და ექსპერიმენტი ადასტურებს, რომ ფარდობითობის პრინციპი მართებულია ყველა ფიზიკური, და არა მხოლოდ მექანიკური, მოვლენისათვის. იგი არის მთელი ფიზიკის ფუნდამენტური პრინციპი, რომელიც მის მთლიანობას ასახავს. ამიტომ ფარდობითობის პრინციპის უზოგადესი ფორმულირება ასეთია:

ფიზიკის ყველა კანონს ერთნაირი სახე აქვს ყველა ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ.

ამრიგად, ფიზიკის თვალსაზრისით ყველა ინერციული ათვლის სისტემა ტოლფასია, ეკვივალენტურია. თუ დავუბრუნდებით გალილეის გემს, ფარდობითობის პრინციპის თანახმად, ტრიუმის შიგნით არავითარი ფიზიკური (არა მხოლოდ მექანიკური) ცდის საშუალებით არ შეიძლება აღმოვაჩინოთ, გავზომოთ თანაბარწრფივი მოძრაობის სიჩქარე. *ფიზიკის კანონების სახე არ არის დამოკიდებული ინერციული ათვლის სისტემების ერთმანეთის მიმართ მოძრაობის მუდმივი სიჩქარის მნიშვნელობაზე, ამიტომ მათი თანაბარწრფივი მოძრაობა ფარდობითია.* აზრს მოკლებულია იმაზე საუბარი, „სინამდვილეში" რომელი ინერციული ათვლის სისტემაა უძრავი და რომელი მოძრაობს.

ფარდობითობის პრინციპის გათვითცნობიერება ადვილი არ არის, საკმაო დროს მოითხოვს. მისი არაერთგზის გამოყენებით შევეცადოთ ბუნებრივი გავხადოთ ის, რაც სხვებისთვის უჩვეულოა.

მთელ ფიზიკაზე ფარდობითობის პრინციპი პირველად პუანკარემ და აინშტაინმა განაზოგადეს მე-20 საუკუნის დასაწყისში. ასეთ განზოგადებამდე ჩვენ ბუნებრივად მივედით, გამომდინარე ფიზიკის ერთიანობიდან. მაგრამ მეცნიერებაში წინსვლა, ახლის მოპოვება ძალზე რთულია. გალილეიდან აინშტაინამდე თითქმის სამასი წელიწადი გავიდა. ეს გზა სხვადასხვა თაობის მეცნიერთა ძალისხმევით იქნა გაკვალული და დააგვირგვინა აინშტაინმა ფარდობითობის თეორიის შექმნით.

კითხვები, ამოცანები

3.1. რატომ ვერ ვგრძნობთ დედამიწის ბრუნვას მზის გარშემო წრიულ ორბიტაზე დიდი, 30 კმ/წმ სიჩქარით? მის დღეღამურ ბრუნვას?

3.2. ჰორიზონტალური მიმართულებით თანაბარწრფივად მოძრავი თვითმფრინავიდან უსაწყისო სიჩქარით აგდებენ ტვირთს. როგორ მოძრაობს იგი მფრინავისა და დედამიწის დამკვირვებლის თვალსაზრისით? რატომ განსხვავდება ეს მოძრაობები ერთმანეთისაგან? რა აქვთ მათ საერთო?

3.3. ჩამოაყალიბეთ გალილეის ფარდობითობის პრინციპი. რატომ არ შეიძლება იგი ფიზიკის უზოგადესი დებულება იყოს?

3.4. ჩამოაყალიბეთ ფარდობითობის პრინციპი ფიზიკის უზოგადესი დებულების სახით. განასხვავეთ მოვლენებისა და კანონების ენაზე მოცემული ფორმულირებები.

3.5. როგორ ხორციელდება ფარდობითობის პრინციპის მართებულობის მეცნიერული დასაბუთება?

3.6. ახსენით, რას ნიშნავს ინერციული ათვლის სისტემების ეკვივალენტობა. რატომ არ არსებობს ნიუტონისეული აბსოლუტური ათვლის სისტემა? რომელი რეალური ინერციული ათვლის სისტემა იქნებოდა მისი საუკეთესო შემცვლელი?

4. ნიუტონის კანონების ინვარიანტობა

1. ფარდობითობის პრინციპის შესწავლის შემდეგ (შესაძლებელია მის წინაც), რასაკვირველია, ნიუტონის კანონები უნდა განვიხილოთ. ნიუტონის II და III კანონების სწავლების მეთოდიკა, განსხვავებით I კანონისაგან, საკმაოდ კარგად და დაწვრილებითაა დამუშავებული მეთოდურ და სასწავლო ლიტერატურაში. ამიტომ გამოვტოვებთ მათ გადაცემას და ჩავთვლით, რომ მკითხველისათვის იგი ცნობილია. გარკვეულობისათვის, როგორც ერთ-ერთ შესაფერის ვარიანტზე, [6] სახელმძღვანელოზე მივუთითებთ, თუმცა I კანონის ანალიზისას იგი გავაკრიტიკეთ. შევეხებით მხოლოდ ორიოდე ფუნდამენტურ ასპექტს, რომლებიც ფაქტობრივად სასწავლო-მეთოდური ლიტერატურის მიღმა რჩება.

მასის ცნების შემოტანა, როგორც ინერტულობის ზომისა, საფუძვლიანია. *ინერტულობა არის სხეულის თვისება (ნიუტონის სიტყვებით, ნივთიერების თანდაყოლილი უნარი) სხვა სხეულების მოქმედებისას მეყსეულად კი არა, მხოლოდ გარკვეული დროის შემდეგ შეიცვალოს სიჩქარე.* მასის განსაზღვრება თვისებრივთან ერთად რაოდენობრივ მხარესაც უნდა ასახავდეს (იხ. მომდევნო მუხლი). მასის რაოდენობრივი განსაზღვრის ერთ-ერთი ხერხია ორი სხეულის ურთიერთმოქმედებისას

აღძრულ აჩქარებათა შედარება. თუ ერთ-ერთი სხეულის მასას შეთანხმებით ერთეულის ტოლად – ეტალონად – ჩავთვლით, გავიგებთ მეორე სხეულის მასას:

$$\frac{m_1}{m_2}=\frac{a_2}{a_1},\ \Rightarrow\ m=\frac{a_{ეტ}}{a}m_{ეტ}\ =\frac{a_{ეტ}}{a}\text{ მასის ერთ.}\qquad(4.1)$$

მასა არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც სხეულის ინერტულობის ზომას წარმოადგენს და რიცხობრივად ტოლია ეტალონისა და სხეულის ურთიერთქმედებისას შესაბამისად მათ მიერ შეძენილ აჩქარებათა მოდულების შეფარდებისა.

(4.1) მასის განსაზღვრება ნიუტონის III კანონის ასახვაა. უნდა ვიცოდეთ, რომ იგი მხოლოდ მცირე, სინათლის სიჩქარეზე გაცილებით ნაკლები, სიჩქარეებისათვის გამოდგება. *მაკროსკოპული* სხეულების მოძრაობა, რომელსაც ნიუტონის მექანიკაში განვიხილავთ, პრაქტიკულად ყოველთვის აკმაყოფილებს $v<<c$ პირობას (v სხეულის სიჩქარეა, c– სინათლისა). რელატივისტური, სინათლის სიჩქარის მახლობელი სიჩქარეებისთვის მასა იმპულსის მუდმივობის კანონის საფუძველზე უნდა განვსაზღვროთ (განვიხილავთ ფარდობითობის თეორიის შესწავლისას). ასეთი განსაზღვრება მცირე სიჩქარეებისათვის (4.1)-ს ემთხვევა. ბარემ აქვე აღვნიშნოთ, რომ ნიუტონის II კანონიც $m\mathbf{a}=\mathbf{F}$ სახით მხოლოდ $v<<c$ მცირე სიჩქარეებისათვის არის მართებულია. ზოგადი სახით ჩაწერისათვის იმპულსის ცნება უნდა გამოვიყენოთ (არარელატივისტურ შემთხვევას იმპულსის მუდმივობის კანონის განხილვისას ვასწავლით, რეალატივისტურს – ფარდობითობის თეორიაში).

რა თქმა უნდა, მასა ნივთიერების რაოდენობის ზომაცაა. სწორედ ასეთი აზრით შემოიტანა მასის ცნება პირველად მეცნიერებაში ნიუტონმა. მას შემდეგ, რაც ფარდობითობის თეორიამ ხელი შეუწყო მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების ინტერპრეტაციის დამკვიდრებას, დამაჯერებელი პასუხის გარეშე რჩებოდა რთული კითხვა: როგორ შეიძლება ნივთიერების რაოდენობისა და ინერტულობის, რომელიც ნივთიერების თანდაყოლილი თვისებაა, ზომა სიჩქარეზე იყოს დამოკიდებული? ამის გამო თავს არიდებდნენ მასის, როგორც ნივთიერების რაოდენობის ზომის, ცნებას. მეცნიერებამ კარგა ხანია უარყო მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების ინტერპრეტაცია, როგორც ფიზიკურ აზრს მოკლებული, მაგრამ იგი ჯერ კიდევ ინტენსიურად გამოიყენება მთელი მსოფლიოს სასწავლო-მეთოდურ ლიტერატურაში. ეს არსებითად უშლის ხელს მასის ცნების სწორ გააზრებას. საკითხს დაწვრილებით ფარდობითობის თეორიაში შევისწავლით.

როგორც წესი, ტერმინებს „ინერტულობა“ და „ინერცია“ აიგივებენ. დავრწმუნდეთ, რომ მათი განსხვავება საჭიროა. ინერცია არის მოვლენა თავისუფალი სხეულის თანაბარწრფივი მოძრაობისა (ათვლის ინერციული სისტემების მიმართ). უფრო გამოკვეთილად რომ ვთქვათ, ინერციის მოვლენის არსებობა შესაძლებლობას იძლევა სივრცე-დროის ეტალონების ისეთი შერჩევისა, რომ ორი თავისუფალი სხეულის ფარდობითი მოძრაობა თანაბარწრფივი იყოს (იხ. მ. 2.3). ეს სხვაა, ვიდრე ინერტულობა. დავუშვათ, რომ სამყარო ისეთია, როგორიც არისტოტელესა და 20 საუკუნის განმავლობაში მის თანამიმდევრებს ეგონათ: თავისუფალი სხეული მხოლოდ უძრავ მდგომარეობაში შეიძლება იყოს. მაშინ არ იარსებებდა ინერციის მოვლენა, მაგრამ სხეულებს ინერტულობის თვისება ექნებოდა, რასაც შესატყვისი სიდიდე – მასა – დაახასიათებდა. მასა ნივთიერების თვისებას ასახავს, ველი ნივთიერებას არ შეიცავს და ცალკეულ კვანტებს მასა არ გააჩნია (დაწვრილებით – ფარდობითობის თეორიაში). მაგრამ სინათლის გავრცელებას ინერციის მოვლენის გარეშე ვერ შევისწავლით – საჭიროა ინერციული ათვლის სისტემა.

(4.1)-ით განსაზღვრულ მასას ინერტულ მასას უწოდებენ. ეს გასაგებია, რადგან იგი ინერტულობის ზომაა. მასის განსაზღვრა მსოფლიო მიზიდულობის კანონიდანაც შეიძლება. ასეთ მასას გრავიტაციული მასა ეწოდება, რადგან იგი გრავიტაციული მიზიდვის ზომაა. წინასწარ შეუძლებელია იმის თქმა, თუ რა კავშირია მათ შორის – ეს ცდით უნდა გაირკვეს. სათანადო ცდები ჯერ კიდევ ნიუტონმა ჩაატარა და გაზომვის სიზუსტის ფარგლებში ინერტული და გრავიტაციული მასები ერთმანეთის ტოლი აღმოჩნდა. ეს ფიზიკის პრინციპული საკითხია, განსაკუთრებით ფარდობითობის ზოგადი თეორიისათვის, ამიტომ მრავალჯერ იქნა შემოწმებული სულ უფრო მეტი სიზუსტით. ცდის თანამედროვე მონაცემებით ინერტული და გრავიტაციული მასები ტოლია 10^{-12} სიზუსტით!

2. ფ ი ზ ი კ უ რ ი ც ნ ე ბ ი ს გ ა ნ ს ა ზ ღ ვ რ ე ბ ა. ფიზიკური აზროვნება ცნებითი აზროვნებაა და მისი განვითარება ცნების მეცნიერული განსაზღვრის გარეშე შეუძლებელია. მაგრამ ფიზიკური ცნების განსაზღვრების საკითხი – იქნებ ეს რამდენადმე მოულოდნელიც იყოს – ფაქტობრივად, „თეთრი ლაქაა“ სასწავლო-მეთოდური ლიტერატურისათვის [10]. თქმულის საილუსტრაციოდ ძალისა და ნიუტონის II კანონის სწავლების მეთოდიკას მივმართოთ. კითხვაზე „რა არის ძალა?“ სრული პასუხის გასაცემად ორივე, თვისებრივი და რაოდენობრივი მხარე უნდა ავსახოთ: *ძალა არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც სხეულზე სხვა სხეულების*

მოქმედების ზომას წარმოადგენს და სხეულის მასისა და აჩქარების ნამრავლის ტოლია. ძალის ასეთ განსაზღვრებას ბუნებრივად მოსდევს კითხვა: რას წარმოადგენს თანაფარდობა $m\mathbf{a} = \mathbf{F}$, ნიუტონის II კანონსა თუ ძალის განსაზღვრებას? გულახდილად რომ ვთქვათ, ასეთ კითხვას ერიდებიან და ამიტომაც სათანადოდ „არემონტებენ" ძალის განსაზღვრებას. საკითხის გასარკვევად ჯერ მოკლედ გავეცნოთ აუცილებელს განსაზღვრების რაობის თაობაზე.

ცნების განსაზღვრების წესებს ლოგიკა სწავლობს [11]. ცნების არსებითი ნიშნების ჩამოთვლას, ანუ ცნების შინაარსის გაშლას, განსაზღვრება ეწოდება. არსებითია ის ნიშნები, რომელთაგან თითოეული აუცილებელია, ხოლო ყველა ერთად კი – საკმარისი, რომ ერთი ობიექტი მეორისაგან განვასხვავოთ. არსებითი ნიშნებიდან გამომდინარე ნიშნებს საკუთარი (ატრიბუტი) ეწოდება.

მეცნიერებაში გავრცელებულია განსაზღვრება არა უშუალოდ არსებითი ნიშნების ჩამოთვლით, არამედ უახლოესი გვარისა და სპეციფიკური ნიშნის საშუალებით. მაგალითად, „მექანიკა არის ფიზიკის ნაწილი, რომელიც მექანიკურ მოძრაობას შეისწავლის". ამ განსაზღვრებაში მექანიკა განსასაზღვრავი ცნებაა, ფიზიკა – უახლოესი გვარი, ხოლო მექანიკური მოძრაობა – სპეციფიკური ნიშანი.

მაგრამ განსაზღვრების ეს ხერხი ყოველთვის არ გამოდგება. უზოგადეს ცნებებს ამ გზით ვერ განვსაზღვრავთ, რადგან გვარს ვერ გამოვუნახავთ. მაგალითად, ასეთი უზოგადესი ცნებებია დრო, სივრცე, ნივთიერება, ველი... იმ შემთხვევაში, როდესაც ცნობილი არ არის ყველა არსებითი ნიშანი (ფიზიკის განვითარება დამთავრებული არ არის), განსაზღვრებას ვცვლით შემდეგი ხერხებით: მითითება, აღწერა, დახასიათება, ახსნა-განმარტება, შედარება და განსხვავება.

ამგვარად, მეცნიერებაში უზოგადესი ცნებები უშუალოდ არსებითი ნიშნების ჩამოთვლით განისაზღვრება (თუ ყველა მათგანი ცნობილი არ არის, ზემოჩამოთვლილ ხერხებს ვიყენებთ), ხოლო დანარჩენი ცნებები – უახლოესი გვარისა და სპეციფიკური ნიშნის საშუალებით. კლასიკური მაგალითი ასე გადმოცემული მეცნიერებისა გეომეტრია არის.

ფიზიკაში ცნებათა განსაზღვრების კლასიკური ლოგიკური წესი უახლოესი გვარისა და სპეციფიკური ნიშნის მიხედვით დამკვიდრებული არ არის. სასწავლო-მეთოდურ ლიტერატურაში, როგორც წესი, ამ პრობლემას დუმილით უვლიან გვერდს, მხოლოდ ორიოდე გამონაკლისის დასახელება თუ შეიძლება [12-14]. გავარჩიოთ რომელიმე ტიპური მაგა-

ლითი. [13]-ში სიჩქარე შემდეგნაირადაა განსაზღვრული (გვ. 34): „სიჩქარე არის ვექტორული სიდიდე, რომელიც მოძრაობის მდგომარეობას ახასიათებს და იზომება გადაადგილების შეფარდებით სათანადო დროის შუალედთან“. ავტორის მტკიცებით, აქ უახლოესი გვარია „ვექტორული სიდიდე“, ხოლო სპეციფიკურ ნიშანს გამოხატავს მძიმის შემდგომი ნაწილი წინადადებისა. ანალოგიურადაა გადაწყვეტილი საკითხი [14]-ში: ჩათვლილია, რომ უახლოესი გვარია „ფიზიკური სიდიდე“. დიდი ანალიზი არ არის საჭირო იმის გასარკვევად, რომ უახლოესი გვარი ვერ იქნება „ფიზიკური სიდიდე“. მაშინ მთელი სიმრავლე ფიზიკური სიდიდეებისა ერთ უახლოეს გვარში მოხვდებოდა, მაგალითად, სიჩქარე და ენტროპია. „ფიზიკური სიდიდე“ საერთოდ გვარია, მაგრამ – არა უახლოესი ყველა ფიზიკური სიდიდისათვის. არც დამატება ვექტორულობისა თუ სკალარულობისა არ ცვლის ვითარებას. ვექტორია თუ სკალარი ფიზიკური სიდიდე, ეს ატრიბუტული ნიშანია, ე. ი. არსებითიდან გამომდინარეობს, ხოლო განსაზღვრებაში მხოლოდ არსებითი ნიშნები უნდა აისახოს. სპეციფიკურ ნიშანში კი თვისებრივი მახასიათებელიცაა შეტანილი – „ახასიათებს მოძრაობის მდგომარეობას“ – რაც ერთი სახის სიდიდის მეორისაგან ცალსახად გარჩევის საშუალებას არ იძლევა.

ეს მაგალითი გვიჩვენებს, რომ უახლოესი გვარისა და სპეციფიკური ნიშნის საშუალებით ფიზიკური სიდიდის განსაზღვრებას ძალზე შეზღუდული გამოყენება აქვს. ფიზიკურ სასწავლო მეთოდურ ლიტერატურაში ეს გათვითცნობიერებული არ არის და ამიტომ არც მიზეზებია გარკვეული. ერთი რამ ნათელია: ფიზიკური ცნების განსაზღვრების საკითხი ვერ თავსდება ფორმალური, მათემატიკური ლოგიკის ფარგლებში.

ფიზიკაში ფართო გავრცელება ჰპოვა სხვა სახის – ოპერაციულმა – განსაზღვრებამ. ოპერაციული განსაზღვრება ცნებას აღწერს ექსპერიმენტულ-გამზომი (ემპირიული) ოპერაციების ერთობლიობის საშუალებით, ანუ გაზომვის პროცედურის მითითებით. იგი დაამკვიდრა ამერიკელმა ფიზიკოსმა ბრიჯმენმა. მაგალითად, სიჩქარის ზემომოყვანილ განსაზღვრებაში გამოთქმა „იზომება გადაადგილების შეფარდებით სათანადო დროის შუალედთან“ ოპერაციული განსაზღვრების ნიმუშია. თუ ოპერაციულ განსაზღვრებაში ფიზიკური სიდიდის თვისებრივ მხარესაც ავსახავთ, რაც მის რაობას განმარტავს, სავსებით სრულყოფილ განსაზღვრებას მივიღებთ. ასეთია სწორედ სიჩქარის განხილული განსაზღვრება. [13, 14] სახელმძღვანელოების ავტორთა შეცდომა ის არის, რომ მათ ეს (და სხვა მსგავსი) განსაზღვრება უახლოესი გვარისა და სპეციფიკური

ნიშნის მიხედვით რეალიზებულ განსაზღვრებად მიიჩნიეს. სინამდვილეში, როგორც ვთქვით, ეს არის *თვისებრივი მხარის დამატებით შევსებული* ოპერაციული განსაზღვრება.

მაგრამ ოპერაციული განსაზღვრება ფიზიკური ცნების განსაზღვრების საკითხს ბოლომდე ვერ ჭრის. თუ ბრიჯმენი მას განიხილავდა, როგორც საყოველთაო მეთოდს, სხვა მეცნიერებმა მკაცრად გააკრიტიკეს იგი. ფიზიკური სიდიდის არსის დაყვანა მხოლოდ ემპირიული ოპერაციების ერთობლიობაზე შეუძლებელია. მაგალითად, ერთი და იგივე ფიზიკური სიდიდე შეიძლება სხვადასხვა ემპირიული ოპერაციით გავზომოთ. რომელი მათგანი ავირჩიოთ განსაზღვრებად? პასუხს თვით ფიზიკა განაპირობებს: ის, რომელიც ფიზიკურ არსს უკეთ ხსნის. მაგრამ მაშინ ასეთი განსაზღვრება შეიძლება სულაც არ იყოს ოპერაციული განსაზღვრება. ამ მხრივ, ძალზე საინტერესოა ენტროპიის განსაზღვრება. თუ გვსურს, და ეს ასეც უნდა იყოს, რომ განსაზღვრებაში აისახოს ენტროპიის ფიზიკური არსი – იგი სტატისტიკური სისტემის უწესრიგობის ზომაა – ენტროპია თერმოდინამიკური ალბათობის ლოგარითმს უნდა დავუკავშიროთ. ეს კი აღარ მიგვითითებს ემპირიულ ოპერაციებზე, რომელთა საშუალებითაც შეიძლება გავზომოთ ენტროპია. ამ მაგალითებიდან ჩანს, რომ ოპერაციული განსაზღვრება მეორეულია, ფიზიკური კანონებიდან მომდინარეობს და სწორედ ამ უკანასკნელს უნდა მიეცეს უპირატესობა ფიზიკური ცნების განსაზღვრების ჩამოყალიბებისას.

ამრიგად, არც კლასიკური ლოგიკის განსაზღვრება უახლოესი გვარისა და სპეციფიკური ნიშნის მიხედვით და არც ოპერაციული განსაზღვრება არ იძლევა საკითხის სრულყოფილ გადაწყვეტას.

როგორ განვსაზღვროთ ფიზიკური სიდიდე? ერთი რამ ნათელია: რა გზაც არ უნდა ავირჩიოთ, საჭიროა განსაზღვრება ასახავდეს როგორც თვისებრივ მხარეს, რომელიც ცნების რაობას გამოხატავს, ასევე – რაოდენობრივს. ეს მხარეები ექსპერიმენტის საშუალებით უნდა დადგინდეს, რაც, ფაქტობრივად, ფიზიკური კანონის დადგენას ნიშნავს. თანამედროვე ფიზიკამ ნათელი გახადა არსებითი ურთიერთკავშირი ფიზიკური სიდიდის განსაზღვრებასა და კანონს შორის. ამ ურთიერთკავშირის გაუთვალისწინებლად შეუძლებელია ფიზიკური სიდიდის სრულყოფილი განსაზღვრება. ეს კი სათანადოდ არ არის ასახული მეთოდურ ლიტერატურაში.

მივუბრუნდეთ კითხვას $m\mathbf{a}=\mathbf{F}$ თანაფარდობის რაობის თაობაზე. თვით კითხვაშია ჩადებული დაპირისპირება, გათიშვა ფიზიკური კანონისა და ფიზიკური სიდიდის განსაზღვრებისა და ეს ფორმალური, მათემა-

ტიკური ლოგიკიდან მომდინარეობს. ამტკიცებენ, რომ ამ თანაფარდობის ჩათვლა ნიუტონის II კანონად მხოლოდ იმ შემთხვევაში შეიძლება, როდესაც სამივე სიდიდეს მისგან დამოუკიდებლად განვსაზღვრავთ. თანაფარდობის გამოყენებისას, მაგალითად, ძალის განსასაზღვრავად აზრს კარგავს შემოწმება იმისა, თუ უდრის ძალა მასისა და აჩქარების ნამრავლს, რადგან ტოლობა განსაზღვრების თანახმად შესრულდება. განსაზღვრება და კანონი უნდა განვასხვავოთ ერთმანეთისაგან, ვინაიდან პირველი მათგანი შეთანხმებაა და შეუძლებელია მისი უარყოფა ან შემოწმება, ხოლო მეორე – ცდისეული ფაქტი. ფიზიკისათვის პრინციპულად მიუღებელია ასეთი ნააზრევი. ფიზიკის დაფუძნება ყოვლად შეუძლებელია, თუ ფიზიკური სიდიდის განსაზღვრება კანონს არ ასახავს. როდესაც ფიზიკის კანონს ვიყენებთ მასში შემავალი ერთ-ერთი სიდიდის განსასაზღვრავად, ამით არ „ვაუქმებთ“ სიდიდეებს შორის კანონით გამოხატულ ობიექტურ კავშირს და იგი სრულდება არა განსაზღვრების თანახმად, არამედ შინაგან სიღრმისეულ კავშირთა ძალით.

პრობლემის არსი მშვენივრად არის გადმოცემული წიგნში [15] და პირდაპირ ციტატით ვისარგებლოთ (გვ. 140): „ყველა ფიზიკურ კანონსა და ფიზიკურ თეორიას... სიღრმისეული და ნატიფი თვისებები გააჩნია, სახელდობრ, ისინი ერთდროულად გვაძლევენ როგორც საჭირო ცნებების განსაზღვრებას, ასევე შედეგებს, რომლებიც მათი გამოყენებიდან გამომდინარეობს... როგორ უიმედოდ მოძველდა ძველი თეორიის ლოზუნგი „ნუ დაიწყებ გამოკვლევას, თუ არ ჩამოაყალიბებ ცნებებს!“ ადამიანის შემოქმედებაში ნებისმიერი წინსვლის ჭეშმარიტი შემოქმედებითი არსი ის არის, რომ თეორია, ცნება, კანონი და გაზომვის მეთოდი, სამუდამოდ ერთმანეთისაგან განუყოფელნი, ერთმანეთთან უწყვეტ კავშირში წარმოიშობიან... მუდმივობის კანონი რომ დავადგინოთ, არ არის საკმარისი ერთი ექსპერიმენტი, ორი მაინც უნდა იყოს: პირველი გვაძლევს განსაზღვრებას იმ სიდიდისა, რომელიც ინახება, ხოლო მეორე ამოწმებს, მართლა ინახება თუ არა ეს სიდიდე... ამ განსაზღვრებათა ვარგისობის შემოწმება მიმდინარეობს ყოველდღე და ყოველთვის ექსპერიმენტული ფიზიკის განვითარების პროცესში“.

ახლა კი გასაგები უნდა იყოს, რომ $m\mathbf{a}=\mathbf{F}$ თანაფარდობა ნიუტონის II კანონია და ამავე დროს ძალის განსაზღვრებასაც გვაძლევს.

შევაჯამოთ: ფიზიკური სიდიდის განსაზღვრისათვის კანონი გვჭირდება, კანონის დასადგენად ცდას უნდა მივმართოთ, ხოლო ცდა რომ ჩავატაროთ, ფიზიკური სიდიდის თვისებები უნდა ვიცოდეთ, ეს თვისებები კი

მხოლოდ ცდით შეიძლება გავიგოთ. ერთი შეხედვით, თითქოს შეკრული წრე მივიღეთ. მაგრამ ეს ფორმალური ლოგიკის თვალსაზრისით, ფიზიკის ლოგიკა კი დიალექტიკურია (შინაარსობრივი). არ შეიძლება მოვითხოვოთ, რომ ჯერ ჩამოვაყალიბოთ განსაზღვრება, შემდეგ ცალ-ცალკე დავადგინოთ ფიზიკური სიდიდის თვისებები და კანონი. დაკვირვებათა და ექსპერიმენტთა საფუძველზე პირველი წარმოდგენები ჩნდება, შემდეგ — სავარაუდო დებულებათა სისტემა. დებულებათა ამ სისტემაზე დაყრდნობით იქმნება რაოდენობრივი ფიზიკური თეორია, რომლის სისწორესაც ისევ ცდა ამოწმებს. ეს არის სწორედ *ფიზიკის კვლევის ექსპერიმენტული მეთოდი.* შემეცნების ამ პროცესში ფიზიკური ცნების განსაზღვრება, კანონი, გაზომვის მეთოდი და თეორია ერთმანეთთან უწყვეტ კავშირში ყალიბდება. ამის გაუთვალისწინებლად შეუძლებელია ფიზიკური ცნების სრულფასოვანი განსაზღვრა.

3. უშუალოდ თემის შინაარსის განხილვაზე გადავიდეთ. ნიუტონის — საერთოდ, მექანიკის — კანონების ინვარიანტობის შესწავლა უცხოა, ახალია სასკოლო კურსისათვის. ჩვენეული მეთოდიკური გადაწყვეტისათვის კი შესატყვის საკითხებს საკვანძო დატვირთვა ენიჭება. მათი მეოხებით უკვე ნიუტონის მექანიკის ფარგლებში ვიწყებთ ფარდობითობის, რელატივიზმის კონცეფციის ათვისებას. ეს საფუძვლიან ნიადაგს ამზადებს ფარდობითობის თეორიის შესასწავლად, ფიზიკის ორგანული მთლიანობის გასაგებად. პირდაპირ გაკვეთილის გადაცემით დავიწყოთ.

გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. ნიუტონის II და III კანონების შესწავლისას ხაზი გავუსვით, რომ ისინი მართებულია მხოლოდ ინერციული ათვლის სისტემების მიმართ. როგორია მათი სახე სხვადასხვა ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ? ამ კითხვაზე ფარდობითობის პრინციპი პასუხობს: ფიზიკის ყველა კანონს ერთნაირი სახე აქვს ყველა ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ. დავრწმუნდეთ, რომ ნიუტონის კანონები აკმაყოფილებს ფარდობითობის პრინციპს.

ჯერ გავეცნოთ ფიზიკის ერთ-ერთ ძირითად ტერმინს.

ფიზიკური კანონის სახის ან ფიზიკური სიდიდის მნიშვნელობის უცვლელობის, ერთნაირობის თვისებას ინერციული ათვლის სისტემების არჩევის მიმართ ინვარიანტობა ეწოდება.

სხვანაირად: ფიზიკური კანონის ან ფიზიკური სიდიდის ინვარიანტობა ნიშნავს დამოუკიდებლობას ინერციული ათვლის სისტემების ფარდობითი მოძრაობის სიჩქარეზე, ანუ სხეულის სიჩქარზე, რამეთუ ათვლის სისტემა ყოველთვის შეიძლება მოცემულ სხეულს დავუკავშიროთ.

მეცნიერებაში ტერმინი „ინვარიანტობა“ უფრო ფართო გაგებით გამოიყენება: იგულისხმება უცვლელობა გარკვეულ გარდაქმნათა (არა მხოლოდ ინერციული ათვლის სისტემათა არჩევის) მიმართ. ასე რომ, სიზუსტისათვის, საზოგადოდ, საჭიროა მიეუთითოთ რომელ გარდაქმნათა მიმართ გვაქვს ინვარიანტობა. ჩვენ, ფაქტობრივად, მხოლოდ ინერციულ ათვლის სისტემათა არჩევის მიმართ განვიხილავთ ინვარიანტობას და ამიტომ სიმოკლისათვის ხშირად აღარ დავაზუსტებთ.

როგორ მოვიცვათ ინერციული ათვლის სისტემების სრული სიმრავლე? ამისათვის საკმარისია მხოლოდ ორი ინერციული ათვლის სისტემის განხილვა: ერთ-ერთს *პირობითად უძრავად* ვთვლით, ხოლო მეორეს — მის მიმართ *ნებისმიერი მნიშვნელობის მუდმივი სიჩქარით* მოძრავად. ჩვენ საგანგებოდ გამოვყავით „*პირობითად*“, რადგან თანაბარწრფივი მოძრაობა ფარდობითია. ასეთივე წარმატებით შეგვიძლია მეორე სისტემა უძრავად ჩავთვალოთ, ხოლო პირველი — მის მიმართ საპირისპირო მხარეს მოძრავად იმავე მოდულის მუდმივი სიჩქარით. რადგან ვიხილავთ სისტემათა ფარდობითი მოძრაობის მუდმივი სიჩქარის *ნებისმიერ* მნიშვნელობას, შედეგები მართებული იქნება *ნებისმიერი* ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ და, მაშასადამე, მოვიცავთ მათ სრულ სიმრავლეს.

ალბათ, ასეთი წარმოდგენა ძალზე განყენებულად, აბსტრაქტულად გამოიყურება. ამიტომ თვალსაჩინოებისათვის უძრავ სისტემად ლაბორატორიული ინერციული ათვლის სისტემა *ჩავთვალოთ*, ხოლო მოძრავად კი — კოსმოსური ხომალდი (რაკეტა), რომელიც მუდმივი სიჩქარით ჩაუქროლებს ლაბორატორიას. ერთი შეხედვით, ასეთი რამ უცნაურია, მაგრამ დავიმახსოვროთ: იგი ფუნდამენტური ფიზიკური მიდგომაა და უამისოდ შეუძლებელია ფარდობითობის თეორიის შესწავლა! ჩვენთვის ასეთი განხილვა თანდათან ჩვეულებრივი გახდება.

ნიუტონის II კანონში სამი სიდიდე შედის: აჩქარება, მასა, ძალა. ვნახოთ, როგორ არის დამოკიდებული მათი მნიშვნელობები სხვადასხვა ინერციული ათვლის სისტემის არჩევაზე. ფარდობითობის თეორიის შესწავლამდე სინათლის სიჩქარეზე გაცილებით მცირე, ანუ არარელატივისტური სიჩქარეებით შემოვისაზღვროთ. *მაკროსკოპული სხეულების* მოძრაობა პრაქტიკულად ყოველთვის აკმაყოფილებს ასეთ პირობას.

კინემატიკაში ისეთი ამოცანებიც ამოვხსენით, როდესაც დაგვჭირდა აჩქარების გამოთვლა სხვადასხვა ათვლის სისტემის მიმართ. ამიტომ ამ საკითხის ზოგადი სახით გადაწყვეტა არ გაგვიჭირდება. ვთქვათ, t_1 დროის ნებისმიერ მომენტში სხეულის სიჩქარე უძრავი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ არის $\mathbf{v}_1$, მოძრავის მიმართ — $\mathbf{v}_1'$, ხოლო მოძრავი

სისტემის სიჩქარე უძრავის მიმართ – $\mathbf{v}_s$ (იგი მუდმივია). (1.1) სიჩქარეთა შეკრების წესის თანახმად,

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_1' + \mathbf{v}_s. \tag{4.2}$$

სხეულის სიჩქარე იცვლება. დავწეროთ სიჩქარეთა შეკრების წესი t_2 დროის მომენტისათვის (შეიცვლება სხეულის სიჩქარეთა ქვედა ინდექსი):

$$\mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_2' + \mathbf{v}_s. \tag{4.3}$$

(4.3)-დან (4.2)-ის გამოკლებით მივიღებთ:

$$\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_2' - \mathbf{v}_1', \quad \Rightarrow \quad \Delta\mathbf{v} = \Delta\mathbf{v}'. \tag{4.4}$$

მიუხედავად იმისა,რომ სხეულის სიჩქარე იცვლება, სიჩქარის ცვლილება ერთნაირია ორივე ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ. აჩქარების მისაღებად სიჩქარის ცვლილება უნდა გავყოთ ცვლილების $\Delta t = t_2 - t_1$ დროზე. ნიუტონის მექანიკის ერთ-ერთი ძირითადი დაშვება არის, რომ დრო ერთნაირად მიედინება ყველა ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ – დრო აბსოლუტურია. ფარდობითობის თეორიის შექმნამდე ასეთი დაშვება ყველასათვის იმდენად ბუნებრივი იყო, რომ მასზე არც კი ამახვილებდნენ ყურადღებას. აინშტაინმა გამოარკვია, რომ დრო ფარდობითია, მაგრამ ამის შემჩნევა შეიძლება მხოლოდ დიდი, სინათლის სიჩქარის მახლობელი სიჩქარეებისათვის. რადგან ფარდობითობის თეორიის შესწავლამდე არარელატივისტური, მცირე სიჩქარეებით ვიფარგლებით, დრო აბსოლუტურად ჩავთვალოთ. ამიტომ Δt ინვარიანტული სიდიდეა და

$$\frac{\Delta\mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\Delta\mathbf{v}'}{\Delta t}, \quad \Rightarrow \quad \mathbf{a} = \mathbf{a}'. \tag{4.5}$$

$\mathbf{a}$ სხეულის აჩქარებაა უძრავი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ, $\mathbf{a}'$ კი – მოძრავი სისტემის მიმართ. ამგვარად, აჩქარება ინვარიანტული სიდიდეა, ერთნაირია ნებისმიერი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ.

ახლა მასის განსაზღვრება გავიხსენოთ:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}. \tag{4.6}$$

აჩქარების ინვარიანტობის გამო მასაც ინვარიანტული სიდიდეა, არ არის დამოკიდებული ინერციული ათვლის სისტემის ფარდობით სიჩქარეზე.

ამრიგად, მასისა და აჩქარების ნამრავლი ინვარიანტული სიდიდეა. ფარდობითობის პრინციპის თანახმად, ძალაც ინვარიანტული სიდიდე უნდა იყოს, რათა ნიუტონის II კანონს ერთნაირი სახე ჰქონდეს ნებისმიერი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ. ძალის ინვარიანტობის გაგება შემდეგი მსჯელობიდან შეიძლება. ნიუტონის მექანიკაში განხილული

სხვადასხვა ბუნების ძალა მანძილზეა დამოკიდებული, რომელიც დროის მიხედვით იცვლება. როგორც მანძილი, ასევე დრო ნიუტონის მექანიკაში ინვარიანტული სიდიდეებია, ამიტომაც ძალაც ინვარიანტია.

მაშასადამე, ნიუტონის II და III კანონებს ერთნაირი სახე აქვს ყველა ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ, არ არის დამოკიდებული ინერციული ათვლის სისტემის ფარდობით სიჩქარეზე.

ნიუტონის II და III კანონებში შემავალი ყველა წევრი ინვარიანტული სიდიდეა და ადვილად დავამტკიცეთ მათი სახის უცვლელობა ინერციული სისტემების არჩევის მიმართ. ფიზიკაში განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ზოგადი შემთხვევა კანონების სახის უცვლელობისა, როდესაც წევრები ფარდობითია, ვარიანტულია – იცვლება ერთი ინერციული სისტემიდან მეორეზე გადასვლისას.

ჩვენი შედეგები მართებული იმ სიზუსტით, რა სიზუსტითაც მართებული თვით ნიუტონის მექანიკის კანონები: სინათლის სიჩქარეზე გაცილებით ნაკლები, არარელატივისტური სიჩქარეებისათვის.

კითხვები, ამოცანები

4.1. ნიუტონის II კანონის თანახმად, როდესაც $\mathbf{F}=0$, მაშინ $\mathbf{a}=0$. ამის საფუძველზე ზოგჯერ ამტკიცებენ, რომ I კანონი შედეგია II კანონისა: თუ სხეულზე სხვა სხეულები არ მოქმედებს, იგი უძრავია ან თანაბარწრფივად მოძრაობს. მართებულია ასეთი მტკიცება?

4.2. მასის (4.1) განსაზღვრებიდან ნიუტონის III კანონი მიიღება. რა არის (4.1) თანაფარდობა: მასის განსაზღვრება თუ ნიუტონის III კანონი?

4.3. რატომაა წყლის წვეთიც და დედამიწაც მაკროსკოპული სხეული?

4.4. რას ნიშნავს რელატივისტური და არარელატივისტური სიჩქარეებით მოძრაობა? დაასახელეთ მაგალითები.

4.5. გაკვეთილის ტექსტში უძრავი და მოძრავი ინერციული ათვლის სისტემების თვალსაჩინო ნიმუშად მოყვანილია ლაბორატორია და მის მიმართ თანაბარწრფივად მოძრავი კოსმოსური ხომალდი (რაკეტა). ასტრონავტის თვალსაზრისით, რომელი სისტემა მოძრაობს და რომელია უძრავი?

4.6. რას ნიშნავს „ინვარიანტობა" ქართულად? ინვარიანტობის ცნებისათვის თუ არის აუცილებელი გარკვეული პირობის მითითება? ახსენით, რაზე დამოუკიდებლობას ვგულისხმობთ ფიზიკური კანონისა და ფიზიკური სიდიდის ინვარიანტობაში?

4.7. თუ ათვლის სისტემას თავისუფლად ვარდნილ სხეულს დავუკავშირებთ, მის მიმართ აჩქარება ნულის ტოლი იქნება, ხოლო დედა-

მიწის მიმართ $g = 9{,}8$ მ/წმ^2. როგორ ეთანხმება ეს აჩქარების ინვარიანტობას?

4.8. რადგან მასა ინვარიანტული სიდიდეა, შეიძლება იგი დამოკიდებული იყოს სხეულის მოძრაობის სიჩქარეზე?

4.9. როგორ დაასაბუთებთ ძალის ინვარიანტობას?

4.10. დაასახელეთ ვარიანტული, ანუ ფარდობითი ფიზიკური სიდიდეები.

4.11. რა პირობებშია მართებული ნიუტონის მექანიკა? რატომ არ იგრძნობა პრაქტიკულად მისი უზუსტობა?

5. მუდმივობის კანონების ურთიერთკავშირი

1. ბუნებრივია, საკითხს იმპულსისა და ენერგიის მუდმივობის კანონების შესწავლის შემდეგ განვიხილავთ. ისევე, როგორც ნიუტონის II და III კანონებისა, მუდმივობის კანონების სწავლების მეთოდიკაც კარგადაა დამუშავებული სასწავლო-მეთოდურ ლიტერატურაში. ამიტომ მათ გადაცემასაც გამოვტოვებთ იმ ვარაუდით, რომ მკითხველისათვის საკმარისად ცნობილია. კონკრეტულობისათვის ისევ [6] სახელმძღვანელოზე მივუთითებთ, ხოლო სხვადასხვა მნიშვნელოვანი მეთოდური ასპექტის გასარკვევად ამოცანების ამოხსნასთან ერთად – ავტორის [16] წიგნზე.

საკითხი ფიზიკური კანონების ინვარიანტობის თემის გაგრძელებაა. მსგავსად წინა საკითხისა, იგიც სრულიად ახალია სასკოლო კურსისათვის. ჩვენთვის მას საკვანძო მნიშვნელობა აქვს. ფარდობითობის პრინციპის არსი ის არის, რომ იგი ურთიერთკავშირს ამყარებს ფიზიკის კანონებს შორის (იხ. ფიზიკის სტრუქტურა შესავალში), რაც, უპირველესად, ენერგიისა და იმპულსის მუდმივობის კანონების ურთიერთკავშირში ვლინდება. ეს ურთიერთკავშირი საშუალებას იძლევა უკვე ნიუტონის მექანიკის ფარგლებში გავაშუქოთ ფუნდამენტური ერთიანობა ენერგიისა და იმპულსის ცნებებისა – ისინი ერთმანეთის გარეშე არ არსებობს, თანახმად ფარდობითობის პრინციპისა. ამას არსებითი მნიშვნელობა აქვს რელატივისტური ცნებების თანამედროვე ინტერპრეტაციაზე გადასასვლელად.

საკითხი ორი, რამდენადმე განსხვავებული მათემატიკური ფორმით გავარჩიოთ: ერთი ანალიზისათვის, მეორე – გაკვეთილისათვის.

განვიხილოთ ორი სხეულის დრეკადი დაჯახება. დავუშვათ, პირველი სხეულის მასა არის m_1, ხოლო მეორის – m_2, ლაბორატორიული სისტემის მიმართ სიჩქარეები დაჯახებამდე შესაბამისად – $\mathbf{v}_1$ და $\mathbf{v}_2$, დაჯახების შემდეგ – $\mathbf{u}_1$ და $\mathbf{u}_2$. რადგან დაჯახება დრეკადია, კინეტიკურ

ენერგიათა ჯამი დაჯახების შედეგად არ იცვლება:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2}+\frac{m_2 v_2^2}{2}=\frac{m_1 u_1^2}{2}+\frac{m_2 u_2^2}{2}. \tag{5.1}$$

გამოვიყენოთ ფარდობითობის პრინციპი: ენერგიის მუდმივობის კანონს ერთნაირი სახე აქვს ნებისმიერი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ. მსგავსი საკითხი ნიუტონის კანონებისათვისაც გავარკვიეთ. მაგრამ ახლა უფრო საინტერესო შემთხვევა გვაქვს. ნიუტონის კანონებში შემავალი ყველა წევრი ინვარიანტული სიდიდეა და ადვილი გასაგებია, რომ ამ კანონებს ერთნაირი სახე აქვს ნებისმიერი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ. (5.1) ენერგიის მუდმივობის კანონში კი შედის ვარიანტული, ფარდობითი სიდიდე – სიჩქარე. ენერგიათა ჯამი მუდმივი კი არის, მაგრამ ინვარიანტული არ არის. ტერმინები „ინვარიანტული“ და „მუდმივი“ ერთმანეთისაგან უნდა განვასხვაოთ. ვნახოთ, რას მივიღებთ. დავწეროთ ენერგიის მუდმივობის კანონი არარელატივისტური მუდმივი $\mathbf{v}_s$ სიჩქარით მოძრავი ინერციული ათვლის სისტემის – ვთქვათ, რაკეტის – მიმართ:

$$\frac{m_1\left(v_1^{'}\right)^2}{2}+\frac{m_2\left(v_2^{'}\right)^2}{2}=\frac{m_1\left(u_1^{'}\right)^2}{2}+\frac{m_2\left(u_2^{'}\right)^2}{2}. \tag{5.2}$$

შტრიხებით ტრადიციულად აღნიშნავენ სიდიდეთა მნიშვნელობებს მოძრავი ათვლის სისტემის მიმართ.

o რატომ არ გაეუკეთეთ შტრიხი მასებს?

სიჩქარეები (1.1) შეკრების წესის მიხედვით დავაკავშიროთ:

$$\begin{gathered}\mathbf{v}_1^{'}=\mathbf{v}_1-\mathbf{v}_s,\ \mathbf{v}_2^{'}=\mathbf{v}_2-\mathbf{v}_s,\\ \mathbf{u}_1^{'}=\mathbf{u}_1-\mathbf{v}_s,\ \mathbf{u}_2^{'}=\mathbf{u}_2-\mathbf{v}_s.\end{gathered} \tag{5.3}$$

(5.3) ჩასმა (5.2)-ში და (5.1)-ის გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$\left(m_1\mathbf{v}_1+m_2\mathbf{v}_2\right)\mathbf{v}_s=\left(m_1\mathbf{u}_1+m_2\mathbf{u}_2\right)\mathbf{v}_s. \tag{5.4}$$

(5.4) განტოლება $\mathbf{v}_s$ -ის ნებისმიერი მნიშვნელობისათვის უნდა შესრულდეს, ამიტომ მისი ზოგადი ამონახსენია:

$$m_1\mathbf{v}_1+m_2\mathbf{v}_2=m_1\mathbf{u}_1+m_2\mathbf{u}_2. \tag{5.5}$$

მივიღეთ იმპულსის მუდმივობის კანონი. ამრიგად, ენერგიის მუდმივობის კანონს ერთნაირი სახე ექნება ყველა ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ იმპულსის მუდმივობის კანონიც სრულდება. ეს ფუნდამენტური შედეგი ფარდობითობის პრინციპმა მოგვცა: გამომდინარე ენერგიის მუდმივობის კანონიდან, თეორიულად გამოვიყვანეთ იმპულსის მუდმივობის კანონი – თვალსაჩინოდ დავინახეთ

ურთიერთკავშირი ფიზიკის კანონებს შორის. ენერგიისა და იმპულსის მუდმივობის კანონები, ენერგიისა და იმპულსის ცნებები ერთმანეთის გარეშე არ არსებობს. მართალია, ეს დასკვნა ნიუტონის მექანიკის ფარგლებში, არარელატივისტური მიახლოებისათვის გავაკეთეთ, მაგრამ ფარდობითობის პრინციპის საფუძველზე, რომელიც ფიზიკის უზოგადესი დებულებაა. ამიტომ დასკვნაც უზოგადესია, მართებულია რელატივისტურ შემთხვევაშიც (იცვლება მხოლოდ იმპულსისა და ენერგიის გამოსახულებები). იმპულსისა და ენერგიის ეს უნივერსალური კავშირი არსებით დახმარებას გაგვიწევს ფარდობითობის თეორიის შესწავლისას.

რა თქმა უნდა, დასკვნა არ არის დამოკიდებული დაჯახების სახეზე. იგივე მართებულია არადრეკადი დაჯახებისათვისაც. მისთვის მუდმივია კინეტიკური და შინაგანი ენერგიების ჯამი. (5.1) ტოლობას მარჯვენა მხარეში უნდა დავუმატოთ $\Delta\varepsilon$ შინაგანი ენერგიის ცვლილება. მასების გარდა $\Delta\varepsilon$ დამოკიდებულია სხეულთა ფარდობით (და არა აბსოლუტურ) სიჩქარეზე, რომელიც ინვარიანტია – იხ. (4.4). ასე რომ, $\Delta\varepsilon$-ც ინვარიანტია და გავლენას არ მოახდენს შედეგზე.

2. გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. შევისწავლეთ რა ენერგიისა და იმპულსის მუდმივობის ფუნდამენტური კანონები მექანიკური მოვლენებისათვის, ახლა ფარდობითობის პრინციპი გამოვიყენოთ მათ მიმართ. თვალსაჩინოებისათვის მარტივი ამოცანა განვიხილოთ: ორი სხეულის დრეკადი დაჯახება.

დრეკადი ისეთ დაჯახებას ეწოდება, რომლის შედეგადაც სხეულების კინეტიკურ ენერგიათა ჯამი არ იცვლება. ვთქვათ, ერთი სხეულის მასა არის m_1, ხოლო მეორის – m_2, ხოლო დაჯახებამდე ლაბორატორიული ათვლის სისტემის მიმართ ისინი შესაბამისად $\mathbf{v}_1$ და $\mathbf{v}_2$, სიჩქარეებით მოძრაობს. ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად,

$$\frac{m_1 v_1^2}{2}+\frac{m_2 v_2^2}{2}=\mathrm{const}. \qquad (5.6)$$

ვისარგებლეთ ფიზიკაში ფართოდ გავრცელებული აღნიშვნით: ნაცვლად იმისა, რომ მარჯვენა მხარე ცხადად ჩაგვეწერა მასებისა და სიჩქარეების მეშვეობით, უბრალოდ დავწერეთ const (იკითხება „კონსტანტა“), რაც ქართულად მუდმივს ნიშნავს. ასეთი აღნიშვნა ძალზე მოსახერხებელია წერის შემოკლებისათვის. მაგრამ უნდა გვახსოვდეს, რომ ნებისმიერი შემოკლება სტენოგრაფიის მსგავსია – გაშიფვრა სჭირდება.

ფარდობითობის პრინციპის თანახმად, (5.6) კანონს იგივე სახე აქვს მოძრავი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ. როგორც ადრე ვთქვით, თვალსაჩინოებისათვის წარმოვიდგინოთ ლაბორატორიის მიმართ ნების-

მიერი მუდმივი, მაგრამ არარელატივისტური $\mathbf{v}_s$ სიჩქარით მოძრავი კოსმოსური ხომალდი. ასტრონავტისათვის დაჯახებამდე სხეულთა სიჩქარეებს სხვა მნიშვნელობები აქვს, რადგან სიჩქარე ფარდობითია. აღვნიშნოთ ისინი შესაბამისად $\mathbf{v}_1'$ და $\mathbf{v}_2'$ ასოებით (ტრადიციულად მოძრავი სისტემის მიმართ სიდიდეებს შტრიხს უკეთებენ). ხომალდის მიმართ ენერგიის მუდმივობის კანონი შემდეგნაირად დავწეროთ:

$$\frac{m_1\left(v_1'\right)^2}{2}+\frac{m_2\left(v_2'\right)^2}{2}=\text{const}. \qquad (5.7)$$

მასა ინვარიანტია და შტრიხი არ სჭირდება. სიჩქარის ფარდობითობის გამო (5.7)-ში მუდმივას მნიშვნელობა სხვაა, ვიდრე (5.6)-ში, თუმცა აღნიშვნა ერთნაირია (ამიტომაც ვახსენეთ გაშიფვრის საჭიროება). ვხედავთ, რომ ენერგიების ჯამი მუდმივია, მაგრამ ინვარიანტული არ არის. ამიტომ ტერმინები „მუდმივობა“ და „ინვარიანტობა“ ერთმანეთისაგან უნდა განვასხვაოთ.

სიჩქარეები მათი (1.1) შეკრების წესის მიხედვით დავაკავშიროთ:

$$\mathbf{v}_1'=\mathbf{v}_1-\mathbf{v}_s,\ \mathbf{v}_2'=\mathbf{v}_2-\mathbf{v}_s. \qquad (5.8)$$

(5.8) ჩავსვათ (5.7)-ში და წევრები შემდეგნაირად დავალაგოთ:

$$\frac{m_1v_1^2}{2}+\frac{m_2v_2^2}{2}+\left(\frac{m_1}{2}+\frac{m_2}{2}\right)v_s^2+\left(m_1\mathbf{v}_1+m_2\mathbf{v}_2\right)\mathbf{v}_s=\text{const}. \qquad (5.9)$$

(5.9)-ში პირველი ორი წევრის ჯამი მუდმივია, თანახმად (5.6)-ისა. მე-3 და მე-4 წევრებიც მუდმივია. ამიტომ (5.9)-დან გამომდინარეობს, რომ

$$\left(m_1\mathbf{v}_1+m_2\mathbf{v}_2\right)\mathbf{v}_s=\text{const}. \qquad (5.10)$$

(5.10)-ში მუდმივას მნიშვნელობა სხვაა, ვიდრე (5.9)-ში. (5.10) უნდა შესრულდეს ნებისმიერი $\mathbf{v}_s$-თვის, ამიტომ მისი ზოგადი ამონახსნია:

$$m_1\mathbf{v}_1+m_2\mathbf{v}_2=\text{const}. \qquad (5.11)$$

(5.11) იმპულსის მუდმივობის კანონია. ამრიგად, ენერგიის მუდმივობის კანონს ერთნაირი სახე ექნება ყველა ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ, თუ აუცილებლად შესრულდება იმპულსის მუდმივობის კანონიც. მივიღეთ ფუნდამენტური შედეგი: ფარდობითობის პრინციპი ორგანულად აკავშირებს ენერგიისა და იმპულსის ცნებებს, მუდმივობის კანონებს – ისინი ურთმანეთოდ არ არსებობს. ვინაიდან ფარდობითობის პრინციპი ფიზიკის უზოგადესი დებულებაა, მის საფუძველზე გამოტანილი დასკვნაც უზოგადესია – მართებულია ნებისმიერი ფიზიკური მოვლენისათვის (იმპულსის და ენერგიის გამოსახულებები იცვლება მხოლოდ). ამ შინაგანმა სიღრმისეულმა კავშირმა აინშტაინი მიიყვანა *ენერგიის ახალ ინტერპრე-*

ტაციამდე, უძრაობის ენერგიის აღმოჩენამდე, რაც საერთოდ ადამიანის ერთ-ერთი უდიდესი აღმოჩენაა.

კითხვები, ამოცანები

5.1. ჩაწერეთ ნიუტონის II კანონი იმპულსის ცნების გამოყენებით და განსაზღვრეთ ძალა.

5.2. ზოგიერთ წიგნში წერია, რომ ინერციის კანონი იმპულსის მუდმივობის კანონის კერძო შემთხვევაა. დაეთანხმებით ასეთ მტკიცებას?

5.3. შეადარეთ (5.6) და (5.11) განტოლებების მუდმივათა ერთეულები. ინვარიანტულია თუ არა ეს მუდმივები?

5.4. იმპულსის მუდმივობის კანონს ერთნაირი სახე აქვს ყველა ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ. მსგავსად გაკვეთილში განხილულისა, გამოიყენეთ სიჩქარეთა შეკრების წესი და გაარკვიეთ, რას მიიღებთ.

5.5. სხეულის თავისუფალი ვარდნისას კინეტიკური და პოტენციური ენერგიების ჯამი მუდმივია, ხოლო სხეულის იმპულსი იზრდება. როგორ ეთანხმება ეს ენერგიისა და იმპულსის მუდმივობის კანონების სიღრმისეულ ურთიერთკავშირს?

ელექტრომაგნეტიზმი და ოპტიკა

6. ელექტრომაგნიტური ველისა და ელექტრული მუხტის ცნებათა ფორმირება

1. ელექტრომაგნეტიზმის სასკოლო კურსის გადამუშავების გამოცდილება რელატივისტური კონცეფციის, ფარდობითობის პრინციპის საფუძველზე, ფაქტობრივად, არ გაგვაჩნია. მიზეზი შემდეგია: მექანიკის სასკოლო კურსში გალილეის ფარდობითობის პრინციპის სწავლების მცირედი გამოცდილება არსებობს, მაგრამ იგი საერთოდ არ გამოდგება ელექტრომაგნეტიზმისათვის. აინშტაინის ფარდობითობის პრინციპი კი ფარდობითობის თეორიასთან ერთად სკოლაში მხოლოდ ოპტიკის შემდეგ ისწავლება. ჩვენი მიდგომა არსებითად განსხვავებულია: რადგან აინშტაინის ფარდობითობის პრინციპი ბუნებრივად ჩავსვით ნიუტონის მექანიკის კურსში, ეს გზას გვიხსნის ელექტრომაგნეტიზმისა და ოპტიკის ერთიანი კურსის გასააზრებლად რელატივისტურ წარმოდგენებსა და ელექტრომაგნიტური ველის კონცეფციაზე დამყარებით. უამისოდ შეუძლებელია რელატივისტური კლასიკური ფიზიკის საფუძვლების შესწავლა ფუნდამენტური ცოდნის ერთიანი სისტემის სახით. მაქსველის თეორია რელატივისტურად ინვარიანტული პირველი თეორია აღმოჩნდა და ამიტომაც ამოიზარდა მისგან აინშტაინის ფარდობითობის თეორია. გაუმართლებელია XXI საუკუნეში შევინარჩუნოთ ამ თეორიების სწავლების ისტორიული, სტანდარტულად გადაქცეული მიმდევრობა. ელექტრომაგნიტური ველი, როგორც ფიზიკური რეალობა, წმინდა რელატივისტური ცნებაა და დროა სასკოლო კურსიც შესატყვისად იქნეს გამართული.

ავტორი ეყრდნობა თავის [17] სახელმძღვანელოს, რომელშიც ზოგადი ელექტრობის კურსი, განსხვავებით სხვებისაგან, გადმოცემულია როგორც ელექტრომაგნიტური ველის რელატივისტურად ინვარიანტული ფუნდამენტური თეორია, დაფუძნებული ცდისეულ ბაზისზე. რასაკვირველია, საშუალო სკოლის კურსისათვის აუცილებელია ამ სახელმძღვანელოს აგების პრინციპების მნიშვნელოვანი დიდაქტიკური გადამუშავება. ასეთი გადამუშავების საფუძველზე ზოგიერთი საკითხი მხოლოდ მეთოდური ანალიზის სახითაა გადმოცემული, რათა ტრადიციული საკითხების დამატებად ან შესაცვლელად იქნეს გამოყენებული მასწავლებლის შეხედულებისამებრ, ზოგიერთი კი სრულიად ახალია და ამიტომ გაკვეთილებადაა ჩამოყალიბებული.

ე ლ ე ქ ტ რ ო მ ა გ ნ ი ტ უ რ ი ურ თ ი ე რ თ ქ მ ე დ ე ბ ა და მ ი ს ი მ ნ ი შ ვ ნ ე ლ ო ბ ა. ელექტრული და მაგნიტური ურთიერთქმედების მაგალითებს ადამიანი უხსოვარი დროიდან იცნობს. ტერმინები ძველი საბერძნეთიდან მომდინარეობს: „ელექტრობა“ ქართულად ქარვას ნიშნავს, „მაგნიტი“ წარმოიშვა მინერალ მაგნეტიტის სახელიდან – იგი ქალაქ მაგნეზიის მახლობლად აღმოაჩინეს.

ელექტრომაგნეტიზმის კურსის შესწავლა სასურველია დავიწყოთ სადემონსტრაციო ცდების ჩვენებით, მოვლენებისა და წარმოსახვითი ცდების აღწერით. მიზანი: *ელექტრულ, მაგნიტურ, ელექტრომაგნიტურ* ურთიერთქმედებათა შესახებ საანალიზო მასალის მიწოდება. სასწავლო-მეთოდურ ლიტერატურაში აღწერილია მრავალი ცდა და მოვლენა, არჩევანი ფართოა და მკითხველისათვის მიგვინდია.

მოვლენებისა და ცდების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ *ელექტრომაგნიტური* ურთიერთქმედება განპირობებულია *ელექტრულად* დამუხტული ნაწილაკების არსებობით, *მაგნიტურად* დამუხტული ნაწილაკები არ არსებობს. ამ ერთიანი საწყისის – ელექტრული მუხტის – არსებობა მიგვანიშნებს, რომ ცალკე ელექტრული და ცალკე მაგნიტური ურთიერთქმედება ერთი მთლიანი ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების ორი მხარეა.

გამოჩენილმა ინგლისელმა მეცნიერმა დირაკმა 1933 წელს თეორიულად იწინასწარმეტყველა მაგნიტური მუხტების არსებობა. მაგნიტური მუხტის ელემენტარული პორციის მატარებელ ნაწილაკს მან მონოპოლი უწოდა. მიუხედავად ინტენსიური ექსპერიმენტული ძიებისა, მონოპოლი აღმოჩენილი არ არის, თუმცა იმავე თეორიით ნაწინასწარმეტყველები პოზიტრონისა და სხვა ანტინაწილაკების არსებობა დადასტურებულია ცდით. რა თქმა უნდა, მონოპოლის აღმოჩენა ფიზიკის ერთ-ერთი უდიდესი აღმოჩენა იქნებოდა. ეს საკითხი სცილდება კლასიკური ფიზიკის ფარგლებს, რელატივისტურ კვანტურ თეორიას განეკუთვნება.

როგორ ხდება სხეულთა დაელექტროება, დამუხტვა? პასუხისათვის წარმოდგენა უნდა გვქონდეს ნივთიერების აგებულებაზე. სხეულები ატომებისაგან შედგება. ატომი, თავის მხრივ, შედგება ბირთვისაგან, რომელშიც დადებითად დამუხტული ნაწილაკებია – პროტონები (ნეიტრალურ ნეიტრონებთან ერთად) და ბირთვის გარშემო მოძრავი უარყოფითად დამუხტული მსუბუქი ელექტრონებისაგან. ჩვეულებრივ პირობებში ატომები და, მაშასადამე, მათგან შედგენილი სხეულები, ელექტრულად ნეიტრალურია – დადებითი და უარყოფითი მუხტები ერთმანეთს ანეიტრალებს. დამუხტვის ნებისმიერი ხერხისას – ხახუნი, შეხება, დასხივება...– მსუბუქი ელექტრონები ერთი სხეულიდან მეორეზე გადადის და სხეულები ელექტროვდება, იმუხტება. სხეული, რომელსაც ელექტრონები აკლ-

დება, დადებითად იმუხტება, ხოლო რომელსაც ემატება – უარყოფითად.

შევადაროთ ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება სხვა სახის ფუნდამენტურ ურთიერთქმედებებს. ცნობილია ოთხი სახის ფუნდამენტური ურთიერთქმედება: გრავიტაციული, ელექტრომაგნიტური, ძლიერი და სუსტი. ყველა სხვა ურთიერთქმედება ერთ-ერთ მათგანზე დაიყვანება. მაგალითად, ხახუნი საბოლოო ჯამში ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების გამოვლენაა. ისიც ვთქვათ, რომ, ვინაიდან ფიზიკა ბუნების მთლიანობას უნდა ასახავდეს, ოთხივე სახის ურთიერთქმედების გამაერთიანებელი თეორიის შექმნა აქტუალური პრობლემაა (გარკვეული წარმატებები მიღწეულია, მაგრამ...).

ყველაზე სუსტი გრავიტაციული ურთიერთქმედება არის. დამუხტულ ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების გრავიტაციული ძალა, მასების სიმცირის გამო, გაცილებით ნაკლებია ელექტრულზე. მაგალითად, ელექტრონებისათვის $F_e / F_G \sim 10^{42}$! მაგრამ ნეიტრალობის გამო დიდი სხეულებისათვის ელექტრული ძალა არ მჟღავნდება, გრავიტაციული კი მნიშვნელოვანი ხდება. ძლიერი ურთიერთქმედება (ბირთვული ძალები) თავს იჩენს ნუკლონების – პროტონებისა და ნეიტრონების საერთო სახელწოდებაა – დაახლოებისას 10^{-15} მ რიგის მანძილებზე და ორი რიგით აღემატება ელექტრომაგნიტურს. სუსტი ურთიერთქმედება კიდევ უფრო მცირე, $\sim 10^{-17}$ მ, მანძილებზე მჟღავნდება, გაცილებით ნაკლებია ელექტრულზე, მაგრამ მნიშვნელოვნად აღემატება გრავიტაციულს.

სამყაროს აგებულებას დაახლოებით 10^{-14}-დან 10^{5} მეტრამდე მანძილებზე ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება განაპირობებს. ჩვენი სიცოცხლეც ამ ინტერვალშია! უფრო დიდ მანძილებზე არსებითი ხდება გრავიტაციული ურთიერთქმედება, უფრო მცირეზე კი – ბირთვული და სუსტი. გარდა ამისა, ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების თვისებები მთავარ როლს ასრულებს თანამედროვე ტექნიკის განვითარებაში. ამიტომ ადამიანისათვის განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების შესწავლას.

2. ე ლ ე ქ ტ რ ო მ ა გ ნ ი ტ უ რ ი ვ ე ლ ი ს ც ნ ე ბ ა. როგორ ხორციელდება ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება დამუხტულ ნაწილაკებს, სხეულებს შორის სიცარიელეში? მსგავსი კითხვა პირველად მექანიკაში, ნიუტონის მიერ მსოფლიო მიზიდულობის კანონის აღმოჩენის შემდეგ დაისვა. თვით ნიუტონი ხაზგასმით აღნიშნავდა, რომ მისი თეორია არის მხოლოდ მათემატიკური აღწერა პლანეტების მოძრაობისა და

არ ხსნის მიზიდულობის ბუნებას –როგორ მოქმედებს სხეულები ერთმანეთზე სიცარიელეში. იგი წერდა: „მე ვერ შევძელი მიზიდულობის მიზეზთა გარკვევა, რამეთუ ისინი არ გამომდინარეობს მოვლენებიდან". ნიუტონის თეორიის არნახულ წარმატებათა ფონზე მისმა თანამიმდევრებმა დაივიწყეს ეს გაფრთხილება და შორსქმედების კონცეფცია განავითარეს. შორსქმედების კონცეფციის თანახმად, დაშორებული სხეულები სიცარიელეში ერთმანეთზე უშუალოდ მოქმედებს, ანუ ურთიერთქმედება მეყსეულად გადაეცემა. ფიზიკაში დამკვიდრდა ურთიერთქმედების გადაცემის სიჩქარის c ასოთი აღნიშვნის ტრადიცია, ამიტომ შორსქმედების კონცეფცია მოკლედ ასე შეგვიძლია ჩავწეროთ: $c = \infty$.

შორსქმედების კონცეფციის დაძლევა ელექტრომაგნეტიზმის შესწავლის საფუძველზე მოხდა. ახლოქმედების, ანუ ველის კონცეფცია, მეცნიერებაში ფარადეიმ შემოიტანა. ახლოქმედების კონცეფციის თანახმად, დამუხტული ნაწილაკი თავის გარშემო სივრცეში ელექტრომაგნიტურ ველს ქმნის. ერთი ნაწილაკის ველი მოქმედებს მეორე ნაწილაკზე და მეორე ნაწილაკის ველი მოქმედებს პირველ ნაწილაკზე – ურთიერთქმედება ნაწილაკებს შორის ველის მეშვეობით ხორციელდება. შეუძლებელია სიცარიელეში ნაწილაკები უშუალოდ მოქმედებდეს ერთმანეთზე, უშუალოდ ურთიერთმოქმედებს ნაწილაკი და ველი. ხაზი გავუსვათ, რომ თვით ველები ერთმანეთზე არ მოქმედებს, თავისუფლად განჭოლავს ურთიერთს. ეს სუპერპოზიციის პრინციპის (შემდგომ შევისწავლით) გამოვლენაა. თვალსაჩინო მაგალითი ბევრჯერ გვინახავს: სინათლის ორი სხივი თავისუფლად, ურთიერთქმედების გარეშე, გადის ერთმანეთში. შევაჯამოთ: ახლოქმედების კონცეფციის არსს შეადგენს ველის მეშვეობით ურთიერთქმედების გადაცემა წერტილიდან წერტილში *სასრული სიჩქარით,* ანუ $c < \infty$.

რას ნიშნავს ურთიერთქმედების გადაცემა ველის მეშვეობით? რას ნიშნავს ურთიერთქმედების გადაცემის სასრული სიჩქარე? ეს რთული კითხვებია, რომლებზედაც პასუხის ძიებამ მეცნიერება მიიყვანა ველის ფიზიკური რეალობის ცნებამდე, რელატივისტურ ფიზიკამდე. შევეცადოთ თანამიმდევრულად გავიაროთ ეს გზა.

სამყარო შედგება ნივთიერებისა და ველისაგან (ცხადია, არა მხოლოდ ელექტრომაგნიტურისაგან). ისინი ერთმანეთის გარეშე არ არსებობენ. ნიუტონმა შექმნა ნივთიერების მექანიკური მოძრაობის თეორია, მაქსველმა – ელექტრომაგნიტური ველის მოძრაობისა და თვისებებისა.

გასაგები უნდა იყოს შემეცნებითი ღირებულება ელექტრომაგნეტიზმის სასკოლო კურსისა, რომელიც ველის ცნებაზეა დაფუძნებული.

როგორ ვუპასუხოთ კითხვაზე: რა არის ელექტრომაგნიტური ველი? ელექტრომაგნიტური ველი უზოგადესი, პირველადი ცნებაა. იგი სხვა არაფერზე არ დაიყვანება. ამიტომ მისი განსაზღვრა შეიძლება მხოლოდ არსებითი ნიშნების ჩამოთვლით (იხ. შ. 4.2). ეს არსებითი ნიშნები ცდით არის დადგენილი:

ელექტრომაგნიტური ველის წყაროა ელექტრული მუხტი (უძრავი თუ მოძრავი); ელექტრომაგნიტური ველი მოქმედებს ელექტრულ მუხტზე (უძრავსა თუ მოძრავზე); არ არსებობს მაგნიტური მუხტი.

სწორედ ამ არსებითი თვისებების საფუძველზე ხდება ელექტრომაგნიტური ველის მახასიათებელი ფიზიკური სიდიდეების დადგენა.

ადრე (როდესაც არ არსებობდა ველის ფიზიკური რეალობის ცნება) შეუძლებელი იყო წარმოდგენა, რომ ურთიერთქმედება გადაეცემა სიცარიელეში წერტილიდან წერტილში. ამიტომ „შუამავლის" ფუნქცია მიაწერეს ჰიპოთეზურ ნივთიერ გარემოს — მსოფლიო ეთერს, რომელსაც მექანიკური თვისებები უნდა ჰქონოდა. ეთერის მექანიკური თეორია გადაულახავ წინააღმდეგობებს წააწყდა, ხოლო ფარდობითობის თეორიის შექმნის შემდეგ ნათელი გახდა, რომ ეთერი არ არსებობს — ურთიერთქმედების გადაცემისათვის არ არის საჭირო რაიმე ნივთიერი გარემო, სიცარიელეში იგი ველის მეშვეობით ხორციელდება. ამიტომ დღეს ტერმინი „ეთერი" ველის სინონიმად შეგვიძლია ჩავთვალოთ.

3. ე ლ ე ქ ტ რ უ ლ ი მ უ ხ ტ ი. ელექტრული მუხტის ცნება ნაწილაკთა, სხეულთა იმ თვისების დასახასიათებლად შემოდის, რომელსაც ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება წარმოადგენს. არ უნდა შეგვაცდინოს გავრცელებულმა გამოთქმებმა: „დავმუხტეთ", „განვმუხტეთ". ელექტრული მუხტი ნაწილაკთა თანდაყოლილ თვისებას აღნიშნავს, რომლის მოცილება ან მიწებება ნაწილაკისათვის შეუძლებელია და არ არსებობს ნაწილაკის (მატარებლის) გარეშე. მაგრამ სიმოკლისათვის „ელექტრულად დამუხტული ნაწილაკის, სხეულის" ნაცვლად ხშირად გამოიყენება გამოთქმა „მუხტი". როგორც წესი, ფიზიკის ელემენტარულ და ზოგად კურსებში ელექტრული მუხტის ცნება შორსქმედების პოზიციიდან შემოაქვთ. ჩვენთვის ეს მიუღებელია. განვსაზღვროთ ელექტრული მუხტის ცნება, გამომდინარე ახლოქმედების, ველის კონცეფციიდან. ამოსავალი არის ცდა, რომელიც გვიჩვენებს, რომ ელექტრომაგნიტურ ველთან ურთიერთქმედების მიმართ დამუხტული ნაწილაკის თვისება

განისაზღვრება ერთი სკალარული სიდიდით, რომელსაც ელექტრული მუხტი ეწოდება.

ელექტრული მუხტი არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც ელექტრომაგნიტურ ველთან ნაწილაკის ურთიერთქმედების ზომას წარმოადგენს.

ეს ელექტრული მუხტის თვისებრივი განსაზღვრებაა. მისი შემოტანის მეთოდიკა ისეთივეა, როგორიც მასის შემთხვევაში. რაოდენობრივი განსაზღვრისათვის აუცილებელია ფიზიკური კანონის გამოყენება. აქ კი მთელი სირთულით წარმოჩნდება ფიზიკის დიალექტიკა. განსაზღვრებისა და ფიზიკური კანონის კავშირი საფუძვლიანად გავარკვიეთ 4.2 მუხლში. მოკლედ დავაკონკრეტოთ დედააზრი. ელექტრული მუხტის განსასაზღვრავად კანონი გვჭირდება, კანონის დასადგენად ცდა უნდა ჩავატაროთ, ცდის ჩასატარებლად კი ელექტრული მუხტის თვისებები უნდა ვიცოდეთ. თითქოს შეკრული წრე მივიღეთ. სინამდვილეში, განსხვავებით ფორმალური ლოგიკისაგან, არ შეიძლება მოვითხოვოთ, რომ თავდაპირველად განსაზღვრება ჩამოვაყალიბოთ და შემდეგ ცალ-ცალკე დავადგინოთ მუხტის თვისებები და კანონი. ფიზიკაში გასარკვევად უნდა გვესმოდეს: ცნების განსაზღვრება, კანონი, სიდიდის გაზომვის მეთოდი და თეორია ერთმანეთთან უწყვეტ კავშირში ყალიბდება. ვნახოთ, როგორ შეიძლება ამის განხორციელება.

განვიხილოთ ცდის იდეა. ვთქვათ, ელექტრომაგნიტურ ველში მოძრაობს *სასინჯი* მუხტი და ვზომავთ მასზე მოქმედ ძალას. სასინჯი მუხტი ეწოდება ისეთ დამუხტულ სხეულს, რომლის ზომები და მუხტის სიდიდე მცირეა (მოცემულ პირობებში). ეს ძალზე მოსახერხებელია. უმნიშვნელო ზომების გამო სასინჯი მუხტი შეგვიძლია წერტილოვნად ჩავთვალოთ და გაზომვები სივრცის წერტილებს მივაკუთვნოთ. მუხტის სიდიდის სიმცირის გამო კი მუხტის შეტანა არ გამოიწვევს შეტანამდე არსებული ველის ცვლილებას — უმნიშვნელო ურთიერთქმედების გამო არ გადანაწილდება ამ ველის შემქმნელი მუხტები. როგორ შევცვალოთ სასინჯი მუხტის სიდიდე? გამოვიყენოთ კულონის მახვილგონივრული ხერხი. ერთმანეთს შევახოთ დამუხტული და ნეიტრალური ერთნაირი ორი ლითონის ბურთულა. სიმეტრიის გამო მუხტი მათ შორის თანაბრად განაწილდება და დაშორების შემდეგ თითოეულზე დარჩება პირვანდელის ნახევარი მუხტი. მახვილგონივრული ის არის, რომ, უცნობია რა თავდაპირველი მუხტი (ჯერ არ დაგვიდგენია კანონი და გაზომვის მეთოდი), ზუსტად ვიცით რამდენჯერ შემცირდა მისი სიდიდე. ეს კი სავსებით საკმარისია რაოდენობრივი კანონის დასადგენად.

დაკვირვებით გავადევნოთ თვალი, მუხტის რომელ თვისებებს ვეყრდნობით დასკვნის გამოტანისას. ლითონის ბირთვების შეხებისას მუხტი მათ შორის გადანაწილდება და იკრიბება. მუხტის ამ თვისებას ადიტიურობას უწოდებენ. ის, რომ მუხტი თანაბრად განაწილდება *ერთნაირ* ბირთვებს შორის, სიმეტრიის შედეგია. მაგრამ რატომ სახელდობრ პირვანდელი მუხტის ნახევარი დარჩება თითოეულ ბირთვზე? ეს უკვე მუხტის მუდმივობის კანონის შედეგია. მაგრამ ეს ყველაფერი არ არის: ხომ შეიძლება ელექტრული მუხტის სიდიდე დამოკიდებული აღმოჩნდეს მუხტის მატარებლის (სხეული, ნაწილაკი) სიჩქარეზე? ადრე გავარკვიეთ, რომ იგივე აზრი სხვანაირადაც შეიძლება გამოვხატოთ: ერთნაირია თუ არა მუხტის მნიშვნელობა ნებისმიერი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ, ანუ ინვარიანტულია თუ არა მუხტი? ამის გარკვევის გარეშე ვერ გავზომავთ *მოძრავ* მუხტს და ვერც ელექტრომაგნეტიზმის *ზოგად* თეორიას ჩამოვაყალიბებთ. პასუხი მხოლოდ ცდას შეუძლია მოგვცეს. სამწუხაროდ, სასკოლო კურსში მუხტის ეს თვისება არ ისწავლება: მუხტის ცნება ელექტროსტატიკის ფარგლებში შემოაქვთ და შემდგომ აღარ ავითარებენ (ასე შეუძლებელია რელატივისტური ფუნდამენტური ფიზიკის საფუძვლების გააზრება). ცდა იძლევა, რომ ელექტრული მუხტი ინვარიანტული სიდიდეა. თვალსაჩინო დადასტურება ატომის ნეიტრალობა არის: ატომში ელექტრონები სხვადასხვა სიჩქარით მოძრაობს და, მოძრაობა რომ რაიმე გავლენას ახდენდეს მუხტის მნიშვნელობაზე, ატომი ნეიტრალური არ იქნებოდა. ამგვარად, ცდის ჩასატარებლად წარმოდგენა უნდა გვქონდეს (ცხადია, სხვა ცდების საფუძველზე) მუხტის შემდეგ თვისებებზე: ორგვარობა, ადიტიურობა, მუდმივობა, ინვარიანტობა.

ინვარიანტობის გამო შეგვიძლია სიმარტივისათვის შემოვიფარგლოთ უძრავი სასინჯი მუხტის გამოყენებით. გავზომოთ ელექტრომაგნიტური ველის ნებისმიერ წერტილში მასზე მოქმედი ძალა მუხტის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის (ვთქვათ, კულონის მსგავსად დრეკადი ძაფის დაგრეხის კუთხის მიხედვით). ცდიდან გამომდინარეობს, რომ უძრავ წერტილოვან მუხტზე მოქმედი ძალა პროპორციულია მუხტის სიდიდისა:

$$F \propto q. \tag{6.1}$$

(6.1) არის ფიზიკის კანონი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს რაოდენობრივად განვსაზღვროთ მუხტი. ელექტრომაგნიტური ველის მოცემულ წერტილში ორი სხვადასხვა მუხტისათვის

$$F_1/F_2 = |q_1/q_2|. \tag{6.2}$$

(6.2) მსგავსია მასის (4.1) რაოდენობრივი განსაზღვრებისა. თუ ერთ-ერთ

მუხტს პირობითად ერთეულის ტოლად, ეტალონად ჩავთვლით, გამოვიანგარიშებთ მეორეს.

ელექტრული მუხტი არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც ელექტრომაგნიტურ ველთან ნაწილაკის ურთიერთქმედების ზომას წარმოადგენს და რაოდენობრივად (6.1) ფუნდამენტური კანონით განისაზღვრება.

მ უ ხ ტ ი ს ე რ თ ე უ ლ ი. რამდენად აუცილებელია მუხტის რაოდენობრივი განსაზღვრისათვის მისი ეტალონის შემოტანა? ეს წმინდა პრაქტიკული (და არა – ფიზიკური) საკითხია, დაკავშირებული ფიზიკური სიდიდეების ერთეულთა სისტემის აგებასთან. ხელსაყრელია, თუ ეტალონთა, ძირითად ერთეულთა რიცხვი დიდი არ იქნება. მუხტის ეტალონის პრაქტიკული რეალიზება არაოპტიმალურია. ფიზიკა მუხტის (ისევე, როგორც ნებისმიერი ფიზიკური სიდიდის) გაზომვის სხვადასხვა მეთოდს იძლევა – ყველი მოსახერხებელი თანაფარდობა შეიძლება გამოვიყენოთ მისი წარმოებული ერთეულის დასადგენად.

ფიზიკაში დამკვიდრდა ერთულთა ორი სისტემა: გაუსისა და საერთაშორისო (SI). საერთაშორისო სისტემაში შვიდი ძირითადი ერთეულია. ელექტრობიდან ძირითადია დენის ძალის ერთეული – ამპერი და მისი მეშვეობით განისაზღვრება მუხტის წარმოებული ერთეული – კულონი:

$$q = I \cdot t, \Rightarrow 1\text{კ}=1\text{ა}\cdot\text{წმ}.$$

1 კულონი არის გამტარის განივკვეთში 1 წამში გადატანილი მუხტი 1 ამპერი ძალის მუდმივი დენის გავლისას.

გაუსის სისტემას, რომელშიც სამი ძირითადი ერთეულია, არსებითი ფიზიკური უპირატესობა აქვს SI-თან შედარებით. მაგრამ საერთაშორისო შეთანხმებით სწავლებაში *გლობალური* მასშტაბით მხოლოდ SI გამოიყენება. ფიზიკის პოზიციიდან ეს სერიოზული ნაკლია. რადგან წინამდებარე წიგნში სრული კურსის ნაცვლად მხოლოდ საკვანძო საკითხები განიხილება, გაუსის სისტემას აღარ შევეხებით. დაინტერესებულ მკითხველს მივუთითებთ ავტორის [16] სახელმძღვანელოზე, რომელშიც გამოწვლილვით არის გაშუქებული გაუსის სისტემის გამოყენების აუცილებლობა და მეთოდიკა საშუალო სკოლის ფიზიკის კურსისათვის.

ე ლ ე ქ ტ რ უ ლ ი მ უ ხ ტ ი ს თ ვ ი ს ე ბ ე ბ ი. რა თქმა უნდა, ეს თვისებები დადგენილია ცდით და ისინი მჟღავნდება არა დამოუკიდებლად, არამედ ერთმანეთთან კავშირში. ჩამოვთვალოთ: ბუნებაში არსებობს ორი ნიშნის მუხტი, მუხტი ადიტიურია, ინვარიანტულია, იკვანტება, ინახება: ჩაკეტილი სისტემის სრული მუხტი – ალგებრული ჯამი – მუდმივია. ამ თვისებათა შესწავლის მეთოდიკა, ნათელია, სადემონსტრაციო ცდებს

უნდა ემყარებოდეს – ისინი საკმაო რაოდენობითაა აღწერილი სასწავლო-მეთოდურ ლიტერატურაში. გამონაკლისია ინვარიანტობისა და დაკვანტ-ვის თვისებები, ამიტომ მოკლედ შევჩერდეთ მათზე.

მუხტის დაკვანტვა ნიშნავს, რომ ნებისმიერი მუხტი ჯერადია ელე-მენტარული მუხტისა: $e=1{,}6\cdot10^{-19}$ კ. ელემენარული მუხტის (ნიშნის სი-ზუსტით) მატარებელი ნაწილაკებიდან სტაბილურია მხოლოდ პროტონი, ელექტრონი და მათი ანტინაწილაკები. რაც შეეხება კვარკებს, რომელთა მუხტი ნიშნის სიზუსტით არის $e/3$ და $2e/3$, ისინი თავისუფალი სახით არ არსებობენ. მუხტის დაკვანტვა კლასიკურ ფიზიკაში არ იგრძნობა, რად-გან $q>>e$ და მუხტს უწყვეტად ვთვლით.

მუხტის ინვარიანტობის დამადასტურებელი თანამედროვე ექსპერი-მენტების იდეა შემდეგია. სხვადასხვა ნივთიერების – წყალბადის, ჰელიუ-მის, ცეზიუმის, კალიუმის – ატომთა კონა გაატარეს ძლიერ ელექტრულ ველში. რადგან ატომში პროტონები და ელექტრონები სხვადასხვანაირად მოძრაობს, თუ მუხტი ინვარიანტული არ არის, დაირღვევა ატომის ნეიტ-რალობა და კონა გადაიხრება. ცდებმა არ დაადასტურა გადახრა: პროტო-ნისა და ელექტრონის მუხტის მოდული ტოლია 10^{-21} სიზუსტით!

4. ფიზიკური სიდიდის განსაზღვრებისა და ერთეულის ცოდნა საკმა-რისი არ არის მოვლენებში გასარკვევად, აუცილებელია ფიზიკურ სიდი-დეთა „რიგის შეგრძნების" გამომუშავებაც, რასაც სათანადო ყურადღება არ ეთმობა. შეფასების უნარის გამომუშავების გარეშე ფიზიკას ვერ ჩავუღრმავდებით.

ამოცანა 6.1. შეიძლება გახურების შედეგად ლითონმა ელექტრონე-ბის 0,1% დაკარგოს?

ა მ ო ხ ს ნ ა. თითქოსდა 0,1% მცირეა და ასეთი რამ სავსებით დასაშ-ვებია. სინამდვილეში ეს ფიზიკურად უაზრობაა, რის გათვითცნობიერებაც „რიგის შეგრძნებას" საჭიროებს. შევაფასოთ, რა მუხტს შეიძენდა ასეთ პირობებში, ვთქვათ, ერთი მოლი თუთია. უნდა ავიღოთ 0,1% ერთ ატომ-ში ელექტრონების $Z=30$ რაოდენობის, $N_A=6{,}02\cdot10^{23}$ მოლ$^{-1}$ ავოგადროს რიცხვისა და $e=1{,}6\cdot10^{-19}$ კ ელემენტარული მუხტის ნამრავლისა:

$$q=10^{-3}eZN_A=1{,}6\cdot3\cdot6{,}02\cdot10^{-3-19+1+23}\sim10^3\text{ კ}.$$

გამომდინარე კულონის კანონიდან, თითო კულონი მუხტი 1 მეტრ მან-ძილზე $9\cdot10^9$ ნ ძალით ურთიერთქმედებს. ეს იმდენად დიდი ძალაა, რომ ლაპარაკი 10^3 კ მუხტის აღძვრაზე ზედმეტია – სხეული დაიშლებოდა. ახლა გასაგებია, თუ რატომ არის ფიზიკურად შეუძლებელი მსგავსი რამ.

კითხვები, ამოცანები

6.2. რამდენი სახის ფუნდამენტური ველი არსებობს? მანძილთა რა ინტერვალისათვის განსაზღვრავს მატერიის სტრუქტურას ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება?

6.3. შეაფასეთ ორი ელექტრონის (პროტონის) ელექტრულ და გრავიტაციულ ურთიერთქმედებათა ძალების შეფარდება. რატომ აღემატება დიდი სხეულების გრავიტაციული ურთიერთქმედება ელექტრულს?

6.4. რომელ ფუნდამენტურ ურთიერთქმედებას განეკუთვნება ქიმიური რეაქციები? ბიოლოგიური პროცესები?

6.5. რას ნიშნავს შორსქმედება და ახლოქმედება? როგორ განსაზღვრავთ, რას ეწოდება ელექტრომაგნიტური ველი?

6.6. სრულად განსაზღვრეთ ელექტრული მუხტი (6.2)-ის მიხედვით.

6.7. დამუხტული ერთნაირი ორი ლითონის ბურთულა შეხებისას განეიტრალდა. მუხტის რომელი თვისებები მჟღავნდება ამ ცდაში?

6.8. თუ შეიცვლება ფიზიკის კანონები ელქტრონის მუხტი დადებითად რომ ჩავთვალოთ, ხოლო პროტონისა – უარყოფითად?

6.9. სხვადასხვანაირად განმარტეთ ელექტრული მუხტის ინვარიანტობის შინაარსი. როგორ მტკიცდება მუხტის ეს თვისება? რას ნიშნავს პროტონისა და ელექტრონის მუხტის მოდულთა ტოლობა 10^{-21} სიზუსტით?

6.10. დაასახელეთ სტაბილური ნაწილაკები, რომელთა მუხტი (ნიშნის სიზუსტით) ელემენტარულის ტოლია. γ-კვანტებით ნივთიერების დასხივებისას შეიძლება ელექტრონ-პოზიტრონის წყვილი წარმოიშვას. შეიძლება, ისინი ერთდროულად არ დაიბადონ?

6.11. შეაფასეთ მუხტის რიგი ხახუნით დამუხტვის სადემონსტრაციო ცდებში.

7. ლორენცის ძალა და ელექტრომაგნიტური ველის ფიზიკური რეალობა

1. ე ლ ე ქ ტ რ უ ლ ი ვ ე ლ ი. განსხვავებით ტრადიციული მეთოდიკისაგან, ელექტრომაგნიტური ველის ცნება თავიდანვე შემოგვაქვს, როგორც ერთი მთლიანისა, რომლის ორი მხარეა ცალკე ელექტრული და ცალკე მაგნიტური ველი. ზოგადი ფიზიკის კურსში ელექტრომაგნიტური ველის მახასიათებლებს, ბუნებრივია, ამ ერთიანობის პოზიციიდან

განვსაზღვრავთ – პარალელურად ელექტრული და მაგნიტური ველებისათვის. საშუალო სკოლისათვის ასეთი გადაწყვეტა რთულია. ამიტომ საჭიროა ცალ-ცალკე განვიხილოთ ელექტრული და მაგნიტური ველების მახასიათებლები და შემდეგ გადავიდეთ ზოგად შემთხვევაზე. როგორ გავაკეთოთ ეს? გამოვიყენოთ ელექტრომაგნიტური ველის ის თვისება (არსებითი ნიშანი), რომ მისი წყაროა უძრავი და მოძრავი ელექტრული მუხტები და დავიწყოთ უმარტივესი შემთხვევის შესწავლით.

ინერციული ათვლის სისტემებს შორის გამოვყოთ ერთი – ის, რომლის მიმართაც ელექტრული მუხტები უძრავია. ცდა გვიჩვენებს, რომ ასეთი სისტემის მიმართ მხოლოდ ელექტროსტატიკური ველი არსებობს. ეს არის სწორედ უმარტივესი შემთხვევა და მისი შესწავლის მეთოდიკა კარგადაა დამუშავებული. ცხადია, მას არ შევეხებით, მაგრამ დავუმატოთ ის არსებითი, რომლის გარეშეც ზოგად შემთხვევაზე ვერ გადავალთ.

ელექტრული ველის დაძაბულობა ელექტროსტატიკის ფარგლებში განისაზღვრება და ღიად რჩება ნებისმიერი ელექტრული ველისა და მუხტის ნებისმიერი სიჩქარის ზოგადი შემთხვევა. მიზეზი გასაგებია: განზოგადება მოითხოვს მუხტის ინვარიანტობის განხილვას, რომელიც სასკოლო პროგრამაში არ შედის. კურსის ჩვენეული აგებისათვის კი ზოგად შემთხვევაზე გადასვლა აუცილებელია. მივმართოთ ცდას. ელექტრონსხივურ მილაკში ელექტრონების კონის გადახრა ელექტრული ველის მოქმედებით ხორციელდება. კონას სხვადასხვა სიჩქარე შეიძლება ჰქონდეს, ელექტრული ველის მოქმედება კი არ არის დამოკიდებული კონის სიჩქარეზე. ასევეა ამჩქარებლებშიც. მაშასადამე, ცდა გვიჩვენებს, რომ ნებისმიერი ელექტრული ველის მხრიდან მუხტზე მოქმედი ძალა არ არის დამოკიდებული მუხტის სიჩქარეზე. სხვანაირად რომ ვთქვათ, ეს ძალა ერთნაირად მოქმედებს უძრავსა და მოძრავ მუხტზე.

ელექტრომაგნიტურ ველში მუხტზე მოქმედ იმ ძალას, რომელიც მუხტის სიჩქარეზე არ არის დამოკიდებული, ელექტრული ძალა ეწოდება.

ელექტრული ველის დაძაბულობის ზოგადი განსაზღვრება ასეთია:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{q}. \qquad (7.1)$$

$\mathbf{F}_e$ ელექტრული ძალაა, q – წერტილოვანი მუხტი.

ელექტრული ველის დაძაბულობა რიცხობრივად ტოლია დადებით ერთეულ წერტილოვან მუხტზე მოქმედი ე ლ ე ქ ტ რ უ ლ ი ძალისა.

(7.1) თავისი არსით რელატივისტური ფორმულაა – ნებისმიერი სიჩქარისათვისაა მართებული და მუხტის ინვარიანტობას ასახავს.

2. მ ა გ ნ ი ტ უ რ ი ვ ე ლ ი. ცალკე მაგნიტური ველის შესწავლისათვის კვლავ უმარტივესი შემთხვევა უნდა განვიხილოთ, როდესაც იგი დროის მიხედვით არ იცვლება, ანუ სტაციონარულია. ასეთ მაგნიტურ ველს მხოლოდ მოძრავი მუხტი წარმოშობს. უმარტივესი შემთხვევაა მუხტის თანაბარწრფივი მოძრაობა, მაგრამ მოძრავი მუხტი ელექტრულ ველსაც ქმნის. ამიტომ ისეთი წყარო უნდა შევარჩიოთ, რომ ელექტრულად ნეიტრალური იყოს, რათა ელექტრული ველი არ შექმნას, ხოლო მუხტები თანაბარწრფივად მოძრაობდეს. ასეთია სადენი, რომელშიც მუდმივი, დროში უცვლელი, დენი გადის. გამტარი ელექტრულად ნეიტრალურია და მუდმივი დენი თავის გარშემო სივრცეში მხოლოდ სტაციონარულ მაგნიტურ ველს წარმოშობს. გარდა ამისა, სტაციონარულ მაგნიტურ ველს ზოგიერთი დამაგნიტებული სხეულიც, ანუ მუდმივი მაგნიტიც, ქმნის. რატომ? ატომებში მოძრავი ელექტრონები პატარა წრიულ დენებს ადგენს. გარკვეულ პირობებში ზოგიერთ ნივთიერებაში ამ წრიული დენების მაგნიტური ველები ისე იკრიბება, რომ მუდმივ მაგნიტს ვიღებთ (ატომთა ელექტრონეიტრალობის გამო ელექტრული ველი არა გვაქვს).

ინერციული ათვლის სისტემა ისე ავარჩიოთ, რომ გამტარი, რომელშიც მუდმივი დენი გადის, ან მუდმივი მაგნიტი, უძრავი იყოს. ისინი ასეთი სისტემის მიმართ მხოლოდ სტაციონარულ მაგნიტურ ველს ქმნის. როგორ განვსაზღვროთ ველის მახასიათებელი ფიზიკური სიდიდე? უმეტესად სახელმძღვანელოებში გამოყენებულია მაგნიტური ველის მოქმედება დენიან კონტურზე და მაგნიტურ ისარზე. ალბათ, ამას დემონსტრაციის სიიოლეც უწყობს ხელს. ეს შესწავლის ფენომენოლოგიური (აღწერითი) დონეა, როდესაც დაფარულია ნივთიერების აგებულება და პირველადი ფიზიკური არსი. ასეთი მეთოდიკა ჩვენი მიზნებისათვის მიუღებელია.

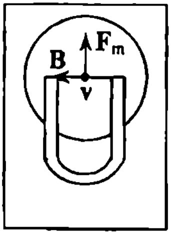
გამოვიყენოთ ელექტრომაგნიტური ველის თვისება (არსებითი ნიშანი), რომ იგი მოქმედებს უძრავსა და მოძრავ მუხტებზე. ცდა გვიჩვენებს, რომ მაგნიტური ველი მხოლოდ მოძრავ მუხტზე მოქმედებს. ამრიგად, განსხვავებით ელექტრული ველისაგან, მაგნიტური ველის მხრიდან მუხტზე მოქმედი ძალა დამოკიდებულია მუხტის სიჩქარეზე – არ მოქმედებს უძრავ მუხტზე.

ელექტრომაგნიტურ ველში მუხტზე მოქმედ იმ ძალას, რომელიც მუხტის სიჩქარეზეა დამოკიდებული, მაგნიტური ძალა ეწოდება.

დავაკვირდეთ სასინჯი მუხტის მოძრაობას მაგნიტურ ველში და გავარკვიოთ, როგორ არის დამოკიდებული მაგნიტური ძალა მუხტის სიჩქა-

რეზე. სადემონსტრაციო ცდის ჩატარება ძნელი არ არის. საჭიროა ოსცილოგრაფი და მუდმივი მაგნიტი. დავაფოკუსიროთ მნათი წერტილი ეკრანის ცენტრში. ამ მნათ წერტილს ეკრანზე დაცემული ელექტრონების კონა გვაძლევს. ასე რომ, მნათი წერტილის უშუალო მახლობლობაში გვაქვს ჩვენკენ მოძრავი სასინჯი მუხტები – უარყოფითი ელექტრონები. ნახ. 7.1-ზე მათი **v** სიჩქარის მიმართულება შავი წერტილით არის აღნიშნული. ცდის ჩასატარებლად წარმოდგენა უნდა გვქონდეს მაგნიტის ველის მიმართულებაზე.

სწორი მაგნიტი მჭიდროდ მივუახლოოთ მნათ წერტილს ისე, რომ ეკრანის მართობი იყოს (ნებისმიერი პოლუსით). ვნახავთ, რომ მნათი წერტილი არ გადაიხრება. მაშასადამე, როდესაც მაგნიტური ველის მიმართულება პარალელურია მუხტის სიჩქარისა, მაგნიტური ველი მოძრავ მუხტზე არ მოქმედებს: მაგნიტური ძალა $F_m = 0$, თუ სიჩქარისა და მაგნიტური ველის მიმართულებათა შორის კუთხე $\alpha = 0$. ეს შედეგი გვაფიქრებინებს, რომ მაგნიტური ძალის მნიშვნელობა დამოკიდებულია α კუთხეზე. ახლა ნალისებური მაგნიტი ისე მივადგათ ეკრანს, როგორც ნახ. 7.1-ზე არის ნაჩვენები: $\alpha = 90^0$ – კუთხის მნიშვნელობა მაქსიმალურია. მნათი წერტილი გადაიხრება როგორც სიჩქარის, ასევე მაგნიტური ველის მიმართულების პერპენდიკულარულად. ეს მანიტური ძალის განსაკუთრებული თვისებაა, რომელიც მას სხვა ძალებისაგან გამოარჩევს. კუთხის უდიდეს მნიშვნელობას მაგნიტური ძალის უდიდესი მნიშვნელობა შეესატყვისება. ნათელია, სადემონსტრაციო ცდებიდან ვერ დავადგენთ ამ მნიშვნელობის დამოკიდებულებას მუხტსა და სიჩქარის მოდულზე. უნდა მოვიშველიოთ ჩვეული გამოთქმა: ცდა იძლევა, რომ



ნახ. 7.1.

$$(F_m)_{\text{მაქს}} \propto qv. \tag{7.2}$$

მაგნიტური ძალის მაქსიმალური მნიშვნელობა პროპორციულია მუხტისა და სიჩქარის ნამრავლისა. ასეთი დამოკიდებულება საშუალებას გვაძლევს შემოვიღოთ მაგნიტური ველის მახასიათებელი ფიზიკური სიდიდე. მართლაც, $(F_m)_{\text{მაქს}}/qv$ ფარდობა არ არის დამოკიდებული არც მუხტზე და არც მის სიჩქარეზე, დამოკიდებულია მხოლოდ მაგნიტური ველის თვისებებზე. ამ ფარდობას, ანუ (7.2) დამოკიდებულების პროპორციულობის კოეფიციენტს, მაგნიტური ველის ინდუქცია ეწოდება.

$$B = \frac{(F_m)_{მაქს}}{|q|v}. \qquad (\alpha = 90°) \qquad (7.2')$$

(7.2′) მაგნიტური ინდუქციის B მოდულს განსაზღვრავს. მიმართულების გარკვევა მარცხენა ხელის წესით შეიძლება. ოთხი თითი დადებითი მუხტის მოძრაობის მხარეს (ნახ. 7.1-ზე – ეკრანისაკენ) მივმართოთ ისე, რომ გაშლილი ცერი მაგნიტური ძალის მიმართულებას გვიჩვენებდეს, მაშინ $\mathbf{B}$ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი ხელის გულს მართობად განჭოლავს.

მაგნიტური ინდუქციის მოდული რიცხობრივად ტოლია მაგნიტური ძალისა, რომელიც ველის მართობად 1 მ/წმ სიჩქარით მოძრავ 1 კულონ მუხტზე მოქმედებს.

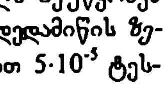
SI-ში მაგნიტური ინდუქციის ერთეულია ტესლა. *ტესლა ისეთი მაგნიტური ველის ინდუქციაა, რომელიც ველის მართობად 1 მ/წმ სიჩქარით მოძრავ 1 კულონ მუხტზე 1 ნიუტონი ძალით მოქმედებს.*

* * *

ელექტრული ველისაგან განსხვავებით, მაგნიტური ველის მახასიათებელს დაძაბულობის ნაცვლად ინდუქცია ეწოდება, რაც ისტორიული მიზეზებითაა გამოწვეული. ეს „არეული“ ტერმინები სამეცნიერო ლიტერატურაში იშვიათად გამოიყენება. არაფერი დაშავდება, თუ სასწავლო ლიტერატურაშიც ასე მოვიქცევით: ხშირად $\mathbf{E}$-ს უბრალოდ ელექტრულ ველს ვუწოდებთ, ხოლო $\mathbf{B}$-ს – მაგნიტურ ველს.

* * *

ელექტრული და მაგნიტური ველების ერთეულების გაცნობისას საჭიროა ისეთი მაგალითების დასახელება, რომლებიც ხელს შეუწყობენ ფიზიკური სიდიდის რიგის „შეგრძნების“ გამომუშავებას. დედამიწის *ზედაპირის მახლობლად* მისი მაგნიტური ველი დაახლოებით $5\cdot10^{-5}$ ტესლაა, ელექტრული ველის რიგია 10^2 ვ/მ. ლაბორატორიის პირობებში რეკორდულია 10^8 ვ/მ ელექტრული და 10^3 ტლ მაგნიტური ველები.



ნახ. 7.2.

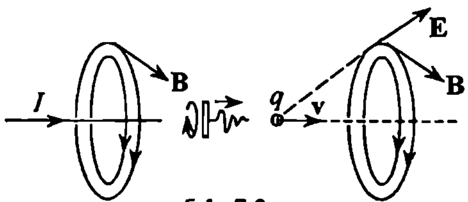
დავწეროთ მაგნიტური ძალის გამოსახულება α ნებისმიერი კუთხისათვის. სიჩქარე ორ, მაგნიტური ველის პარალელურ და პერპენდიკულარულ, მდგენელად დავშალოთ (ნახ. 7.2). $\mathbf{v}_\parallel$ მდგენელზე მაგნიტური ველი არ მოქმედებს, ამიტომ ძალის გამოსახულებაში მხოლოდ $\mathbf{v}_\perp$ მდგენელი შევა. მისი მოდული $v_\perp = v\sin\alpha$. საბოლოოდ

$$F_m = |q|vB|\sin\alpha|. \qquad (7.3)$$

(7.3) მოდულებისათვისაა დაწერილი. მასში სამი ვექტორი შედის. უნდა

გვახსოვდეს მაგნიტური ძალის განსაკუთრებული თვისება: იგი ყოველთვის მართობია მუხტის სიჩქარისა და მაგნიტური ველის მიმართულებისა, ანუ მართობია **v** და **B** ვექტორებზე გავლებული სიბრტყისა. (7.3), მსგავსად (7.1)-ისა, *ნებისმიერი* ველისა და სიჩქარისათვისაა მართებული.

სახელმძღვანელოებში მოყვანილია სხვადასხვა სურათი სტაციონარული მაგნიტური ველისა, რომლის წყაროა მუდმივი დენი ან მაგნიტი. ჩვენ შემთხვევაში საჭიროა მათ დაემატოს თანაბარწრფივად მოძრავი წერტილოვანი მუხტის ველის სურათი. მისი გარკვევა შეიძლება სწორი დენის მაგნიტურ ველთან ანალოგიით, რაც ნახ. 7.3-ზეა ილუსტრირებული.



ნახ. 7.3.

თანაბარწრფივად მოძრავი წერტილოვანი მუხტის მაგნიტური ველი სიჩქარის მართობ სიბრტყეში მდებარეობს და იგი *არ ქმნის მაგნიტურ ველს მოძრაობის წრფეზე*. ელექტრული ველი დროის ყოველ მომენტში მიმართულია მუხტისა და მოცემული წერტილის შემაერთებელი წრფის გასწვრივ. $v << c$ მცირე სიჩქარეებისათვის ელექტრული ველი მიახლოებით კულონის კანონის მიხედვით შეიძლება გამოვთვალოთ.

3. ე ლ ე ქ ტ რ ო მ ა გ ნ ი ტ უ რ ი ვ ე ლ ი ს ფ ი ზ ი კ უ რ ი რ ე ა ლ ო ბ ა. ახლა ნებისმიერი სახის ელექტრომაგნიტური ველი განვიხილოთ. ცდა ადასტურებს, რომ ელექტრომაგნიტურ ველში მოძრავ მუხტზე მოქმედი ძალა ორი შესაკრებისაგან შედგება: ერთია ელექტრული ძალა, რომელიც მუხტის სიჩქარეზე არ არის დამოკიდებული, მეორე – მაგნიტური ძალა, რომელიც მუხტის სიჩქარეზეა დამოკიდებული:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m . \qquad (7.4)$$

ელექტრული და მაგნიტური ძალები შესაბამისად (7.1) და (7.3) ფორმულებით განისაზღვრება. როგორ გამოვყოთ ცალ-ცალკე სრული ძალიდან მისი მდგენელები? უძრავ მუხტზე მოქმედი ძალის გაზომვა $\mathbf{F}_e$ ელექტრულ ძალას მოგვცემს, ხოლო მოძრავზე მოქმედის – $\mathbf{F}$ სრულ ძალას. მაგნიტური ძალა მათი სხვაობის ტოლია: $\mathbf{F}_m = \mathbf{F} - \mathbf{F}_e$. სირთულის გამო საშუალო სკოლაში მიზანშეუწონელია ვექტორული ნამრავლის გამოყე-

ნება. მაგრამ ჩაწერის ერთიანობისათვის გამონაკლისი დავუშვათ. (7.4)-ს წერტილოვანი მუხტისათვის ასეთი სახე აქვს:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{vB}] \tag{7.5}$$

(7.5)-ს ლორენცის ძალა ეწოდება (საშუალო სკოლის სახელმძღვანელოებში ლორენცის ძალას ხშირად მხოლოდ მაგნიტურ ნაწილს უწოდებენ, რაც არაკორექტულია). ლორენცის ძალის სადემონსტრაციო ცდა დამუშავებულია [18] ნაშრომში. ძალის გაყოფა ორ შესაკრებად, რომელთაგან ერთი სიჩქარეზე არ არის დამოკიდებული, ხოლო მეორე კი – დამოკიდებულია, რელატივისტური მოვლენაა და სრულიად უცხოა ნიუტონის ფიზიკისათვის. (7.5) სიღრმისეული თანაფარდობაა, გულდასმით ანალიზს საჭიროებს, რაც სასწავლო-მეთოდურ ლიტერატურას აშკარად აკლია.

ლორენცის ძალის გამოსახულება ფიზიკის ფუნდამენტური კანონია, ასახავს ელექტრომაგნიტური ველის ფიზიკურ რეალობას და იძლევა **E** *და* **B** *სიდიდეების განსაზღვრებას.*

როგორ წარმოვიდგინოთ ელექტრომაგნიტური ველი? იგი აბსტრაქტული რეალობაა, რომელიც უშუალოდ არ მოქმედებს გრძნობათა ორგანოებზე (გარდა სინათლისა). ფიზიკოსებს დაახლოებით ორმოცი წელი, მაქსველიდან აინშტაინამდე, დასჭირდათ, რათა განთავისუფლებულიყვნენ ელექტრომაგნიტური ველის მექანიკური, თვალსაჩინო წარმოდგენის მოთხოვნილებიდან და დამკვიდრებულიყო აზრი, რომ ელქტრომაგნიტური ველი ფიზიკური რეალობაა, პირველადი ცნებაა, რომელიც არ საჭიროებს „ახსნას“ რაღაცის მეშვეობით, სხვა არაფერზე არ დაიყვანება. ყველაზე სწორი თვალსაზრისი ველის წარმოდგენისა ყველაზე განყენებულია: უბრალოდ იგი უნდა განვიხილოთ, როგორც სივრცის კოორდინატებისა და დროის მათემატიკური ფუნქცია [19]. ასეთი აბსტრაქტული წარმოდგენის ჩამოყალიბება საშუალო სკოლაში ვერ ხერხდება. ამიტომ უნდა დავეყრდნოთ ველის წარმოდგენის დამხმარე საშუალებას ძალწირების საშუალებით. მაგრამ არ უნდა დაიფაროს, რომ ასეთი წარმოდგენა არ არის ფუნდამენტური, რათა საბოლოო მიზანი ცნობიერებაში დარჩეს.

რატომ დგება საკითხი ელექტრომაგნიტური ველის ფიზიკური რეალობის შესახებ? დროის მიხედვით უცვლელი – სტატიკური, სტაციონარული – ველების შესწავლა შეიძლება როგორც შორსქმედების, ასევე ახლოქმედების პოზიციიდან. ასეთი ველებისათვის ორივე თეორია ერთნაირ შედეგებს იძლევა და ველის თეორია გამოიყურება მხოლოდ როგორც მათემატიკურად უფრო მარჯვე. რომელი მათგანია ფიზიკურად მართებული? პასუხის გაცემისათვის აუცილებელია დროის მიხედვით

ცვლადი (არაკვაზისტაციონარული) ველების შესწავლა. ცვლადი ელექტრომაგნიტური ველის *ერთადერთ ადეკვატურ თეორიას* ახლოქმედების კონცეფცია იძლევა. ეს ამტკიცებს, რომ ელექტრომაგნიტური ველი ფიზიკური რეალობაა და არა მათემატიკურად ხელსაყრელი აღწერა. მაგრამ რას ნიშნავს ელექტრომაგნიტური ველის ფიზიკური რეალობა, ანუ, სხვანაირად, ურთიერთქმედების გადაცემა ელექტრომაგნიტური ველის მეშვეობით? ეს ძირეული საკითხი გაუშუქებელი რჩება და კითხვა – უპასუხოდ. ვნახოთ, როგორ ჩაჯდება გაკვეთილში ეს უჩვეულო თემა.

გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. ვიცით, რომ ელექტრომაგნიტურ ველში მოძრავ წერტილოვან მუხტზე მოქმედი ლორენცის ძალა ორ მდგენელს შეიცავს:

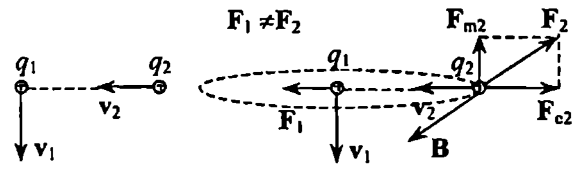
$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m, \; \mathbf{F}_e = q\mathbf{E}, \; F_m = |q|vB|\sin\alpha|. \qquad (7.6)$$

$\mathbf{F}_e$ ელექტრული ძალა არ არის დამოკიდებული მუხტის სიჩქარეზე – ერთნაირად მოქმედებს უძრავსა და მოძრავ მუხტზე, $\mathbf{F}_m$ მაგნიტური ძალა დამოკიდებულია მუხტის სიჩქარის მოდულსა და მიმართულებაზე – არ მოქმედებს უძრავ მუხტზე. ლორენცის ძალის დამოკიდებულება მუხტის სიჩქარეზე რელატივისტური მოვლენაა, მისგან გამომდინარეობს სრულიად ახალი ფუნდამენტური დასკვნა, რომელიც უცხოა შორსქმედების ფიზიკისათვის. შევეცადოთ თანამიმდევრულად მივიდეთ ამ დასკვნამდე.

განვიხილოთ ორი მოძრავი წერტილოვანი მუხტის ურთიერთქმედება *დროის იმ მომენტისათვის,* როდესაც მათი მდებარეობა ემთხვევა ნახ. 7.4-ზე მარცხნივ გამოსახულს. გარკვეულობისათვის დავუშვათ, რომ ორივე მუხტი დადებითია. q_2 მუხტი q_1 მუხტზე მხოლოდ ელექტრული ძალით მოქმედებს, ვინაიდან მუხტი მოძრაობის წრფეზე მაგნიტურ ველს არ ქმნის (შდრ. ნახ. 7.3). ამიტომ q_1-ზე მოქმედი $\mathbf{F}_1$ ლორენცის ძალა ელექტრულ ძალას ემთხვევა:

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{e1}. \qquad (7.7)$$

დროის განხილულ მომენტში $\mathbf{F}_1$ მიმართულია მუხტების შემაერთებელი



ნახ. 7.4.

წრფის გასწვრივ (ნახ. 7.4, მარჯვნივ), რადგან ასევეა მიმართული q_2-ის

მიერ შექმნილი ელექტრული ველი (შდრ. ნახ. 7.3). q_1 მუხტი q_2-ზე როგორც ელექტრული, ასევე მაგნიტური ძალით მოქმედებს. $\mathbf{F}_{e2}$ ელექტრული ძალა $\mathbf{F}_{e1}$ ელექტრული ძალის საპირისპიროდ არის მიმართული – ერთსახელა მუხტები განიზიდება (q_2-ზე მოქმედი q_1-ის ელექტრული ველი შემაერთებელი წრფის გასწვრივაა მიმართული). ვიპოვოთ $\mathbf{F}_{m2}$ მაგნიტური ძალის მიმართულება. მარჯვენა ბურღის წესის თანახმად, q_1 მუხტი q_2 მუხტის მდებარეობის ადგილზე ჩვენკენ მომართულ ნახაზის სიბრტყის მართობ მაგნიტურ ველს ქმნის (ნახ. 7.4, შდრ. ნახ. 7.3). მარცხენა ხელის წესის მიხედვით $\mathbf{F}_{m2}$ მაგნიტური ძალა მიმართულია ზევით. q_2 მუხტზე მოქმედი ლორენცის ძალა ტოლია:

$$\mathbf{F}_2 = \mathbf{F}_{e2} + \mathbf{F}_{m2}. \tag{7.8}$$

ჩვენ არ შეგვიძლია $\mathbf{F}_{e2}$ და $\mathbf{F}_{m2}$ ძალების გამოთვლა, რადგან საშუალო სკოლაში სათანადო კანონზომიერებანი არ შეისწავლება. მაგრამ დასკვნისათვის ეს არც არის აუცილებელი. ნახ. 7.4-დან თვალნათლივ ჩანს, რომ $\mathbf{F}_1$ და $\mathbf{F}_2$ ურთიერთქმედების ძალები ერთ წრფის გასწვრივ არ არის მიმართული. ეს ნიშნავს, რომ არ სრულდება ნიუტონის III კანონი – ქმედება არ უდრის უკუქმედებას (ცნობისმოყვარეობის დასაკმაყოფილებლად ვიტყვით, რომ არც მოდულებია ტოლი):

$$\mathbf{F}_1 \neq -\mathbf{F}_2. \tag{7.9}$$

აი, რა მოულოდნელი, ნიუტონის მექანიკისათვის მართლაც რომ მიუღებელი, დასკვნა მოგვცა ლორენცის ძალის დამოკიდებულებამ სიჩქარეზე. მაგრამ ეს არ არის ყველაფერი. გავაგრძელოთ ლოგიკური ანალიზი.

ნიუტონის II და III კანონების საფუძველზე მექანიკაში იმპულსის მუდმივობის კანონი გამოვიყვანეთ. თუ არ სრულდება ნიუტონის III კანონი, მაშინ არც სხეულების იმპულსთა ჯამი იქნება მუდმივი. უფრო მეტიც, როგორც გამოვარკვიეთ, ფარდობითობის პრინციპის თანახმად, ენერგიისა და იმპულსის მუდმივობის კანონები ორგანულადაა შეკავშირებული, ერთი მეორის გარეშე არ სრულდება. მაშინ არც სხეულების ენერგიათა ჯამი იქნება მუდმივი. რა მივიღეთ? ორი დამუხტული სხეული ჩაკეტილ სისტემას ადგენს და მათი იმპულსთა და ენერგიათა ჯამი არ ინახება. მაგრამ მუდმივობის კანონები ხომ ფიზიკის ფუნდამენტური, უნივერსალური კანონებია?

ახლა შეგვიძლია ჩავწვდეთ შინაარსს მტკიცებისა, რომ ურთიერთქმედება ელექტრომაგნიტური ველის საშუალებით გადაეცემა. ველის ფიზიკური რეალობა ნიშნავს, რომ მას, ისევე, როგორც ნივთიერებას,

გააჩნია ენერგია და იმპულსი, რომელიც წერტილიდან წერტილში ერთი სხეულიდან მეორეს გადაეცემა. სისტემას სხეულების (ნაწილაკების) და ველის ერთობლიობა ადგენს, ურთმანეთოდ ისინი არ არსებობს. *ჩაკეტილ სისტემაში მუდმივია სხეულების (ნაწილაკების) და ველის ენერგიათა და იმპულსთა ჯამი.* ელექტრომაგნიტური ველი ისეთივე ფიზიკური რეალობაა, როგორიც ნივთიერება. ამის ნათელი დადასტურებაა სინათლე, იგი ელექტრომაგნიტური ბუნებისაა. რასაკვირველია, ველის ენერგია და იმპულსი ცდით უნდა გამომჟღავნდეს – ეს არის მისი ფიზიკური რეალობის უშუალო დადასტურება. მაგალითის დასახელება არ გაგვიჭირდება. ტელევიზორში გამოსახულება მიიღება იმ ენერგიის გაძლიერების შედეგად, რომელიც გადამცემი ანტენიდან გამოსხივებულ ელექტრომაგნიტურ ველს, ელექტრომაგნიტურ ტალღას მოაქვს. ამის ახსნა შორსქმედების თეორიით შეუძლებელია.

ენერგიასა და იმპულსთან ერთად მუდმივია ჩაკეტილი სისტემის იმპულსთა მომენტების ჯამი, მაგრამ ეს უკანასკნელი სკოლაში არ შეისწავლება და ამიტომაც არ მოვიხსენიეთ.

კიდევ ერთი ნაბიჯი გადავდგათ წინ. განვიხილოთ ერთი ნაწილაკის იმპულსის (ენერგიის) ცვლილება დროის მოცემულ მომენტში. დავსვათ კითხვა: როდის აისახება ეს ცვლილება მეორე ნაწილაკზე? რადგან მხოლოდ ნაწილკთა იმპულსების (ენერგიების) ჯამი მუდმივი არ არის, შეუძლებელია ეს იმავე მომენტში მოხდეს (თუ არადა, ნაწილაკთა იმპულსების ჯამი მუდმივი იქნებოდა, როგორც ამას შორსქმედების კონცეფცია იძლევა). ამიტომ ველის მიერ იმპულსის (ენერგიის) გადატანა მეორე ნაწილაკზე მხოლოდ *გარკვეული დროის* შემდეგ აისახება, იგი ფიზიკური პროცესია. ასე რომ, ურთიერთქმედება ველის მეშვეობით *სასრული სიჩქარით* გადაეცემა. შემდეგში ჩვენ გავარკვევთ, რომ იგი ტოლია *ვაკუუმში სინათლის გავრცელების სიჩქარის:* $c = 3 \cdot 10^8$ მ/წმ. დავიმახსოვროთ ეს სიჩქარე, რომელიც განუყრელადაა დაკავშირებული რელატივისტურ ფიზიკასთან (იგი ნებისმიერი ურთიერთქმედების გადაცემის სიჩქარეა).

ისიც შეგვიძლია გავიგოთ, თუ $v << c$ მცირე სიჩქარეების პირობებში რატომ არის დიდი სიზუსტით მართებული ნიუტონის ფიზიკა (მაკროსკოპულ სხეულთა მოძრაობა, ფაქტობრივად, ყოველთვის აკმაყოფილებს ამ პირობას). ურთიერთქმედება იმდენად სწრაფად გადაეცემა, რომ ამის შემჩნევა პრაქტიკულად შეუძლებელია და მოვლენების შესწავლა ველის ცნების გარეშეც, შორსქმედების თეორიითაც შეიძლება. ფორმალურად შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ c=∞.

კითხვები, ამოცანები

7.1. რას ეწოდება ელექტრული ძალა? მაგნიტური ძალა? ელექტრომაგნიტურ ველში მოძრავ მუხტზე მოქმედი ლორენცის ძალიდან როგორ გამოვყოთ ელექტრული და მაგნიტური მდგენელები?

7.2. განსაზღვრეთ ელექტრული ველის დაძაბულობა და მაგნიტური ველის ინდუქცია, მათი ერთეულები.

7.3. ნახ.7.1-ზე მიუთითეთ ნალისებური მაგნიტის პოლუსები. რა მოხდება, თუ პოლუსებს ადგილს შევუნაცვლებთ? მარცხენა ხელის წესი ისე გამოთქვით, რომ მაგნიტური ძალის მიმართულებას განსაზღვრავდეს.

7.4. ნახ. 7.3-ის მიხედვით ჩამოაყალიბეთ ბურღის წესი დენისა და მოძრავი მუხტის მაგნიტური ველის მიმართულების განსასაზღვრავად.

7.5. რატომ არ სრულდება ნიუტონის III კანონი ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედებისათვის?

7.6. რას ნიშნავს ელექტრომაგნიტური ველის ფიზიკური რეალობა? როგორ ჩამოაყალიბებთ ენერგიისა და იმპულსის მუდმივობის კანონებს ჩაკეტილი სისტემისათვის?

7.7. რას უდრის ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების გავრცელების სიჩქარე? რა შემთხვევაშია მართებული ნიუტონის მექანიკა?

8. ელექტრული და მაგნიტური ველების ფარდობითობა

1. ელექტროსტატიკური და სტაციონარული მაგნიტური ველების შესასწავლად ინერციული ათვლის სისტემებიდან ერთი გამოვარჩიეთ – ის, რომლის მიმართაც ველის წყარო (მუხტი, დენიანი გამტარი, მაგნიტი) უძრავია. უსიტყვოდ იგულისხმებოდა, რომ სხვა ინერციულ ათვლის სისტემათა მიმართ ველს უფრო რთული სახე აქვს და ამიტომაც ავარიდეთ თავი მათ. ასეთი შესწავლის შესაძლებლობა, ფაქტობრივად, ელექტრული და მაგნიტური ველების ფარდობითობას ემყარება, მაგრამ ამის თაობაზე არაფერი გვითქვამს. ახლა გულდასმით გავაშუქოთ ეს თემა, რადგან იგი ახალია საშუალო სკოლისათვის. ფიზიკის საფუძვლების, როგორც ცოდნის ერთიანი სისტემის, რეალიზაციისათვის არსებითი მნიშვნელობა აქვს რელატივისტური კონცეფციის შეტანას ელექტრომაგნეტიზმის კურსში, რა თქმა უნდა, სათანადო მეთოდური დამუშავების საფუძველზე. ელექტრული და მაგნიტური ველების ფარდობითობის შესწავლა ხელს უწყობს ელექტრომაგნიტური ველის ერთიანობის გააზრებას.

ფარდობითობის პრინციპის თანახმად, (7.6) ლორენცის ძალას ერთნაირი სახე აქვს ყველა ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ. სიჩქარე ვარიანტული, ფარდობითი სიდიდეა. ამიტომ ერთი სისტემიდან მეორეზე გადასვლისას (7.6)-ის სახე უცვლელი დარჩება, თუ ძალა, ელექტრული ველი, მაგნიტური ველი, აგრეთვე, ვარიანტული, ფარდობითი სიდიდეებია (მხოლოდ q მუხტია ინვარიანტული სიდიდე). ნიუტონის მექანიკაში ძალის ინვარიანტობის დასაბუთებისას ითქვა, რომ ეს მიახლოებითი შედეგია, მართებული $v << c$ მცირე სიჩქარეებისათვის. ახლა კი ვხედავთ, რომ ლორენცის ძალის სიჩქარეზე დამოკიდებულება, რაც რელატივისტური მოვლენაა, ძალის ფარდობითობას განაპირობებს და ეს ელექტრული და მაგნიტური ველების ფარდობითობას უკავშირდება.

ელექტრული და მაგნიტური ველების ფარდობითობის შესწავლისას გარკვეულ თანაფარდობათა გამოყვანა მოგვიწევს. ცხადია, საშუალო სკოლაში ამის გაკეთება მხოლოდ მარტივ, თვალსაჩინო მაგალითებზე შეიძლება. ბუნებრივად იბადება კითხვა: შესაძლებელია მიღებული შედეგების განზოგადება? ამ კითხვას თავი არ უნდა ავარიდოთ, რამეთუ ელექტრომაგნიტური ველის თეორიას ახასიათებს არსებითი თავისებურება, რომელიც ძალზე ეფექტურია სწავლების მეთოდიკისათვის. საქმე ის არის, რომ ელექტროდინამიკაში უმრავლესი ფორმულებისა ლოკალური თანაფარდობის სახისაა. ეს ნიშნავს, რომ ასეთ თანაფარდობაში შემავალი სიდიდეები სივრცის ერთსა და იმავე წერტილს განეკუთვნება (დროის მოცემულ მომენტში). ლოკალური თანაფარდობის მაგალითია (7.6) ლორენცის ძალის გამოსახულება. *ლოკალურ თანაფარდობათა სახე სულაც არ არის დამოკიდებული ველის შემქმნელი წყაროს სახეზე.* მაგალითად, სტაციონარული ველისათვის დადგენილი (7.3) ლოკალური ფორმულა არ არის დამოკიდებული როგორი წყაროთი არის შექმნილი ველი, სად მდებარეობს ეს წყარო, ცვლადია თუ მუდმივი ველი და ა. შ. ამიტომაც იგი ზოგადია – გამოდგება ნებისმიერ შემთხვევაში. თქმულიდან გამომდინარეობს ნებისმიერი ლოკალური ფორმულის მეთოდური უპირატესობა, სარგებლობა: *კერძო, თვალსაჩინო მაგალითზე გამოყვანილი ლოკალური კავშირი ავტომატურად არის ზოგადი და ფუნდამენტური დასკვნის გამოტანის შესაძლებლობას იძლევა.* ცუდია, რომ ლოკალურ თანაფარდობათა ეს არსი ელექტრომაგნეტიზმის სწავლებაში სათანადოდ არ არის გამოყენებული. გარკვეულობისათვის აღვნიშნოთ, რომ ყველა თანაფარდობა არ არის ლოკალური, მაგალითად, უძრავი წერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობის ფორმულა: დაძაბულობა და მუხტი სხვა-

დასხვა წერტილებს განეკუთვნება. ამიტომ, თუ შევცვლით წყაროს, შეიცვლება ფორმულა.

2. გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. როგორც ადრე შევისწავლეთ, უძრავი მუხტები ელექტროსტატიკურ ველს წარმოშობს, ხოლო უძრავი გამტარი, რომელშიც მუდმივი დენი გადის, – სტაციონარულ მაგნიტურ ველს. რადგან მუდმივი დენი თანაბარწრფივად მოძრავი მუხტების ერთობლიობაა, ისიც გავარკვიეთ, რომ თანაბარწრფივად მოძრავი მუხტი ელქტრულთან ერთად მაგნიტურ ველსაც ქმნის. მაგრამ მოძრაობა ფარდობითია. გამოდის, რომ ელექტრული და მაგნიტური ველებიც ფარდობითია. მაშინ ამისათვის ყურადღება არ მიგვიქცევია, ახლა კი გულდასმით განვიხილოთ.

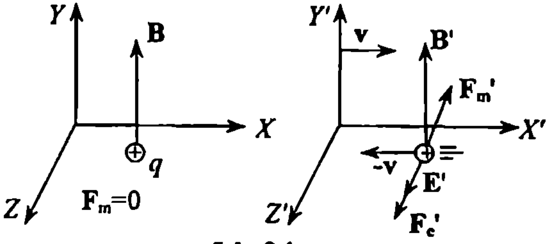
მაგიდაზე სხეული ძევს. მოძრაობს თუ უძრავია ის? ამ, ერთი შეხედვით, გულუბრყვილო კითხვაზე ადვილად ვუპასუხებთ: გააჩნია რომელი ათვლის სისტემის მიმართ. მაგალითად, ოთახის მიმართ უძრავია, მზის მიმართ მოძრაობს. ნამდვილად ღირს დაფიქრება იმაზე, რომ ეს თითქოსდა უბრალო ცოდნა – მოძრაობის ფარდობითობა – როგორი ძალისხმევით მოიპოვა კაცობრიობამ. შუა საუკუნეებში მსგავსი აზროვნება მწვალებლობად ითვლებოდა. სიცოცხლის შესანარჩუნებლად გალილეი იძულებული გახდა ინკვიზიციის სასამართლოს წინაშე უარი ეთქვა თავის მოძღვრებაზე (საგულისხმოა, რომ კათოლიკურმა ეკლესიამ მხოლოდ მე-20 საუკუნის მიწურულს მოუხსნა ოფიციალურად მწვალებლობის ბრალდება გალილეის). ახლა შევცვალოთ კითხვა. თუ სხეული დამუხტულია, როგორ ველს შექმნის იგი? აინშტაინის მიერ ფარდობითობის თეორიის შექმნის წყალობით პასუხი ცნობილია. კითხვას აზრი აქვს მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ ათვლის სისტემაზე მივუთითეთ. ოთახის მიმართ უძრავი მუხტი მხოლოდ ელექტრულ ველს ქმნის, მზის მიმართ – ელექტრულსაც და მაგნიტურსაც. ეს ელექტრული და მაგნიტური ველების ფარდობითობის გამოვლინებაა.

გავაღრმაოთ განხილვა. დავუშვათ, ლაბორატორიულ სისტემაში შექმნილია ერთგვაროვანი და მუდმივი მაგნიტური ველი. ასეთი ველი მიიღება, მაგალითად, გრძელი სოლენოიდის შიგნით, თუ მასში მუდმივი დენი გადის. როგორი ველი იარსებებს მოძრავი ინერციული სისტემის მიმართ? თვალსაჩინოებისათვის, როგორც შევთანხმდით, ასეთად შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ კოსმოსური ხომალდი, რომელიც მუდმივი სიჩქარით ჩაუქროლებს ლაბორატორიას (წარმოსახვის გარეშე ფიზიკას ვერ შევისწავლით). აინშტაინის მიხედვით, დავაზუსტოთ კითხვა. ლაბორატორიის (უძრავი) დამკვირვებელი და ასტრონავტი (მოძრავი დამკვირვე-

ბელი) *ერთსა და იმავე ადგილზე* (ვთქვათ, სოლენოიდის შიგნით) თავისი ხელსაწყოებით ატარებენ გაზომვას. რა შედეგებს მიიღებენ ისინი?

საკითხის ასეთი დასმა ზოგჯერ გულუბრყვილოდ აღიქმება: ასტრონავტი სინამდვილეში ხომ ვერ ჩაუქროლებს სოლენოიდს და ვერ ჩაატარებს გაზომვებს მის შიგნით? მაშ, რაღა საჭიროა ასეთი განხილვა? რადგან კითხვები წამოიჭრება, პასუხიც გავცეთ, რათა ფიზიკის უკეთ გაგებას შევუწყოთ ხელი. მხედველობიდან არ უნდა გამოგვრჩეს, რომ ყველა ინერციული სისტემა ტოლფასია. სოლენოიდი ლაბორატორიაშიც შეიძლება თანაბარწრფივად მოძრაობდეს – ეს კი რეალური ეკვივალენტური ექსპერიმენტია. მსგავსი ექსპერიმენტების გარეშე რელატივისტური ფიზიკა ვერ განვითარდებოდა.

ნახ. 8.1-ზე მარცხნივ ლაბორატორიული ათვლის სისტემა გამოსახულია კოორდინატთა სისტემის სახით, ხოლო ერთგვაროვანი და მუდმივი **B** მაგნიტური ველი – მხოლოდ ველის ერთი წირით, რათა ნახაზი არ



ნახ. 8.1.

გადაიტვირთოს. მარჯვნივ გამოსახულია მოძრავი ათვლის სისტემა. სიმარტივისათვის ყოველთვის დავუშვებთ, რომ სისტემათა Y, Y' და Z, Z' ღერძები შესაბამისად ერთმანეთის პარალელურია, X, X' ღერძები ერთი წრფის გასწვრივაა მიმართული და შტრიხიანი სისტემა X ღერძის დადებითი მიმართულებით მოძრაობს ნებისმიერი მუდმივი **v** სიჩქარით.

მოვათავსოთ **B** მაგნიტურ ველში უძრავი სასინჯი q დადებითი მუხტი. მასზე მაგნიტური ველი არ მოქმედებს: $\mathbf{F}_m=0$. ამის შემოწმება ლაბორატორიის დამკვირვებელს გაზომვით შეუძლია. განვიხილოთ იგივე კოსმონავტის თვალსაზრისით. მისთვის სასინჯი მუხტი X' ღერძის საპირისპიროდ, -**v** სიჩქარით თანაბარწრფივად მოძრაობს. ასეც უნდა იყოს ინერციის პრინციპის თანახმად, რადგან ლაბორატორიულ სისტემაში მუხტზე ძალა არ მოქმედებს. როგორი მაგნიტრი ველი არსებობს კოსმონავტის თვალსაზრისით, იმავე ადგილზე მისი გაზომვის მიხედვით? ეს ადვილი კითხვა არ არის, სოლენოიდიც ხომ მოძრაობს მუხტის მსგავსად. ამიტომ შემოვიფარგლოთ $v<<c$ მცირე სიჩქარეების განხილვით. გამოც-

დილება გვიჩვენებს, რომ ასეთ შემთხვევაში მოძრავი სოლენოიდი თუ მაგნიტი თითქმის ისეთსავე მაგნიტურ ველს ქმნის, როგორსაც უძრავი: $\mathbf{B} \approx \mathbf{B}'$. მართალია, ტოლობა ზუსტი არ არის, მაგრამ შემდგომი მსჯელობისათვის ამას გადამწყვეტი მნიშვნელობა არა აქვს (მთავარია, რომ $\mathbf{B}$ -ს მიმართულება არ იცვლება, რაც ასეა ნებისმიერი სიჩქარისათვის).

$\mathbf{B}'$ მაგნიტური ველი მოქმედებს მოძრავ სასინჯ მუხტზე. მარცხენა ხელის წესის მიხედვით შეამოწმეთ, რომ $\mathbf{F}_m'$ მაგნიტური ძალა Z'ღერძის საპირისპიროდ არის მიმართული (იხ. ნახ. 8.1). რა გამოდის? თუ მოძრავ სისტემაში მუხტზე მხოლოდ მაგნიტური ძალა იმოქმედებდა, იგი არ იმოძრავებდა თანაბარწრფივად და დაირღვეოდა ინერციის პრინციპი – უზოგადესი დებულება. ეს შეუძლებელია. აქედან ვასკვნით, რომ მაგნიტური ძალა აუცილებლად გაწონასწორებულია სხვა ძალით. როგორ გაჩნდა იგი? ფარდობითობის გამო კოსმოსური ხომალდის მიმართ მაგნიტურთან ერთად ელექტრული ველიც არსებობს, რომელიც ელექტრული ძალით მოქმედებს მოძრავ მუხტზე და მაგნიტურ ძალას აწონასწორებს:

$$\mathbf{F}_m' = -\mathbf{F}_e'. \tag{8.1}$$

ნახ. 8.1-დან ($\mathbf{E}' \uparrow\uparrow \mathbf{F}_e'$, რადგან $q>0$)

$$\mathbf{E}' \perp \mathbf{B}' \perp \mathbf{v}. \tag{8.2}$$

ასტრონავტი გაზომვით დარწმუნდება, რომ სოლენოიდის შიგნით მაგნიტური და ელექტრული ველები არსებობს და (8.1) ტოლობა მართებულია. თვალსაჩინო მაგალითია ელექტრული და მაგნიტური ველების ფარდობითობისა. ამ ფარდობითობით ვლინდება ელექტრომაგნიტური ველის ერთიანობა: ერთ-ერთ ინერციულ სისტემაში „წმინდა" ველიც რომ არსებობდეს, სხვა ინერციულ სისტემათა მიმართ, საზოგადოდ, ორივე – ელექტრული და მაგნიტური – ველი ერთად იარსებებს.

(8.2) მიმართულებებს აკავშირებს. მოდულების დასაკავშირებლად (8.1)-ში შევიტანოთ მნიშვნელობები (7.1) და (7.3) ფორმულებიდან:

$$E' = vB'. \tag{8.3}$$

(8.2) და (8.3) თანაფარდობა კონკრეტული მაგალითისათვის გამოვიყვანეთ. მაგრამ ვეყრდნობოდით ინერციისა და ფარდობითობის ფუნდამენტურ პრინციპებს, ელექტრომაგნიტური ველის ფიზიკურ რეალობას. ამიტომ შედეგი ზოგადია. ჩამოვაყალიბოთ განზოგადებული დასკვნა:

თუ ერთ-ერთ ინერციულ ათვლის სისტემაში „წმინდა" ველი (ელექტრული ან მაგნიტური) არსებობს, სხვა ნებისმიერ ინერციულ ათვლის სისტემაში, რომელიც ველის მართობად მოძრაობს, არსებობს როგორც ელექტრული, ასევე მაგნიტური ველი, თანაც $\mathbf{E} \perp \mathbf{B} \perp \mathbf{v}$.

შემდგომში ვნახავთ, როგორი არსებითი გზამკვლევი აღმოჩნდა ელექტრული და მაგნიტური ველების ფარდობითობა აინშტაინისათვის.

გაკვეთილი დავამთავროთ საინტერესო კითხვით, რომელსაც ფარდობითობის თეორიის შესწავლამდე ვერ ვუპასუხებთ. მაგნიტურ ველს ორივე ათვლის სისტემაში სოლენოიდში გამავალი დენი ქმნის, მაგრამ რა არის ელექტრული ველის წყარო მოძრავ ათვლის სისტემაში? პასუხის ძიება დაგვარწმუნებს, რომ ფარდობითობის თეორია განყენებული ეგზოტიკური ნაწილი კი არ არის ფიზიკისა, არამედ – ნივთიერებისა და ველის ფიზიკის გამაერთიანებელი.

3. რა თქმა უნდა, ელექტრული და მაგნიტური ველების ფარდობითობა მრავალფეროვანი თემაა. მაგრამ ერთ გაკვეთილში სხვადასხვა ასპექტის განხილვა, გაკვეთილის გადატვირთვა ან რაოდენობის გაზრდა არ ივარგებს. ამიტომ თემის შესწავლა ამოცანების სახით გავაგრძელოთ.

ამოცანა **8.1.**. ერთ-ერთ ინერციულ ათვლის სისტემაში გვაქვს ელექტრომაგნიტური ველი. თუ მოიძებნება ისეთი ინერციული ათვლის სისტემა, რომელშიც არც ელექტრული, არც მაგნიტური ველი არ იარსებებდა?

ა მ ო ხ ს ნ ა. არა, ეს ეწინააღმდეგება ელექტრომაგნიტური ველის ფიზიკურ რეალობას: მას აქვს ენერგია, რომელიც ვერ გაქრება – დაირღვეოდა ენერგიის მუდმივობის კანონი.

ამოცანა **8.2.**. გაკვეთილში მოცემულია „წმინდა“ ველის გარდაქმნის წესი ერთი ინერციულ ათვლის სისტემიდან მეორეზე გადასვლისას. ჩამოაყალიბეთ შებრუნებული გარდაქმნის წესი და შეეცადეთ გაარკვიოთ, ყოველთვის სწორია თუ არა იგი?

ა მ ო ხ ს ნ ა. თუ ერთ-ერთ ინერციულ ათვლის სისტემაში არსებობს ურთიერთმართობი ელექტრული და მაგნიტური ველები, საზოგადოდ, მოიძებნება ისეთი ინერციული ათვლის სისტემა, რომელშიც ველს „წმინდა“ სახე (ან ელექტრული, ან მაგნიტური) აქვს. მაგრამ არსებობს გამონაკლისი. დავუშვათ, $E=cB$. ამ შემთხვევაში წმინდა ველს ვერ მივიღებთ, რადგან ორივე ნულის ტოლი გახდებოდა, რაც შეუძლებელია (იხ. წინა ამოცანა). მაგალითად, ასეთია ბრტყელი ელექტრომაგნიტური ტალღა, რომელიც ვაკუუმში c სიჩქარით ვრცელდება: $\mathbf{E}\perp\mathbf{B}\perp\mathbf{c}$ და $E=cB$. ბრტყელი ტალღა ინვარიანტული წარმონაქმნია, იგი ასეთად რჩება ნებისმიერი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ.

ამოცანა **8.3.** დავუშვათ, (8.1) ნახაზზე მაგნიტური ველი მიმართულია $\mathbf{v}$ სიჩქარის (X, X' ღერძთა) გასწვრივ. როგორი ველი არსებობს მოძრავ ინერციულ ათვლის სისტემაში?

ა მ ო ხ ს ნ ა. მაგნიტურ ველს ისეთივე მიმართულება აქვს მოძრავ ათვლის სისტემაშიც. გაკვეთილის მსგავსად, ამის მიხვედრა შეიძლება მცირე სიჩქარეების შემთხვევაში. ასტრონავტის თვალსაზრისით, მაგნიტური ველი არ მოქმედებს მოძრავ მუხტზე, რადგან $\mathbf{B}'\uparrow\uparrow\mathbf{v}$. ამიტომ არც ელექტრული ველი იარსებებს, რადგან ელექტრულ ძალას ვერაფერი ვერ გააწონასწორებდა და დაირღვეოდა ინერციის პრინციპი. ეს დასკვნა არ ეწინააღმდეგება ველების ფარდობითობას და ასე განზოგადდება:

უძრავი ინერციული ათვლის სისტემიდან მოძრავზე გადასვლისას სიჩქარის პარალელური მდგენელები ელექტრული და მაგნიტური ველებისა არ გარდაიქმნება, გარდაიქმნება მხოლოს სიჩქარისადმი განივი (მართობი) მდგენელები.

კითხვები, ამოცანები

8.4. როგორ ველებს შექმნის ლაბორატორიულ ათვლის სისტემაში თავის თავის გასწვრივ თანაბარწრფივად მოძრავი სწორი მაგნიტი? მუდმივდენიანი სწორი გამტარი?

8.5. გაკვეთილში განხილულია „წმინდა“ მაგნიტური ველის გარდაქმნა, განზოგადებულ წესში კი „წმინდა“ ელექტრული ველის გარდაქმნაზეცაა საუბარი. მოიყვანეთ დამადასტურებელი მაგალითი.

8.6. შეიძლება თუ არა „წმინდა“ ელექტრული ველი „წმინდა“ მაგნიტურ ველად გარდაიქმნას ან პირიქით? დასაბუთებისათვის კონკრეტული მაგალითები გამოიყენეთ.

8.7. ყოველთვის თუ შეიძლება ისეთი ინერციული ათვლის სისტემის მოძებნა, რომლის მიმართაც ველს „წმინდა“ სახე აქვს?

9. ელექტრომაგნიტური ინდუქცია და ფარდობითობა

1. ელექტრული და მაგნიტური ველების ფარდობითობის შესწავლა ძალზე მნიშვნელოვანია რელატივისტური კონცეფციის შეტანისათვის ელექტრომაგნეტიზმის კურსში, მაგრამ ეს თვითმიზანი არ არის. აუცილებელია მისი შემდგომი საფუძვლიანი გამოყენება. შესაფერისი თემა არის ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენის ფარდობითობა. ფიზიკის ელემენტარულსა და ზოგად კურსშიც კი ეს თემა არ შეისწავლება, რადგან ისინი არ არის დაფუძნებული რელატივისტურ კონცეფციაზე. ხაზგასასმელია, რომ სასწავლო და მეთოდურ ლიტერატურაში დაკარგულია ისტორიული სინამდვილე: აინშტაინი 1905 წლის ცნობილ სტა-

ტის [9], საიდანაც იღებს დასაბამს ფარდობითობის თეორია, სწორედ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის ფარდობითობის განხილვით იწყებს, ხოლო მაიკელსონის ცდას საერთოდ არ ახსენებს. ეს პირდაპირ მიუთითებს იმაზე, რომ აინშტაინისათვის გადამწყვეტი მნიშვნელობა ჰქონდა ელექტრომაგნიტური ინდუქციის ფარდობითობის, მაქსველის განტოლებების გამოკვლევას და არა კონკრეტულ, თუნდაც ძალზე მნიშვნელოვან, ექსპერიმენტულ შედეგს. ამიტომ ფრიად მნიშვნელოვანია ამ თემის შესწავლა, რომელიც ელექტროდინამიკისა და ფარდობითობის თეორიის სიღრმისეულ კავშირს წარმოაჩენს.

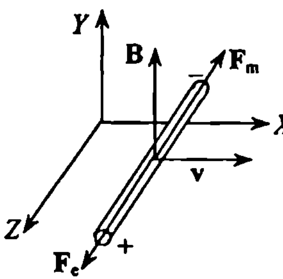
თემის „ელექტრომაგნიტური ინდუქცია" სწავლების მეთოდიკას ჩვენ არ შევეხებით, რადგან იგი სათანადოდაა დამუშავებული. ამ თემის ტრადიციული შესწავლის შემდეგ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის ფარდობითობას ვიხილავთ. ფარადეის ცდებმა აჩვენა, რომ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა განპირობებულია მაგნიტისა და გამტარი კონტურის ფარდობითი მოძრაობით – მნიშვნელობა არა აქვს მაგნიტი მოძრაობს და გამტარი უძრავია, თუ პირიქით. მაგრამ მოვლენის ახსნა, როგორც ამას ხაზს უსვამს აინშტაინი, ასიმეტრიულია: ეს ორი შემთხვევა ერთმანეთისაგან უნდა განვასხვაოთ – ერთ შემთხვევაში მოვლენა განპირობებულია მაგნიტური ველის მოქმედებით, მეორეში – ელექტრულის, ანუ დაკარგულია ფარდობითობა (ასეთი აბსოლუტური, ასიმეტრიული ახსნა რჩება სასწავლო ლიტერატურაში – დაწვრილებით გაკვეთილში). აინშტაინმა პრობლემის არსი ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენის ფარდობითობას დაუკავშირა, დაამკვიდრა აზრი, რომ ელექტრული და მაგნიტური ველები ფარდობითია და ერთსა და იმავე მოვლენას სხვადასხვა ინერციული სისტემის დამკვირვებელი განსხვავებულად ხსნის. ეს სხვათაგან – ლორენცი, პუანკარე, – გამორჩეული მიდგომა იყო, რომელიც ფარდობითობის თეორიის შექმნით დაგვირგვინდა.

2. გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. ფარადეიმ ცდებით დაამტკიცა, რომ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა დამოკიდებულია მაგნიტისა და გამტარი კონტურის ფარდობითი მოძრაობის სიჩქარეზე. ეს ნიშნავს, რომ არა აქვს მნიშვნელობა მაგნიტი მოძრაობს და კონტური უძრავია, თუ – პირიქით. როდესაც ფარდობითი სიჩქარე ორივე შემთხვევაში ერთნაირია, შეკრულ კონტურში ერთნაირი ინდუქციური დენი აღიძვრება. ვიცით, როგორ ავხსნათ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა, მაგრამ ახლა ყურადღება სხვა მხარეზე გავამახვილოთ. როდესაც კონტური მოძრაობს და მაგნიტი უძრავია, კონტურთან ერთად მოძრავ მის მუხტებზე

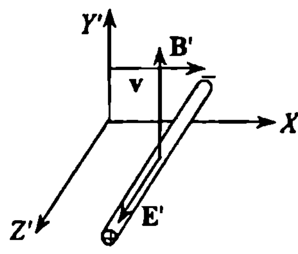
მაგნიტური ველი მოქმედებს და კონტურში ინდუქციურ დენს აღძრავს. თუ კონტური უძრავია და მაგნიტი მოძრაობს, ახსნა სხვანაირია. მაგნიტური ველი არ მოქმედებს კონტურის უძრავ მუხტებზე. მაგნიტის მოძრაობისას მის გარშემო წარმოიშობა ელექტრული ველი, რომელიც მოქმედებს უძრავ მუხტებზე და კონტურში აღძრავს ინდუქციურ დენს. გამოდის, რომ ფარდობითი მოვლენის ასახსნელად ერთმანეთისაგან ვანსხვავებთ ორ შემთხვევას, სხვადასხვანაირად ვხსნით და ამით ვკარგავთ ფარდობითობას. პირველად ასეთ შეუსაბამობას აინშტაინმა მიაქცია ყურადღება. სწორედ ამ პრობლემის განხილვით იწყება მისი 1905 წლის ცნობილი სტატია, რომლიდანაც ითვლის დაბადების თარიღს ფარდობითობის თეორია. ეს მიუთითებს ელექტრომაგნიტური ინდუქციის გამორჩეულ როლზე ფარდობითობის თეორიის ჩამოყალიბებაში.

აინშტაინმა დაასაბუთა, რომ ელექტრული და მაგნიტური ველები ფარდობითია, ამიტომ ერთსა და იმავე მოვლენას განსხვავებულად ხსნის უძრავი და მოძრავი ინერციული დამკვირვებელი. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენას ელექტრული თუ მაგნიტური ველის მოქმედება იწვევს, ამის ახსნა ინერციული ათვლის სისტემის არჩევაზე არის დამოკიდებული, ე. ი. ფარდობითია. დავრწმუნდეთ თქმულის სისწორეში.

ვთქვათ, ლაბორატორიულ სისტემაში გამტარი ღერო $\mathbf{v}$ მუდმივი სიჩქარით მოძრაობს ერთგვაროვანი და მუდმივი $\mathbf{B}$ მაგნიტური ველის მართობად და თავის თავის პარალელურად (ნახ. 9.1). ვნახოთ, როგორ



ნახ. 9.1.



ნახ. 9.2.

ხსნის ინდუქციის ემძ-ს წარმოშობას ლაბორატორიის (უძრავი) დამკვირვებელი. მისი თვალსაზრისით, მოძრავი ღეროს მუხტებზე $\mathbf{B}$ მაგნიტური ველი მოქმედებს. მარცხენა ხელის წესის თანახმად, თავისუფალ ელექტრონებზე მოქმედი $\mathbf{F}_m$ მაგნიტური ძალა მიმართულია Z ღერძის მიმართულების საპირისპიროდ (ელექტრონის მუხტი უარყოფითია). ამიტომ ჩვენგან იქითა ბოლოზე უარყოფითი მუხტები დაგროვდება ელექტრონე-

ბის სიჭარბის გამო, ხოლო აქეთაზე – დადებითი მუხტები ელექტრონების ნაკლებობის გამო. მუხტები მხოლოდ ბოლოებზე არ დაგროვდება, გამტარის მთელ ზედაპირზე გადანაწილდება. როდემდე გაგრძელდება მუხტების გადანაწილება გამტარის ზედაპირზე? გადანაწილებული მუხტი გამტარის შიგნით ელექტრულ ველს ქმნის და გადანაწილება შეწყდება (ძალზე სწრაფად), როდესაც ელექტრონებზე მოქმედი $\mathbf{F}_e$ ელექტრული ძალა მაგნიტურ ძალას გააწონასწორებს:

$$\mathbf{F}_e = -\mathbf{F}_m. \tag{9.1}$$

გამტარის ბოლოებს შორის აღძრული პოტენციალთა სხვაობა ინდუქციის ემძ-ს გვაძლევს. გამოვთვალოთ გამტარის შიგნით მუხტების გადანაწილების შედეგად შექმნილი $\mathbf{E}$ ელექტრული ველის დაძაბულობა. რადგან $\mathbf{F}_e=-e\mathbf{E}$, სადაც e არის ელემენტარული მუხტი – ელექტრონის მუხტის მოდული, $\mathbf{E}$ მიმართულია $\mathbf{F}_e$-ს, ე. ი. Z ღერძის საპირისპიროდ. მაგნიტური ძალის მოდული $F_m=evB$ (9.1)-იდან ვღებულობთ:

$$E = vB. \tag{9.2}$$

ამრიგად, ლაბორატორიის დამკვირვებლის თვალსაზრისით, გამტარში ინდუქციის ემძ-ის აღძვრის მიზეზია მაგნიტური ველის მოქმედება, გამტარის შიგნით მუხტების გადანაწილების შედეგად ელექტრული ველი წარმოიშობა.

ახლა იგივე მოვლენა ღეროსთან ერთად მოძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით ავხსნათ, ე. ი. ათვლის სისტემა ღეროს დავუკავშიროთ (ნახ. 9.1). რადგან მოძრავი სისტემის მიმართ ღერო უძრავია, $\mathbf{B}'$ მაგნიტური ველი მის მუხტებზე არ იმოქმედებს. როგორ აღიძვრება ინდუქციის ემძ? ელექტრული და მაგნიტური ველების ფარდობითობის თანახმად, მოძრავ სისტემაში $\mathbf{B}'$ მაგნიტურ ველთან ერთად $\mathbf{B}'$ და $\mathbf{v}$ ვექტორების მართობი $\mathbf{E}'$ ელექტრული ველიც არსებობს. (8.2)-ის მიხედვით $\mathbf{E}'$ მიმართულია Z ღერძის მიმართულებით, (8.3)-დან კი მისი მოდული ტოლია:

$$E' = vB'. \tag{9.3}$$

$\mathbf{E}'$ ველი თავისუფალ ელექტრონებს Z ღერძის საპირისპირო მიმართულებით გადაადგილებს: ერთ ბოლოზე უარყოფითი მუხტი დაგროვდება, მეორეზე – დადებითი. სადამდე გაგრძელდება მუხტების გადანაწილება გამტარის მთელ ზედაპირზე? როგორ გაწონასწორდება ელექტრული ძალა? მოძრავი დამკვირვებლის პასუხი ასეთია: მუხტების გადანაწილება გაგრძელდება მანამდე, სანამდე ზედაპირილი მუხტით გამტარის შიგნით აღძრული ელექტრული ველი არ გააბათილებს $\mathbf{E}'$ ველს.

ამრიგად, მოძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით, ინდუქციის ემძ-ის აღძერის მიზეზია ელექტრული ველის მოქმედება, გამტარის შიგნით მუხტების გადანაწილების შედეგად ელექტრული ველი ბათილდება.

ამ ორ თვალსაზრისს შორის, ნათელია, არავითარი წინააღმდეგობა არ არის ელექტრული და მაგნიტური ველების ფარდობითობის გამო. ვხედავთ, რომ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის ახსნა მართლაც ფარდობითია, დამოკიდებულია ინერციული ათვლის სისტემის არჩევაზე.

3. თემის სხვა მხარე ამოცანების სახით განვიხილოთ.

ამოცანა **9.1.** გამოთვალეთ მოძრავ გამტარში აღძრული ინდუქციის ემძ უძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით (ნახ. 9.1).

ა მ ო ხ ს ნ ა. ინდუქციის ემძ რიცხობრივად უდრის მოცემულ გზაზე ერთეული დადებითი მუხტის გადაადგილებისათვის საჭირო გარეშე ძალის მუშაობას. ჩვენს შემთხვევაში გამტარის l სიგრძეზე მუხტის გადაადგილებაზე მუშაობას მაგნიტური (გარეშე) ძალა ასრულებს, ამიტომ

$$|\mathcal{E}_i| = |F_{\text{მ}} l/e| = vBl. \qquad (9.4)$$

ყურადღება მივაქციოთ შემდეგს. მაგნიტური ძალა ყოველთვის მართობია მუხტის სიჩქარისა, ამის გამო მაგნიტური ველი მუშაობას არ ასრულებს. მაშინ რა გამოვთვალეთ? მუშაობის მხოლოდ დადებითი ნაწილი, რომელიც გამტარის შიგნით სრულდება. მუხტების გადანაწილების პროცესში გამტარში გადის ხანმოკლე დენი, რომელზედაც მაგნიტური ველი ამპერის ძალით მოქმედებს. ნახ. 9.1-ზე ეს დენი Z ღერძის (დადებითი მუხტის გადაადგილების) მიმართულებისაა, ამიტომ, მარცხენა ხელის წესის თანახმად, ამპერის ძალა **v** სიჩქარის საპირისპიროდ არის მიმართული და მისი მუშაობა (მექანიკური, რადგან გამტარის გადაადგილებას უკავშირდება) უარყოფითია. მაგნიტური და ამპერის ძალთა მუშაობა ერთდროულად სრულდება და მათი ჯამი ნულის ტოლია — მაგნიტური ველი მუშაობას არ ასრულებს, მუხტების ენერგიას არ ცვლის (**v** სიჩქარის მუდმივი მნიშვნელობის შესანარჩუნებლად საჭიროა ამპერის ძალის წინააღმდეგ დამატებითი მექანიკური მუშაობის შესრულება).

ამოცანა **9.2.** გამოთვალეთ გამტარში აღძრული ინდუქციის ემძ მოძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით (ნახ. 9.2).

ა მ ო ხ ს ნ ა. ამ შემთხვევაში გამტარის l სიგრძეზე მუხტის გადაადგილებისათვის მუშაობას $\mathbf{E}'$ ელექტრული ველის მხრიდან მოქმედი ელექტრული (გარეშე) ძალა ასრულებს. გავითვალისწინოთ (9.3):

$$|\mathcal{E}_i'| = |F_{\text{ე}}' l/e| = vB'l. \qquad (9.5)$$

რადგან მაკროსკოპული სხეულები $v<<c$ მცირე სიჩქარეებით მოძრაობს, დიდი სიზუსტით $B'\approx B$ და $\mathscr{E}' \approx \mathscr{E}$ – შდრ. (9.4). ამიტომაც აღმოაჩინა ფარადეიმ ცდებით, რომ, მაგნიტისა და შეკრული კონტურის ერთნაირი ფარდობითი სიჩქარით მოძრაობის შემთხვევაში, უძრავსა და მოძრავ კონტურში ერთნაირი ინდუქციური დენი აღიძვრება.

კითხვები, ამოცანები

9.3. რას ნიშნავს, რომ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა დამოკიდებულია მაგნიტისა და გამტარის ფარდობით მოძრაობაზე?

9.4. რატომ იყო ელექტრომაგნიტური ინდუქციის ფარდობითი მოვლენის ახსნა ასიმეტრიული, აბსოლუტური აინშტაინამდე?

9.5. როდემდე გაგრძელდება მუხტების გადანაწილება მოძრავ გამტარში უძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით (ნახ. 9.1)?

9.6. როდის შეწყდება მუხტების გადანაწილება გამტარში მასთან ერთად მოძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით (ნახ. 9.2)?

9.7. განმარტეთ, რას ნიშნავს ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენის ფარდობითი ახსნა. რომელი თეორია იძლევა ასეთ ახსნას?

10. სინათლის სიჩქარის ინვარიანტობა

1. სინათლის სიჩქარის ინვარიანტობას ოპტიკის ბოლოში, ფარდობითობის თეორიის დაწყების წინ შევისწავლით. თვალი გავადევნოთ, როგორ შემოგვაქვს და ვავითარებთ სინათლის სიჩქარის ცნებას (კვლავ აღვნიშნოთ, რომ „სინათლის სიჩქარე“ საყოველთაოდ დამკვიდრებული შემოკლებაა გამონათქვამისა „სინათლის გავრცელების სიჩქარე ვაკუუმში“). პირველად სინათლის სიჩქარეს მექანიკის კურსში ვახსენებთ ნიუტონის ფიზიკის მართებულობის საზღვრების მითითებისას. შემდგომ, ელექტრომაგნიტური ველის ფიზიკური რეალობის – საშუალო სკოლისათვის ამ უჩვეულო საკითხის – შესწავლისას, ვაფართოებთ ამ ცნების შინაარსს: იგი არის ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების გადაცემის, გავრცელების სიჩქარე. მომდევნო ლოგიკური ნაბიჯია ფიზიკის ერთიანობის მეთოდოლოგიური პრინციპის გამოყენება: სინათლის სიჩქარე არა მხოლოდ ელექტრომაგნიტური, არამედ ყველა სხვა ფუნდამენტურ ურთიერთქმედებათა – გრავიტაციული, ბირთვული (ძლიერი), სუსტი – გადაცემის სიჩქარეა. თუმცა ეს უშუალოდ ექსპერიმენტულად მხოლოდ

ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედებისათვის არის დამტკიცებული, ფიზიკის ფუნდამენტურობა და ერთიანობა ეჭვის საბაბს არ იძლევა.

მთელ მასალას ელექტრომაგნიტური ინდუქციიდან მოცემულ თემამდე ტრადიციული შესწავლის ფარგლებში ვტოვებთ – სათანადო სწავლების მეთოდიკა ცნობილია. სინათლის სიჩქარე შემდეგ საკითხებად განიხილება: ელექტრომაგნიტური ტალღა და მისი გავრცელების სიჩქარე, ჰერცის კლასიკური ცდები, სინათლის ელექტრომაგნიტური ბუნება, სინათლის სიჩქარის განსაზღვრის ასტრონომიული და ლაბორატორიული მეთოდები. ყველაფერი ეს ნიადაგს ამზადებს სინათლის სიჩქარის ინვარიანტობის შესასწავლად.

* * *

ორიოდე სიტყვით შევეხოთ ფრიად საინტერესო მეთოდურ პრობლემას. როგორც საბჭოთა კავშირში, ასევე უცხოეთში, ადრე, ფიზიკის ბუმის პერიოდში, იყო მცდელობა საშუალო სკოლისათვის მაქსველის განტოლებების სწავლების მეთოდიკის დამუშავებისა. ვერ ვიტყვით, რომ მცდელობა წარმატებული გამოდგა. მიზეზი შემდეგია: პრობლემის იზოლირებული გადაწყვეტა ელექტრომაგნეტიზმის კურსისათვის თვითმიზნად გამოიყურება და მარცხისთვისაა განწირული. ფიზიკის ერთიანი სასკოლო კურსი კი რელატივისტური კონცეფციის საფუძველზე არც მაშინ, არც შემდეგ არ დამუშავებულა. ჩვენეული გადაწყვეტა რეალურ პერსპექტივას ქმნის პრობლემის ახლებური გააზრებისა და დამუშავებისათვის. მიმზიდველია წარმოჩენა მაქსველის გენიალური თეორიული აღმოჩენისა, რომელმაც ელექტრობა, მაგნეტიზმი და ოპტიკა გააერთიანა: ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება ვაკუუმში განივი ტალღის სახით c სიჩქარით ვრცელდება.

* * *

სინათლის ინვარიანტობის შესწავლისას შემდეგი მეთოდური პრობლემა წამოიჭრება: რომელი თვალსაზრისით გავაშუქოთ ეს საკითხი? ელემენტარული და ზოგადი ფიზიკის კურსებისათვის, როგორც წესი, ისტორიულ გზას ირჩევენ. იყენებენ ეთერის ცნებას, მაიკელსონის ცდას „ეთერის ქარის" აღმოჩენის პრობლემას უკავშირებენ... გადაცემა ისე ვითარდება, როგორც ფიქრობდნენ ფიზიკოსები ფარდობითობის თეორიის შექმნამდე, როდესაც ჯერ კიდევ არ იყო ცნობილი ფარდობითობის პრინციპის ვარგისობა ელექტრომაგნიტური და ოპტიკური მოვლენებისათვის. ეს საკმაოდ ამძიმებს განხილვას, იკარგება სიცხადე და თანამედროვე გააზრება. მეცნიერების განვითარების გზა ტეხილია, მისი გამეორება სწავლებაში გაუმართლებელია. ამას ყველა ეთანხმება, მაგრამ

ცოტა თუ ახორციელებს. ჩვენი მიდგომა თანამედროვე თვალთახედვას ემყარება. ვინაიდან სიჩქარე ფარდობითი სიდიდეა, რომელი ინერციული სისტემის მიმართ უდრის სინათლის სიჩქარე $3\cdot10^8$ მ/წმ-ს? ეს მოსწავლეებისათის დამაინტერესებელ პრობლემურ სიტუაციას ქმნის. რაც შეეხება ეთერს, მას აღარ ვახსენებთ, რადგან ადრე, შორსქმედებისა და ახლოქმედების ანალიზისას, „ჩამოვიცილეთ გზიდან" (იხ. მ. 6.2).

გასარკვევია კიდევ ერთი, მეთოდური და ფიზიკური თვალსაზრისით მნიშვნელოვანი ასპექტი. რა თქმა უნდა, სინათლის ინვარიანტობის შესწავლა უშუალოდ უკავშირდება ფარდობითობის თეორიის მეორე პოსტულატს. სამწუხაროდ, სასწავლო-მეთოდურ ლიტერატურაში საკმაოდ ხშირად მეორე პოსტულატი არაკორექტულადაა ფორმულირებული. თვით აინშტაინმა იგი ასე ჩამოაყალიბა [9]:

სინათლის ყოველი სხივი „უძრავ" კოორდინათთა სისტემაში განსაზღვრული c სიჩქარით მოძრაობს დამოუკიდებლად იმაზე, უძრავი თუ მოძრავი სხეული გამოასხივებს მას.

ამ სიჩქარეს უძრავი დამკვირვებელი ზომავს. არაფერია ნათქვამი არც სინათლის სიჩქარის დამოუკიდებლობაზე დამკვირვებლის (მიმღების) მოძრაობაზე, არც სინათლის სიჩქარის ინვარიანტობაზე. რატომ? პასუხს ლოგიკური ჯაჭვი განაპირობებს: პოსტულატები (პირველი ფარდობითობის პრინციპია) *დამოუკიდებელი* უნდა იყოს, ერთი მეორისაგან არ უნდა გამომდინარეობდეს. პირველი პოსტულატის თანახმად, მეორე პოსტულატი მართებულია ნებისმიერ მოძრავ ინერციულ ათვლის სისტემაში. აქედან, როგორც შედეგი, მიიღება, რომ სინათლის სიჩქარე არ არის დამოკიდებული დამკვირვებლის მოძრაობაზე და ინვარიანტული სიდიდეა. განსაკუთრებით გვინდა აღვნიშნოთ, რომ ლოგიკური თვალსაზრისით ზედმეტია ექსპერიმენტული შემოწმება სინათლის სიჩქარის დამოუკიდებლობისა დამკვირვებლის მოძრაობაზე. იქნებ ეს არის გასაღები იმის გასაგებად, რომ აინშტაინმა განსაკუთრებული ყურადღება არ მიაქცია მაიკელსონის ცდას (განსხვავებით სხვებისაგან) და თავის პირველ სტატიაში [9] არც კი ახსენებს მას. ეს საინტერესო საკითხი ფიზიკის ისტორიის მკვლევრებს დავუტოვოთ [20], ჩვენთვის კი მთავარია, რომ აღნიშნული ლოგიკური სინატიფე გაუგებარი დარჩა, დაიკარგა და სასწავლო ლიტერატურა (არა მხოლოდ იგი) „შეივსო" „უფრო სრული" ფორმულირებებით. როგორც ნიმუშს, მოვიყვანთ მეორე პოსტულატის ფორმულირებას [21] სახელმძღვანელოდან:

სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში ერთნაირია ყველა ინერციულ ათვლის სისტემაში. ის არ არის დამოკიდებული არც სინათლის წყაროს, არც სინათლის მიმღების სიჩქარეზე.

ამ ფორმულირებაში ერთმანეთშია არეული პოსტულატი და შედეგი. ასეთი რამ გამონაკლისი არ არის და არასასურველად ხშირად გვხვდება, რაც „ავტორთა“ სასარგებლოდ არ მეტყველებს. ზედაპირული მიდგომა სულაც არ უწყობს ხელს ფარდობითობის თეორიის საფუძვლიან გაგებას, დამოუკიდებელი ლოგიკური აზროვნების განვითარებას.

როგორი სახით ჩამოვაყალიბოთ მეორე პოსტულატი? ჩვენი გამოცდილებით ოპტიმალურია შემდეგი ფორმულირება:

სინათლის სიჩქარე არ არის დამოკიდებული სინათლის წყაროს მოძრაობაზე.

შემდეგ გამოკვეთილად უნდა ითქვას, რომ ორივე პოსტულატიდან, როგორც ლოგიკური შედეგი, გამომდინარეობს სინათლის სიჩქარის მნიშვნელობის, მოდულის – და არა მიმართულების – დამოუკიდებლობა დამკვირვებლის (მიმღების) მოძრაობაზე, მისი ინვარიანტობა (შეიძლება სინათლის აბერაციის ხსენება). ორივე პოსტულატის დამტკიცების ერთადერთი გზა არსებობს: ექსპერიმენტული შედეგების განზოგადება.

გაკვეთილის გადაცემის წინ ხაზი გავუსვათ წინამდებარე კურსის თავისებურებას: ფარდობითობის თეორიის ორივე პოსტულეტის შესწავლა, როგორც ზოგადფიზიკური დებულებებისა, ფარდობითობის თეორიის დაწყებამდე, მთელი კურსის მანძილზე, თანამიმდევრულად ხორციელდება რელატივისტურ წარმოდგენათა საფუძველზე, რაც მყარ ნიადაგს ამზადებს ფარდობითობის თეორიის გააზრებისათვის, „საღ აზრთან“ კონფლიქტის გათვითცნობიერებისათვის, ფიზიკის ერთიანობის აღქმისათვის.

2. გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. მოკლედ შევაჯამოთ, რა ვიცით სინათლის სიჩქარის თაობაზე. ეს საყოველთაოდ მიღებული მოკლე ტერმინი პირდაპირი მნიშვნელობით აღნიშნავს სინათლის, ელექტრომაგნიტური ტალღის გავრცელების სიჩქარეს *ვაკუუმში*, ანუ ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების გადაცემის სიჩქარეს. არაერთხელ გავუსვით ხაზი, რომ ფიზიკა ერთიანი ფუნდამენტური მეცნიერებაა, რომელიც ბუნების მთლიანობას ასახავს. გამომდინარე აქედან, სინათლის სიჩქარე არის არა მხოლოდ ელექტრომაგნიტური, არამედ ყველა სხვა ფუნდამენტურ ურთიერთქმედებათა – გრავიტაციული, ბირთვული (ძლიერი), სუსტი – გადაცემის, გავრცელების სიჩქარე. ჯერჯერობით უშუალოდ ექსპერიმენტულად ეს მხოლოდ ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედებისათვის არის დამტკი-

ცებული, მაგრამ ფიზიკოსებს განზოგადების მართებულობაში ეჭვი არ ეპარებათ. იმაზეც გვაქვს წარმოდგენა, რომ ნიუტონის (შორსქმედების) ფიზიკა სწორია მხოლოდ $v<<c$ მცირე სიჩქარეების პირობებში. ჩამონათვალი საკმაოდ შთამბეჭდავია, მაგრამ ერთ რთულ და საინტერესო კითხვას აქამდე დუმილით ვუვლიდით გვერდს. დადგა დრო მისი ღასმისა:

სინათლის სიჩქარის მნიშვნელობა $c=3\cdot10^8$ მ/წმ უნივერსალური მუდმივაა, მაგრამ სიჩქარე ფარდობითი სიდიდეა და რომელი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ არის განსაზღვრული მისი მნიშვნელობა?

ასეთი თითქოსდა ბუნებრივი კითხვა მაქსველის თეორიამ წამოჭრა ელექტრომაგნიტური და ოპტიკური მოვლენებისათვის გალილეის ფარდობითობის პრინციპის ვარგისობის ურთულეს პრობლემასთან ერთიანობაში. ძიებამ ფარდობითობის თეორიის შექმნა განაპირობა.

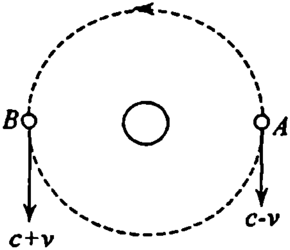
კითხვის შინაარსი განმარტებას მოითხოვს. სინათლეს წყარო ასხივებს, მიმღები იღებს (მაგალითად, თვალი). დამოკიდებულია თუ არა სინათლის სიჩქარე წყაროსა და მიმღების მოძრაობაზე, სიჩქარეზე? აი, ამ კითხვაზე უნდა ვუპასუხოთ. პასუხის გაცემა მხოლოდ ექსპერიმენტს შეუძლია – ის არის ჭეშმარიტების კრიტერიუმი.

შესადარებლად ბგერის გავრცელება განვიხილოთ. უძრავ ჰაერში ბგერის გავრცელების სიჩქარე მხოლოდ ჰაერის თვისებებით განისაზღვრება და ერთნაირია ყველა მიმართულებით. როდესაც ბგერის წყარო ან მიმღები (ვთქვათ, ყური) ჰაერის მიმართ მოძრაობს, ბგერის სიჩქარე *მათ მიმართ* სიჩქარეთა შეკრების წესის მიხედვით გამოითვლება: ტოლია ჰაერის მიმართ წყაროსა ან მიმღების მოძრაობის სიჩქარისა და უძრავ ჰაერში ბგერის გავრცელების სიჩქარის ვექტორული ჯამისა. ეს ჯამური სიჩქარე კი დამოკიდებულია მიმართულებაზე: მაგალითად, ჰაერის ნაკადის მიმართულებით, საპირისპიროდ და განივად სხვადასხვაა. სინათლის გავრცელების შემთხვევაში მდგომარეობა არსებითად იცვლება. სინათლის გავრცელებისათვის, განსხვავებით ბგერისაგან, არ არის აუცილებელი გარემო – ის ვაკუუმშიც ვრცელდება. ცდა გასაოცარ შედეგს იძლევა: სინათლის სიჩქარე არ არის დამოკიდებული არც წყაროსა და არც მიმღების მოძრაობაზე, სიჩქარეზე.

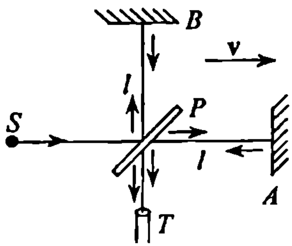
სინათლის სიჩქარე უნიკალურია, უნივერსალური მუდმივაა და არსებითად განსხვავდება ყველა სხვა სიჩქარისაგან, რამეთუ იგი ფუნდამენტურ ურთიერთქმედებათა გადაცემის სიჩქარეა.

განვიხილოთ ისტორიული დაკვირვებები და ექსპერიმენტი, რომელთა მეშვეობითაც პირველად იქნა მოპოვებული ასეთი ცოდნა.

სამყაროში მრავალი ორმაგი ვარსკვლავია: წყვილი ვარსკვლავებისა, რომლებიც გრავიტაციული ურთიერთმიზიდვის გამო მასათა ცენტრის გარშემო ბრუნავენ. თუ ერთ-ერთი ვარსკვლავის მასა გაცილებით აღემატება მეორისას, მაშინ პრაქტიკულად უძრავი მასიური ვარსკვლავის გარშემო მეორე წრეწირზე ბრუნავს, როგორც მთვარე დედამიწის გარშემო. ახლა დავხედოთ ნახ. 10.1-ს. სინათლის სიჩქარე დამოკიდებული რომ ყოფილიყო ვარსკვლავის – სინათლის წყაროს – v სიჩქარეზე, მაშინ B



ნახ. 10.1.



ნახ. 10.2.

წერტილიდან გამოსხივებული სინათლის სიჩქარე დედამიწის დამკვირვებლისათვის ტოლი იქნებოდა $c + v$ ჯამისა, ხოლო A წერტილიდან გამოსხივებულისა – $c - v$ სხვაობის, თანახმად სიჩქარეთა შეკრების წესისა. ორბიტის სხვა ნებისმიერი წერტილიდან გამოსხივებული სინათლის სიჩქარე დედამიწის დამკვირვებლის მიმართ პარალელოგრამის წესით განისაზღვრებოდა. გამოდის, რომ სხვადასხვა მდებარეობიდან გამოსხივებული სინათლე დამკვირვებლამდე სხვადასხვა დროს მიაღწევდა განსხვავებული სიჩქარის გამო. მართალია, $v<<c$, მაგრამ *ვარსკვლავებამდე დიდი მანძილის გამო* დროთა განსხვავება მნიშვნელოვანი იქნებოდა. ამიტომ წრეწირზე მოძრაობის ნაცვლად დამკვირვებლისათვის ვარსკვლავი საკმაოდ დახლართულად იმოძრავებდა. მაგალითად, B მდებარეობიდან წამოსული სინათლე, მეტი სიჩქარის გამო, შეიძლებოდა ერთდროულად ან უფრო ადრე მოსულიყო დამკვირვებლამდე, ვიდრე A მდებარეობიდან გამოსხივებული. მაშინ დამკვირვებელი ან ერთდროულად ორ მდებარეობას, ან საპირისპირო მიმართულებით ბრუნვას დააფიქსირებდა. ასტრონომებს არაფერი მსგავსი არ აღმოუჩენიათ, რაც დამაჯერებლად ადასტურებს, რომ სინათლის სიჩქარე დამოკიდებული არ არის წყაროს სიჩქარეზე.

როგორ შევამოწმოთ, დამოკიდებულია თუ არა სინათლის სიჩქარე დამკვირვებლის მოძრაობაზე, სიჩქარეზე? რადგან გაზომვები დედამიწაზე ტარდება, მოძრავ ინერციულ ათვლის სისტემად ლაბორატორია ავირჩი-

ოთ და გავარკვიოთ, თუ მოქმედებს დედამიწის მოძრაობა (მზის, უძრავი ვარსკვლავების მიმართ) სინათლის გავრცელების სიჩქარეზე. ცდის იდეა მაქსველს ეკუთვნის. რადგან სინათლის სიჩქარე დიდია, შეუძლებელია უშუალოდ გავზომოთ ორ წერტილს შორის მანძილის გავლის დრო, ამიტომ შევადაროთ სინათლის მიერ წინ და უკან გარკვეული მანძილის, ე. ი. შეკრული გზის გავლის დრო დედამიწის სიჩქარის გასწვრივ და, ვთქვათ, მართობი მიმართულებით. ეს იდეა ექსპერიმენტულად განახორციელა მაიკელსონმა 1881 წელს. მან ააგო დიდი სიზუსტის ხელსაწყო, რომელსაც მაიკელსონის ინტერფერომეტრი ეწოდა. მაიკელსონის ცდამ განსაკუთრებული როლი შეასრულა ფიზიკის განვითარებაში. ცდის სქემა გამოსახულია ნახ. 10.2-ზე.

სინათლის S წყაროდან გამოსხივებული კონა P ნახევარგამჭვირვალე ფირფიტაზე დაცემისას ორად იყოფა. ერთი ნაწილი ფირფიტაში გადის, აირეკლება A ბრტყელი სარკიდან, უკან ბრუნდება და P ფირფიტიდან არეკვლის შემდეგ T ჭოგრში ხვდება. მეორე ნაწილი P ფირფიტიდან დაცემის მიმართულებისადმი მართობად აირეკლება, ეცემა B ბრტყელ სარკეს, აირეკლება, გადის P ფირფიტაში და T ჭოგრში ხვდება. ერთი კონის ორი განაყოფის ზედდებისას ჭოგრში ინტერფერენციული სურათი მიიღება (ინტერფერენციული სურათის მაგალითია საპნის ბუშტისა თუ წყლის ზედაპირზე განლვრილი ნავთის ფერადოვანი ელვარება). დავუშვათ, ხელსაწყო დედამიწის $\mathbf{v}$ სიჩქარის მიმართ ისეა ორიენტირებული, როგორც ნახ. 10.2-ზეა გამოსახული. *თუ სინათლის სიჩქარე დამოკიდებულია დედამიწის მოძრაობაზე*, მაშინ გამოთვლის გარეშეც ცხადია, რომ ორი კონა ინტერფერომეტრის l ტოლი სიგრძის მხრების წინ და უკან გავლას განსხვავებულ დროს მოანდომებს, რამეთუ სინათლისა და დედამიწის სიჩქარეები სხვადასხვანაირად იკრიბება გასწვრივი და მართობი მიმართულებით. შემოვაბრუნოთ ინტერფერომეტრი 90°-ით. კონები ერთმანეთს ადგილს გაუცვლის: პირველი კონა დედამიწის სიჩქარის მართობად გავრცელდება, მეორე – გასწვრივ. დროთა სხვაობა, ნათელია, ნიშანს შეიცვლის. ინტერფერენციული სურათი დროთა სხვაობაზეა დამოკიდებული, ამიტომ შემობრუნების შედეგად სურათი უნდა შეიცვალოს. ცდებმა ინტერფერენციული სურათის არავითარი ცვლილება არ აჩვენა. ეს ნიშნავს, რომ ორივე მხარის გავლის დრო ერთნაირია, ანუ დროთა სხვაობა ნულის ტოლია და ამიტომ შემობრუნება არაფერს არ ცვლის. მაშასადამე, სინათლის სიჩქარე არ არის დამოკიდებული დედამიწის, დამკვირვებლის მოძრაობაზე.

რა თქმა უნდა, მეცნიერება ვერ დაკმაყოფილდება ორი, თუნდაც გადამწყვეტი, ექსპერიმენტით. სათანადო ცდები მრავალჯერ ჩატარდა და შედეგი ყოველთვის ერთი და იგივე იყო.

აინშტაინმა ფარდობითობის თეორია ორ პოსტულატზე, პრინციპზე დაამყარა. პირველი ფარდობითობის პრინციპია, რომელიც საფუძვლიანად შევისწავლეთ, როგორც ზოგადფიზიკური ფუნდამენტური დებულება. მეორე ახლა ჩამოვაყალიბოთ შემდეგნაირად:

სინათლის სიჩქარე არ არის დამოკიდებული სინათლის წყაროს მოძრაობაზე, სიჩქარეზე.

ორივე პოსტულატი ექსპერიმენტული შედეგების განზოგადებაა.

დავუკვირდეთ, რა შეიძლება ითქვას სინათლის სიჩქარეზე, გამომდინარე ორივე პოსპულატიდან. პირველის თანახმად, მეორე პოსტულატი მართებულია ყველა ინერციულ ათვლის სისტემაში. როდესაც დამკვირვებელი (მიმღები) მოძრაობს, მასთან დაკავშირებულ ინერციულ ათვლის სისტემაში გაზომილი სინათლის სიჩქარე კვლავ c-ს ტოლია: თანახმად მეორე პოსტულატისა, წყაროს მოძრაობას მნიშვნელობა არა აქვს. მაშასადამე, სინათლის სიჩქარის მნიშვნელობა (და არა მიმართულება) არ არის დამოკიდებული დამკვირვებლის მოძრაობაზე და ერთნაირია ყველა ინერციულ ათვლის სისტემაში. *სინათლის სიჩქარის მნიშვნელობა ინვარიანტული სიდიდეა და ეს ორივე პოსტულატის ლოგიკური შედეგია.* არ არსებობს ისეთი ინერციული ათვლის სისტემა, რომელშიც სინათლე უძრავი იყოს ან c-ზე მეტი სიჩქარით მოძრაობდეს. სინათლის სიჩქარის ამ უნიკალურობას ის განაპირობებს, რომ იგი ფუნდამენტურ ურთიერთქმედებათა გადაცემის სიჩქარეა. თავისი არსით, სინათლის სიჩქარე *ზღვრული სიჩქარეა*: არც ერთ სხეულს, ნაწილაკს არ შეუძლია მეტი სიჩქარით მოძრაობა, რადგან მისი მეშვეობით ურთიერთქმედება c-ზე მეტი სიჩქარით გადაეცემოდა.

სინათლის სიჩქარის ინვარიანტობა აშკარად ეწინააღმდეგება სიჩქარეთა შეკრების წესს. ამიტომ, ერთი შეხედვით, I და II პოსტულატები შეუთავსებელია. აინშტაინის უდიდესი დამსახურებაა, რომ მან გაარკვია, რატომ გვღალატობს „საღი აზრი“, რა უნდა გადავიაზროთ ხელახლა.

კითხვები, ამოცანები

10.1. მძლავრი ლაზერის სხივი მთვარეზე ათინათს იძლევა. შეაფასეთ ათინათის წრფივი სიჩქარე, თუ ლაზერი $\omega = 1$ წმ$^{-1}$ კუთხური სიჩქარით შემობრუნდება.

10.2. ზოგიერთი თანამედროვე ოსცილოგრაფის ინსტრუქციაში ნათქვამია, რომ სხივის სიჩქარე ეკრანზე სინათლის სიჩქარეს აღემატება. ეწინააღმდეგება თუ არა ეს ფარდობითობის თეორიას?

10.3. შეაფასეთ მთვარის სიჩქარე ბზრიალას მიმართ.

10.4. ბიოგრაფების გადმოცემით, ბავშვობაში აინშტაინი თავს იმტვრევდა ამოცანაზე: ადამიანს სახის წინ უკავია სარკე და გარბის სინათლის სიჩქარით. თუ დაინახავს იგი თავის გამოსახულებას?

10.5. სარწყავი მანქანა, მოძრაობს რა v_s სიჩქარით, ტყორცნის წყლის ნაკადს თავის მიმართ v' სიჩქარით. რას უდრის ნაკადის სიჩქარე დედამიწის მიმართ? თუ მანქანა ფარებს ჩართავს, რას ედრება სინათლის სიჩქარე მანქანის მიმართ? დედამიწის მიმართ?

10.6. არცთუ იშვიათად ფარდობითობის თეორიის მეორე პოსტულატს ასე აყალიბებენ: სინათლის სიჩქარის მნიშვნელობა ერთნაირია ყველა ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ ანუ ინვარიანტული სიდიდე არის. კორექტულია ასეთი ფორმულირება?

10.7. დაასახელეთ რაიმე უბრალო მაგალითი იმისა, რომ სინათლის გავრცელების სიჩქარის მიმართულება ერთნაირი არ არის უძრავ და მოძრავ ათვლის სისტემათა მიმართ.

10.8. ნახ. 10.1-ის მიხედვით შეაფასეთ, როგორი იქნებოდა A და B მდგომარეობებიდან გამოსხივებული სინათლის დედამიწამდე მიღწევის დროთა სხვაობა, თუ დედამიწამდე მანძილი $r=3\cdot10^{16}$ მ, ხოლო ვარსკვლავის მიმოქცევის სიჩქარე $v=5\cdot10^{-5}c$.

10.9. რა კუთხით არის დახრილი ფირფიტა ნახ. 10.2-ზე?

10.10. მაიკელსონის ინტერფერომეტრის სიზუსტის გასარკვევად შეაფასეთ ჭოგრში კონათა შეხვედრის დროთა სავარაუდო სხვაობა, თუ $l=11$ მ (რასაც დამატებითი სარკეებიდან არეკვლით მიაღწია), ხოლო $v=30$ კმ/წმ.

ფარდობითობის თეორია

II. დრო და ერთდროულობის ფარდობითობა

1. საშუალო სკოლაში ფარდობითობის თეორიის სწავლების ძირითადი ხარვეზები შესავალში გავაშუქეთ. აქამდე მოყოლებული ერთი მათგანი დავძლიეთ: ვნახეთ, როგორ შეიძლება მექანიკის, ელექტრომაგნეტიზმისა და ოპტიკის კურსების გადამუშავება თანამედროვე ფუნდამენტური ფიზიკის თვალსაწიერიდან რელატივისტური კონცეფციის საფუძველზე, რათა მივაღწიოთ მათ ორგანულ ერთიანობას ფარდობითობის თეორიასთან, შევისწავლოთ კლასიკური ფიზიკის საფუძვლები ფუნდამენტური მეცნიერული ცოდნის ერთიანი სისტემის სახით. ახლა, უშუალოდ ფარდობითობის თეორიის შესწავლისას, დანარჩენების გამოსწორების დრო დადგა (იხ. შესავალი).

რასაკვირველია, ძირითადად ფარდობითობის სპეციალური თეორიის საფუძვლებს შევისწავლით, მაგრამ ფარდობითობის ზოგადი თეორიის ელემენტებსაც გავეცნობით. ფარდობითობის თეორიის შესწავლისას განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია გადაცემის განვითარების ლოგიკურად მკაფიო გზის არჩევა, რათა ახსნის პირველმიზეზი გამოიკვეთოს. ავტორი ეყრდნობა აინშტაინის პირველ სტატიას [9], რომლის ზედმიწევნითი სიცხადე დაკარგულია სტანდარტულ სახელმძღვანელოებში. გვერდს უვლიან დროის აინშტაინისეულ განსაზღვრებას და ამის გამო რელატივისტური შედეგები შინაგანი კავშირის გამორკვევის გარეშე არის გადმოცემული. სწავლების კონსერვატიულ ხასიათთან ერთად ესეც უნდა იყოს მიზეზი, რომ სასწავლო ლიტერატურაში ჯერ კიდევ ფართოდ გამოიყენება მოძველებული ცნებები, რომლებსაც საერთო არაფერი აქვთ ფარდობითობის თეორიის არსთან, არამედ მისი ჩამოყალიბების ისტორიას ასახავენ და ეს გლობალურად ხდება [22]. მრავალრიცხოვან ლიტერატურას შორის საფუძვლიანისა და სასარგებლოს გამორჩევა მარტივი არ არის. სხვადასხვა დონის მკითხველისათვის ცოდნის გასაღრმავებლად რამდენიმეს დავასახელებთ, რომელთანაც წინამდებარე წიგნს უშუალო შეხება აქვს [15, 23-27].

ფარდობითობის თეორიის შესწავლისას დამწყებს „ბუნებრივი" კითხვა უჩნდება: როგორ აიხსნება სინათლის ინვარიანტობა, მისი ეს უნიკალური თვისება? აინშტაინმა აჩვენა, რომ კითხვა უმართებულოდაა დასმული. სინათლის ინვარიანტობა არის ბუნების ფუნდამენტური თვისება,

იგი უნდა მივიღოთ როგორც ექსპერიმენტული შედეგების ამსახველი ფაქტი. გამომდინარე ამ ფაქტიდან, საჭიროა გავარკვიოთ ჩვენი წარმოდგენების როგორ სიღრმისეულ ცვლილებებს იწვევს იგი. უპირველესად, უნდა ვუპასუხოთ კითხვაზე: რა არის დრო? ეს კი შეუძლებელია ერთდროულობის ცნების განსაზღვრების გარეშე. ასე შემოდის დროის ფარდობითობა, ხოლო სხვა რელატივისტური მოვლენები დროის ფარდობითობის საფუძველზე აიხსნება – ის „პირველმიზეზია". განსაკუთრებით საზიერია ასეთი ახსნა მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულებისა და ენერგიასთან მისი კავშირის განსჯისას.

2. გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. სინათლის ინვარიანტობის შესწავლისას თითქოსდა ბუნებრივი კითხვა დგება, როგორ ავხსნათ სინათლის ის გამორჩეული თვისება, რომ მისი მნიშვნელობა ერთნაირია ყველა ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ? აინშტაინმა დაასაბუთა, რომ კითხვის ასე დასმა არასწორია. სინათლის ინვარიანტობა ბუნების ფუნდამენტური თვისებაა, იგი წარმოადგენს ცდის შედეგების ამსახველ ფაქტს, სინამდვილეს. ფაქტის გამართლება კი არ უნდა ვეძიოთ, არამედ გავიაზროთ, როგორ არსებითად ცვლის იგი ჩვენს წარმოდგენებს, „საღ აზრს". უპირველესად, ეს დროს ეხება. აინშტაინამდე მეცნიერები თვლიდნენ, რომ დრო *აბსოლუტურია:* ერთნაირად მიმდინარეობს უძრავსა თუ მოძრავ ინერციულ სისტემებში – დედამიწაზე, ხომალდზე, მზეზე... აინშტაინმა აჩვენა, რომ ასე არ არის, დრო *ფარდობითია.* რას ნიშნავს და როგორ გამოვლინდება დროის ფარდობითობა? რატომ ვერავინ ვერ ამჩნევდა მის ფარდობითობას ადრე? თანამიმდევრულად განვიხილოთ პრობლემა.

შევეცადოთ ვუპასუხოთ კითხვაზე: რა არის დრო? ეს ურთულესი კითხვაა. ჯერ კიდევ უძველესი დროიდან მოდის მოსწრებული გამოთქმა: „მე ვიცი რა არის დრო, თუ ამის თაობაზე არ მეკითხებიან". ისეთი ცნებები, როგორიცაა ადრე, გვიან, ხანგრძლივი, ხანმოკლე, დროის ცნებასთანაა დაკავშირებული. ისინი ყოველდღიური გამოცდილებიდან აღმოცენდა და სუბიექტურია. მაგალითად, რაც ერთისათვის ხანგრძლივია, მეორისათვის შეიძლება ხანმოკლე აღმოჩნდეს. დროის ცნება ობიექტური, ე. ი. ყველასათვის ერთნაირი, ხდება გაზომვის შედეგად. დრო საათით იზომება. ნებისმიერი საათი, მის მოწყობილობაზე დამოუკიდებლად, პერიოდულ პროცესს ასრულებს. მაგალითად, საათად შეიძლება გამოვიყენოთ მაჯისცემა, დედამიწის მიმოქცევა, ქანქარას რხევა, სინათლის სიხშირე და ა. შ. ფიზიკაში დრო განისაზღვრება, როგორც ფიზიკური სიდიდე. დრო უზოგადესი ცნებაა, ამიტომ მისი განსაზღვრება შესაძლებელია არ-

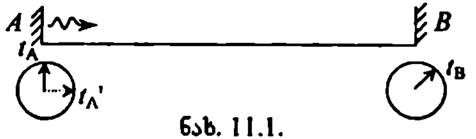
სებითი ნიშნების, თვისებების ჩამოთვლით. ისინი კი მხოლოდ ცდით შეიძლება დადგინდეს. ფიზიკის განვითარება არ დასრულებულა, მეცნიერებას დროის თვისებები არ ამოუწურავს. ამიტომ იმის გათვალისწინებით, რაც ვიცით, ფიზიკოსის პასუხი დასმულ კითხვაზე ერთობ ლაკონიურია, სხარტია: *დრო არის ფიზიკური სიდიდე, რომელსაც საათი ზომავს.*

აინშტაინმა აჩვენა, რომ საკითხი ასე მარტივად წყდება მხოლოდ მაშინ, როდესაც საათი მოთავსებულია იმ ადგილზე, სადაც მოვლენა ხდება. ყოველი განსჯა დროის თაობაზე ყოველთვის არის განსჯა *ერთდროულ* მოვლენებზე. მაგალითად, გამოთქმა „გაკვეთილი 9 საათზე იწყება" ნიშნავს, რომ საათის ჩვენება 9-ზე და გაკვეთილის დაწყება *ერთდროული* მოვლენებია. მაშასადამე, დროისა და ერთდროულობის ცნებათა დაშორება შეუძლებელია. დროს ადვილად განვსაზღვრავთ მოცემულ ადგილზე, როდესაც საათი მოვლენის მოხდენის ადგილზეა მოთავსებული (ე. წ. „ადგილობრივი დრო"). მაგრამ როგორ შევადაროთ დრო ერთმანეთისაგან დაშორებულ ადგილებზე? მაგალითად, მოძრაობის სიჩქარის გასაგებად გავლილი მანძილი უნდა გავყოთ ამ მანძილის გასავლელად საჭირო დროის შუალედზე. ამ შუალედს ვიპოვით გზის საბოლოო და საწყისი წერტილების გავლის დროის მომენტთა გამოკლებით. ამისათვის კი აუცილებელია საწყის და საბოლოო წერტილებში მოთავსებული საათები *ერთდროულად* ერთსა და იმავე დროს აჩვენებდეს. ვხედავთ, რომ ასეთ შემთხვევაშიც *დრო და ერთდროულობა განუყოფელი* ცნებაა.

დასმული პრობლემა მეცნიერებაში სხვა, ზუსტი ტერმინით გადმოიცემა, სახელდობრ, როგორ დავადგინოთ, რომ ერთმანეთისაგან დაშორებული საათები სინქრონულად მუშაობს? ადრე საათების სინქრონიზაციის პრობლემა იმდენად უბრალოდ, ტრივიალურად მიაჩნდათ, რომ სპეციალურად არც კი განიხილავდნენ მეცნიერებაში. მაგალითად, თუ ორი გასწორებული საათიდან ერთ-ერთს გემს გავატანთ, ითვლებოდა, რომ ისინი სინქრონულად იმუშავებდა. აინშტაინის წყალობით ვიცით, რომ ეს ასე არ არის. მაგრამ საათების ჩვენებათა სხვაობის შემჩნევა შესაძლებელია მხოლოდ დიდი, სინათლის სიჩქარის მახლობელი სიჩქარეებით მოძრაობისას. ჯერ კიდევ ნიუტონის მექანიკიდან ვიცით, რომ მაკროსკოპული სხეულები $v<<c$ მცირე სიჩქარეებით მოძრაობს. ამიტომაც ადრე ვერავინ ვერ ამჩნევდა დროის ფარდობითობას.

აინშტაინმა მოგვცა საათების სინქრონიზაციის უნივერსალური მეთოდი, დაფუძნებული *სინათლის სიჩქარის ინვარიანტობის* თვისებაზე. განვიხილოთ შემდეგი წარმოსახვითი ცდა. დავუშვათ, რომელიმე ინერ-

ციული ათვლის სისტემის ერთმანეთისაგან დაშორებულ A და B წერტილებში მოთავსებულია ორი ერთნაირი უძრავი საათი, რომლებიც იმავე ასოებით აღვნიშნოთ (ნახ. 11.1). საათებით ადვილად განვსაზღვრავთ „ადგილობრივ დროს“ A და B წერტილებში. ახლა საჭიროა A და B წერტილებისათვის „საერთო დროს“განსაზღვრა. ამისთვის საჭიროა კავშირი



ნახ. 11.1.

დავამყაროთ A და B წერტილებს შორის უდიდესი შესაძლო სიჩქარით, რომელიც არ არის დამოკიდებული არც ათვლის სისტემის მოძრაობაზე, არც გავრცელების მიმართულებაზე და ამიტომ უნივერსალური საშუალებაა. ეს შეიძლება სინათლის სიგნალით განვახორციელოთ. „სინათლის სიგნალი“ ადრე შემოღებული გავრცელებული ტერმინია, რომელიც ნიშნავს ელექტრომაგნიტური (თეორიულად სხვა ფუნდამენტური სახისაც) ურთიერთქმედების გადაცემას c სიჩქარით. არც ერთი სხვა ხერხი არ არის უნივერსალური. ვთქვათ, A საათით დროის t_A მომენტში A წერტილიდან B-კენ გაუშვეს სინათლის სიგნალი (იმპულსი), B წერტილში აირეკლა სარკიდან B საათით დროის t_B მომენტში და A წერტილში დაბრუნდა A საათით დროის t_A' მომენტში. სინათლის იმპულსის მიერ AB მანძილის წინ და უკან გავლის დრო ერთნაირია:

$$t_B - t_A = t_A' - t_B.$$

ამიტომ საათები სინქრონულად მუშაობს, სინქრონიზებულია, თუ

$$t_A' = 2t_B - t_A. \qquad (11.1)$$

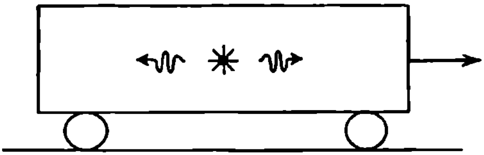
ამრიგად, დავადგინეთ, რას ნიშნავს არჩეული ათვლის სისტემის სხვადასხვა წერტილში მოთავსებული *უძრავი* საათების სინქრონული მუშაობა, როგორ უნდა განვახორციელოთ საათების სინქრონიზაცია. *ეს არსებითია, რადგან ამით ზოგად შემთხვევაში განისაზღვრა დროის, ერთდროულობის ცნება.*

დავუბრუნდეთ სიჩქარის გაზომვის საკითხს. საჭიროა გზის საწყის და საბოლოო წერტილებში მოთავსებული უძრავი საათების სინქრონიზება და მათი ჩვენების მიხედვით გავზომავთ მონაკვეთის გასავლელად საჭირო დროის შუალედს. რასაკვირველია, პრაქტიკულად ერთი საათით ვსარგებლობთ, რადგან უგულებელვყოფთ დაშორებული წერტილიდან სინათლის მოსვლისათვის საჭირო დროს – ამ დროის შემჩნევა მცირე სიჩქარეების

შემთხვევაში შეუძლებელია. მაგრამ დიდი სიჩქარეებისათვის, მაგალითად, თვით სინათლის სიჩქარის გასაზომად, აუცილებელია სინქრონიზებული ორი საათი მაინც. ახლა დავაზუსტოთ ათვლის სისტემის ცნება:

ათვლის სხეული, მასთან დაკავშირებული კოორდინატთა სისტემა და უძრავი სინქრონიზებული საათები ერთად ათვლის სისტემას ადგენს.

აინშტაინისეული განსაზღვრება საათების სინქრონიზაციისა, ანუ დროისა, ერთდროულობისა, სავსებით ბუნებრივად გამოიყურება, მაგრამ იგი ხომ სინათლის ინვარიანტობას ემყარება! ამიტომ ძირფესვიანად ცვლის ჩვენ წარმოდგენას დროზე – გვაძლევს დროის, ერთდროულობის ფარდობითობას. განვიხილოთ უბრალო მაგალითი. ვთქვათ, თანაბარ-



ნახ. 11.2.

წრფივად მოძრავი ვაგონის შუაში ნათურა ჩართეს (ნახ. 11.2). ვაგონის დამკვირვებლის თვალსაზრისით, სინათლე ერთდროულად გაანათებს წინა და უკანა კედლებს, დედამიწის უძრავი დამკვირვებლისათვის – არა. ამ უკანასკნელის მიმართ სინათლის სიჩქარე ისევ c-ს ტოლია, მაგრამ წინა კედელი შორდება სინათლეს, უკანა – უახლოვდება. ამიტომ სინათლე ჯერ უკანა კედელს გაანათებს, შემდეგ – წინას. რაც ერთდროულად ხდება ერთ ინერციულ ათვლის სისტემაში, ერთდროული არ არის მეორეში. მაშასადამე, ერთდროულობა, დრო, საათების სინქრონიზაცია – ერთმანეთისაგან განუყოფელი ეს ცნებები – ფარდობითია.

დრო სხვადასხვანაირად მიედინება მოძრავსა და უძრავ ინერციულ ათვლის სისტემებში!

ერთი შეხედვით, დროის ფარდობითობა „საღ აზრს" ეწინააღმდეგება. გვარიანი ძალისხმევაა საჭირო მისი გათვითცნობიერებისათვის. ეს უაღრესად მნიშვნელოვანია, რამეთუ ფარდობითობის თეორიის რადიკალური სიახლენი უშუალოდ დროის ფარდობითობას უკავშირდება.

3. გავაანალიზოთ ამოცანები ერთდროულობის ფარდობითობაზე.

ამოცანა **11.1.** მუხტის მუდმივობის კანონის საფუძველზე გაარკვიეთ, რომ ელექტრონ-პოზიტრონის წყვილი აუცილებლად ერთდროულად იბადება (იხ. ამოცანა 6.10). ერთდროულობის ფარდობითობის გამო ხომ

არ შეიძლება ისეთი ინერციული ათვლის სისტემის შერჩევა, რომლის მიმართაც ელექტრონ-პოზიტრონის წყვილი ერთდროულად არ წარმოიშობა და დაირღვეოდა მუხტის მუდმივობის კანონი?

ა მ ო ხ ს ნ ა. ელექტრონ-პოზიტრონის წყვილი *ერთდროულად* იბადება *ერთ წერტილში*. ერთ წერტილში მომხდარი მოვლენების ერთდროულობა აბსოლუტურია, *ერთდროულობა ფარდობითია სხვადასხვა წერტილში* მომხდარი მოვლენებისათვის. უბრალო მაგალითი: თუ ორი ავტომანქანა ერთმანეთს დაეჯახა, ე. ი. ერთ წერტილში ერთდროულად შეხვდა, ისინი ნებისმიერ ათვლის სისტემის მიმართ დაზიანდება.

ამოცანა 11.2. დავუშვათ, მოძრავი ვაგონის შუიდან ჰორიზონტალურად, ურთიერთსაპირისპირო მხარეს, ტოლი მოდულის სიჩქარით გაისროლეს ორი ტყვია (შდრ. ნახ. 11.2). ერთდროულად მოხვდება თუ არა წინა და უკანა კედლებში ორივე ტყვია დედამიწის დამკვირვებლის თვალსაზრისით? რა ითქმის საათების სინქრონიზაციისათვის მექანიკური „სიგნალის“ გამოყენების თაობაზე?

ა მ ო ხ ს ნ ა. ვთქვათ, ვაგონის სიჩქარეა v_s სიგრძე – l, ტყვიათა სიჩქარის მოდული – v'. ვაგონის დამკვირვებლის თვალსაზრისით, ორივე ტყვია წინა და უკანა კედლებში შემდეგ დროში ერთდროულად მოხვდება:

$$t_1' = t_2' = l/2v'$$

დედამიწის დამკვირვებლის თვალსაზრისით, ვაგონის მოძრაობის მიმართულებით ტყვიის სიჩქარეა $v'+v_s$ და წინა კედელში მოხვედრამდე იგი $l/2+v_s t_1$ მანძილს გაიფრენს, სადაც t_1 არის წინა კედელში მოხვედრისათვის საჭირო დრო. ამიტომ

$$l/2 + v_s t_1 = (v' + v_s)t_1, \ \Rightarrow \ t_1 = l/2v'.$$

ვაგონის მოძრაობის საპირისპირო მიმართულებით ტყვიის სიჩქარეა $v'-v_s$ და უკანა კედელში მოხვედრამდე იგი $l/2-v_s t_2$ მანძილს გაიფრენს, სადაც t_2 არის უკანა კედელში მოხვედრის დრო. მაშასადამე,

$$l/2 - v_s t_2 = (v' - v_s)t_2, \ \Rightarrow \ t_2 = l/2v'.$$

როგორც ვხედავთ, $t_1'=t_2'=t_1=t_2$: ტყვიათა მოხვედრა კედლებში ერთდროულად ხდება ორივე დამკვირვებლის თვალსაზრისით. ამის მიზეზია ტყვიის სიჩქარის ფარდობითობა, განსხვავებით სინათლის სიჩქარისაგან. ეს მაგალითი გვიჩვენებს, რომ მექანიკური სიგნალი (ბგერა, გასროლა...) არ გამოდგება საათების სინქრონიზაციისათვის.

ის, რომ c ზღვრული სიჩქარეა, დროის ფარდობითობასთან ერთად, მიზეზშედეგობრივი კავშირის სათანადო გააზრებას მოითხოვს.

ამოცანა **11.3.** ლაბორატორიული (უძრავი) სისტემის სათავეზე A მოვლენა Δt=3 წმ-ით ადრე მოხდა B-ზე, რომელიც A-დან დაშორებულია $x=9\cdot10^4$ კმ-ით. არსებობს თუ არა ისეთი მოძრავი ინერციული ათვლის სისტემა, რომელშიც B მოხდება A-ზე ადრე? A და B ერთსა და იმავე ადგილზე მოხდება?

ა მ ო ხ ს ნ ა. 3 წმ-ში სინათლე გადის $c\Delta t=9\cdot10^8$ მ მანძილს, რომელიც მეტია $x=9\cdot10^7$ მ-ზე. ამიტომ სავსებით შესაძლებლია A იყოს B-ს მიზეზი (თუმცა აუცილებელი არ არის). მაგრამ მიზეზობრივი კავშირის დარღვევა შეუძლებელია, ამიტომ ისეთი მოძრავი ინერციული ათვლის სისტემა, რომელშიც A-ზე ადრე B მოხდება, არ არსებობს.

შევადაროთ სიჩქარე სინათლის სიჩქარეს:

$$v = x / \Delta t = 3 \cdot 10^7 \text{ მ/წმ} < c.$$

თუ ათვლის სისტემა v სიჩქარით მოძრაობს X ღერძის მიმართულებით, მაშინ ასეთ სისტემაში (ვთქვათ, რაკეტაში) A და B ერთსა და იმავე *ადგილზე* მოხდება.

არსებობს თუ არა ისეთი ინერციული ათვლის სისტემა, რომელშიც ეს მოვლენები ერთდროულად მოხდება?

კითხვები, ამოცანები

11.4. ფარდობითობის თეორიის გაცნობისას ხშირად სვამენ კითხვას: „როგორ აიხსნება სინათლის სიჩქარის ინვარიანტობა?“ უპასუხეთ.

11.5. რა არის საათი? როგორ განისაზღვრება დროის ეტალონი?

11.6. ქანქარას რხევის პერიოდის დამოუკიდებლობა გადახრის სიდიდეზე გალილეიმ ეკლესიაში აღმოაჩინა, როცა მრავალგზის აკვირდებოდა გრძელ ჯაჭვზე დაკიდებული ლამპრის რხევას. იმ დროს ჩვეულებრივი საათი არ არსებობდა. როგორ გაზომა გალილეიმ რხევის პერიოდი?

11.7. როგორ განისაზღვრება „ადგილობრივი დრო“?

11.8. რას ნიშნავს გამოთქმა „თვითმფრინავი 12 საათზე ჩამოფრინდა“? რა კავშირია დროისა და ერთდროულობის ცნებათა შორის?

11.9. რას ნიშნავს მეცნიერულ ენაზე გამოთქმა „სხვადასხვა ადგილზე მოთავსებული საათები ერთდროულად ერთსა და იმავე დროს აჩვენებს“?

11.10. როგორ განისაზღვრება სხვადასხვა ადგილის „საერთო დრო“? როგორი სიგნალით უნდა განხორციელდეს საათების სინქრონი-

ზაცია? რას არ ვითვალისწინებთ და რატომ რადიოთი გადმოცემული დროის სიგნალის მიხედვით საათის გასწორებისას?

11.11. ამოხსენით ამოცანა 11.3, თუ $x=3\cdot10^6$კმ.

12. დროის შენელება

1. დროის, ერთდროულობის ფარდობითობის გამორკვევის შემდეგ, ცხადია, საჭიროა მისი ხელშესახები შესწავლა. დრო სხვადასხვანაირად მიედინება უძრავსა და მოძრავ ინერციულ ათვლის სისტემებში, მაგრამ, სახელდობრ, როგორ? უშუალოდ გაკვეთილით დავიწყოთ, რომელიც ისეა აგებული, რომ, სურვილისამებრ, მისი ორად გაყოფა შეიძლება. როგორც შესავალში ითქვა, საშუალო სკოლაში ფარდობითობის თეორიის სწავლების ერთ-ერთი მთავარი ნაკლია, რომ ძირითადი ფორმულები გამოყვანის გარეშეა მოცემული. როგორ დავძლიოთ ეს ხარვეზი? თვალსაჩინოების, მისაწვდომობის თვალსაზრისით (და ეს გადამწყვეტია), ყველაზე მისაღები და საკმაოდ გავრცელებულიც „სინათლის საათის" გამოყენებაა. მსგავსი იდეა აინშტაინმა თავის პირველსავე სტატიაში [9] მოგვცა – შდრ. ნახ. 11.1. ამიტომ მას აინშტაინის საათიც შეიძლება ვუწოდოთ (ლიტერატურაში სხვა სახელწოდებაც გვხვდება, რაც არაკორექტულია). როგორც წესი, სინათლის საათს აინშტაინის ორი პოსტულატის საფუძველზე სიგრძის შემოკლების ფორმულის გამოსაყვანად იყენებენ, შემდეგ კი ამ უკანასკნელის მიხედვით – დროის შენელებისა. ზემოთ ხაზი გავუსვით, რომ ჩვენ განსხვავებულ მიმდევრობას ვირჩევთ, რათა, ვეყრდნობით რა აინშტაინის [9] სტატიას, წარმოვაჩინოთ პირველმიზეზი და განვთავისუფლდეთ მოძველებული ინტერპრეტაციისაგან.

გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. გავაგრძელოთ დროის ფარდობითობის შესწავლა. დავუშვათ, რაკეტის – მოძრავი ინერციული ათვლის სისტემის – რომელიმე ადგილას (წერტილში) რაიმე მოვლენა მოხდა, ვთქვათ, გარკვეული ხნით გაანათა ნათურამ. ასტრონავტის საათით გაზომილი ამ მოვლენის ხანგრძლივობა $\Delta t'$-ით აღვნიშნოთ. ლაბორატორიული სისტემის მიმართ ეს მოვლენა ერთ წერტილში არ ხდება, რადგან რაკეტა მის მიმართ გადაადგილდება. ამიტომ მოვლენის ხანგრძლივობის გასაზომად ლაბორატორიის დამკვირვებელს ორი სინქრონიზებული საათი სჭირდება, რომლებიც მოვლენის დაწყებისა და დამთავრების წერტილებშია მოთავსებული. ლაბორატორიული საათებით გაზომილი მოვლენის ხანგრძლივობა Δt-თი აღვნიშნოთ.

ვხედავთ, რომ გაზომვის პროცესი რელატივისტურ ფიზიკაში საკმაოდ რთულია. ნებისმიერ ინერციული ათვლის სისტემის სხვადასხვა ადგილას (თეორიულად ყველა წერტილში) სინქრონიზებული *უძრავი* საათი უნდა იყოს მოთავსებული. რატომ არ შეიძლება მოცემული სისტემის საათების გადაადგილება, მალე გახდება ნათელი.

ფარდობითობის თეორია იძლევა, რომ

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \tag{12.1}$$

სხეულთა მოძრაობის სიჩქარე $v<c$, ამიტომ $\Delta t>\Delta t'$: მოძრავ ინერციულ ათვლის სისტემაში გაზომილი დროის შუალედი ნაკლებია უძრავ ინერციულ სისტემაში გაზომილ იმავე პროცესის ხანგრძლივობასთან შედარებით. ეს დროის ფარდობითობის გამოვლინებაა.

მოძრავ ინერციულ ათვლის სისტემაში დრო უფრო ნელა მიმდინარეობს, ვიდრე უძრავში. ეს დროის თ ვ ი ს ე ბ ა არის და, რა თქმა უნდა, დამოკიდებული არ არის საათის მოწყობილობაზე.

ამ რელატივისტურ მოვლენას დროის შენელება ეწოდება. იგი მართებულია ნებისმიერი პროცესისათვის, მათ შორის სიცოცხლისათვისაც. „დაბერების" ფარდობითობის პარადოქსს შემდეგ განვიხილავთ. ვიცით, რომ მაკროსკოპული სხეულებისათვის $v<<c$, ამიტომ დიდი სიზუსტით $v^2/c^2\approx0$ და $\Delta t\approx\Delta t'$ – ჩვეულებრივ პირობებში დროის შენელების შემჩნევა შეუძლებელია. (12.1) ფორმულის სისწორე ელემენტარულ ნაწილაკებზე დაკვირვებით დასტურდება. მიუონები, π-მეზონები მცირე ხანს ($\sim10^{-6}$, $\sim10^{-8}$ წმ) „ცოცხლობენ", შემდეგ სხვა ელემენტარულ ნაწილაკებად გარდაიქმნებიან. ისინი c-ს მახლობელი სიჩქარით მოძრაობენ და მათთვის დროის შენელება მნიშვნელოვანია. ლაბორატორიულ სისტემაში სიცოცხლის ხანგრძლივობა მეტია, ვიდრე ნაწილაკთან დაკავშირებულ მოძრავ სისტემაში, ზუსტად (12.1) ფორმულის შესაბამისად.

ახლა შეგვიძლია ვუპასუხოთ კითხვაზე, რომელიც საკმაოდ ხშირად წამოიჭრება საათების სინქრონიზაციასთან დაკავშირებით. დავუშვათ, ერთ ადგილზე მოთავსებული ორი საათი გავასწორეთ და ერთი მათგანი სხვა წერტილში გადავიტანეთ. რატომ არ გამოდგება სინქრონიზაციის ასეთი ხერხი? მოძრავი საათი სხვა დროს – ეს დროის, და არა საათის მექანიზმის, თვისებაა – აჩვენებს და საათები სინქრონულად არ იმუშავებს. ამიტომაც აღვნიშნეთ ხაზგასმით, რომ ნებისმიერი ინერციული ათვლის სისტემის სინქრონიზებული საათები თავის სისტემაში *უძრავია*. საათების სინქრონიზაცია, განუყოფელი დროის, ერთდროულობის ცნე-

ბისაგან, ფარდობითია: ყოველ ინერციული ათვლის სისტემაში დამოუკიდებლად ხორციელდება.

განვაზოგადოთ (12.1) ფორმულა. არსებითია, რომ $\Delta t'$ არის მოძრავი სისტემის ერთ წერტილში მიმდინარე პროცესის ხანგრძლივობა, გაზომილი ამავე წერტილში მოთავსებული საათით. დავუკავშიროთ ათვლის სისტემა და საათი მოძრავ ნაწილაკს (სხეულს), მაშინ $\Delta t'$ იქნება ნაწილაკთან დაკავშირებული, მასთან ერთად მოძრავი საათით ათვლილი დრო.

ნაწილაკთან (სხეულთან) დაკავშირებული საათით ათვლილ დროს საკუთარი დრო ეწოდება.

საკუთარი დრო ძალზე მოსახერხებელი მახასიათებელია, რადგან ინვარიანტული სიდიდეა: მისი მნიშვნელობა ერთნაირია ყველა, მოძრავი თუ უძრავი, დამკვირვებლისათვის. საკუთარი დრო ყოველთვის ნაკლებია, ვიდრე უძრავი (ლაბორატორიული) ინერციული ათვლის სისტემის საათებით ათვლილი შესატყვისი დრო. ეს დროის შენელებაა. ხშირად საკუთარი დროის შუალედს $\Delta t'\equiv\tau_0$-ით, ლაბორატორიულს – $\Delta t\equiv\tau$-თი აღნიშნავენ. ძალზე მოსახერხებელია $\gamma\equiv(1-v^2/c^2)^{-1/2}$ ისტორიული აღნიშვნის გამოყენება. მაშინ ზოგადი ფორმულა ასეთ სახეს იღებს:

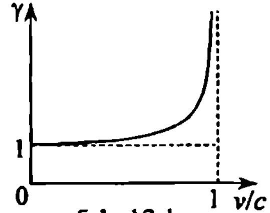
$$\tau=\gamma\tau_0. \qquad (12.2)$$

გავიმეოროთ: τ არის უძრავი (ლაბორატორიული) სინქრონიზებული საათებით ათვლილი დროის შუალედი, τ_0 – საკუთარი დროის შუალედი (ფორმულის მართებული გამოყენებისათვის უნდა გვახსოვდეს, რომ ეს არის ხანგრძლივობა მოძრავი სისტემის ერთ წერტილში მიმდინარე მოვლენისა, ათვლილი ამავე წერტილში მოთავსებული საათით).

(12.1) კავშირი მართებულია იმ შემთხვევებშიც, თუ: 1. მოვლენა მოძრავი სისტემის ერთ წერტილში არ ხდება, მაგრამ მთავრდება დაწყების წერტილში; 2. მოვლენის დაწყებისა და დამთავრების წერტილები მოძრავ სისტემაში სიჩქარისადმი ერთ განივ მიმართულებაზე მდებარეობს – ორივე შემთხვევაში $\Delta x'=0$.

γ-ს რელატივისტური კოეფიციენტი (ზოგჯერ ლორენც-ფაქტორი) ეწოდება. γ მრავალ სხვადასხვანაირ რელატივისტურ ფორმულაში შედის, ამიტომ გავარკვიოთ მისი ფიზიკური შინაარსი. იგი (12.2)-დან გამომდინარეობს: აკავშირებს რა საკუთარ და ლაბორატორიულ (უძრავი სისტემის) დროებს, γ დროის ფარდობითობას გამოსახავს. სწორედ დროის ფარდობითობა არის ამოსავალი რელატივისტურ კანონზომიერებებში წვდომისათვის (და არა, ვთქვათ, მასის დამოკიდებულება სიჩქარეზე). როცა $v=0$, მაშინ $\gamma=1$; თუ $v\to c$, $\gamma\to\infty$ (ნახ. 12.1). $v<<c$ მცირე სიჩქარეები-

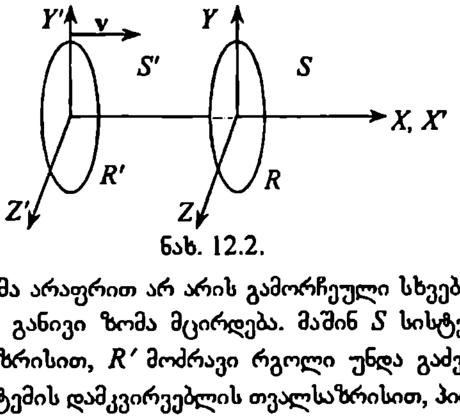
სათვის $\gamma \approx 1$ – ეს არარელატივისტური (შორსქმედების) ფიზიკის მართებულობის პირობაა.



ნახ. 12.1.

გამოვიყვანოთ დროის შენელების ფორმულა. თავდაპირველად დავამტკიცოთ მნიშვნელოვანი კანონზომიერება, რომ რელატივისტური გამოვლინება შეუძლებელია არსებობდეს მოძრავი სხეულის სიჩქარისადმი მართობი, განივი ზომებისათვის.

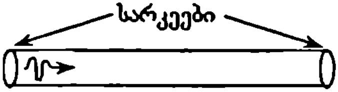
განვიხილოთ ორი, საერთო ღერძის მქონე, ზუსტად ერთნაირი რგოლი, რომლებიც ამ ღერძის გასწვრივ უახლოვდებიან ერთმანეთს მუდმივი სიჩქარით (ნახ.12.2). სიმეტრიის გამო რგოლების ნებისმიერი რადიუსი სიჩქარისადმი განივ ზომას წარმოადგენს. ინერციული ათვლის სისტემის დაკავშირებით ერთ-ერთ რგოლთან ყოველთვის შეიძლება იმის თქმა, რომ იგი უძრავია და მეორე მას უახლოვდება. თუ მოძრაობა რაიმე გავლენას ახდებს რგოლის ზომაზე, ის შეიძლება ან შეიკუმშოს, ან გაფართოვდეს ფორმის შეუცვლელად, ვინაიდან სიმეტრიის გამო არც



ნახ. 12.2.

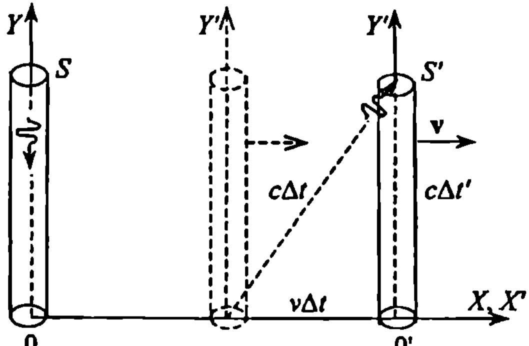
ერთი განივი ზომა არაფრით არ არის გამორჩეული სხვებიდან. ვთქვათ, მოძრავი ღეროს განივი ზომა მცირდება. მაშინ S სისტემის დამკვირვებლის თვალსაზრისით, R' მოძრავი რგოლი უნდა გაძვრეს R უძრავ რგოლში. S' სისტემის დამკვირვებლის თვალსაზრისით, პირიქით, R მოძრავი რგოლი უნდა გაძვრეს R' უძრავ რგოლში. მაგრამ ხომ არ შეიძლება რგოლები ერთდროულად გაძვრნენ ერთმანეთში? თუ ცდით დავადგენდით (ვთქვათ, საღებავიან ფუნჯს მივამაგრებდით რგოლებს), რომ ერთი რგოლი მეორეში გაძვრა, საშუალება მოგვეცემოდა ადგილობრივი ექსპერიმენტით ერთი ინერციული სისტემა მეორისაგან გამოგვერჩია, გვეთქვა „სინამდვილეში" რომელი მოძრაობს. ეს ფარდობითობის პრინციპს ეწინააღმდეგება. დასკვნა: სიჩქარისადმი განივი ზომები მოძრაობისას არ იცვლება, ისინი ინვარიანტია.

დროის ობიექტური თვისებების დასადგენად იგი საათით უნდა გავზომოთ. საათის მოწყობილობას მნიშვნელობა არა აქვს. თვალსაჩინოებისათვის ავირჩიოთ უმარტივესი იდეალური საათი, რომელიც შემდეგნაირადაა მოწყობილი. გარკვეული სიგრძის მყარი ღეროს ან გამჭვირვალე მილის ბოლოებზე დამაგრებულია პატარა ბრტყელი სარკეები. სინათლის იმპულსი, ირეკლება რა სარკეებიდან, აქეთ-იქით დარბის და მისი ყოველი დაცემისას საათი „წიკწიკებს“. (ნახ. 12.3).



ნახ. 12.3.

ორი ერთნაირი სინათლის საათი მოვათავსოთ უძრავსა და მოძრავ ინერციულ სისტემებში სიჩქარის განივად ისე, რომ ქვედა ბოლოები კოორდინატთა სისტემის სათავეს შევუთავსოთ (ნახ. 12.4). რადგან მოძრაობა განივ ზომებზე არავითარ გავლენას არ ახდენს, ორივე საათის სიგრძე ზუსტად ერთნაირი რჩება. დავუშვათ, S' მოძრავი დამკვირვებელი თავისი საათით ზომავს დროს,რომლის განმავლობაში სინათლის იმპულსი ქვედა სარკიდან ზედამდე მიაღწევს. აღვნიშნოთ დროის ეს შუალედი



ნახ. 12.4.

$\Delta t'$-ით. ვთქვათ, S უძრავი დამკვირვებელი თავისი საათით იმავეს ზომავს. მისი თვალსაზრისით, სინათლე S' მოძრავ საათში არ ვრცელდება Y' ღერძის გასწვრივ, არამედ– დახრილად, საათის გადაადგილების გამო (იმის მაგალითი, რომ სინათლის გავრცელების მიმართულება უძრავსა და მოძრავ სისტემებში განსხვავებულია, ნახ. 12.4). რადგან სინათლე მეტ მანძილს გადის, S უძრავი დამკვირვებლის საათით ზედა სარკემდე მისაღწევად მას მეტი დრო დასჭირდება: $\Delta t>\Delta t'$. როდესაც S უძრავი დამკვირვებლის საათით Δt დროში სინათლე S' მოძრავ საათში ზედა

სარკეს მიაღწევს, S უძრავ საათში სინათლის იმპულსი ზედა სარკიდან უკვე არეკვლილი იქნება. ამ დროში S' მოძრავი საათი $v\Delta t$ მანძილზე გადაადგილდება. სიჩქარისადმი განივი $c\Delta t'$ მანძილი ინვარიანტია – ერთნაირია ორივე დამკვირვებლისათვის. პითაგორას თეორემის თანახმად,

$$\left(c\Delta t\right)^2 = \left(c\Delta t'\right)^2 + \left(v\Delta t\right)^2, \qquad (12.3)$$

საიდანაც ადვილად მიიღება (12.1) კავშირი.

2. ამოვხსნათ ამოცანა იმის საჩვენებლად, თუ რამდენად მნიშვნელოვანია დროის შენელება ელემენტარული ნაწილაკებისათვის.

ამოცანა 12.1. ატმოსფეროს ზედა ფენებში წარმოშობილი მიუონი, რომლის სიჩქარეა $0.99c$, დაშლამდე 5,0 კმ-ს გადის. როგორია მისი სიცოცხლის ხანგრძლივობა ჩვენი და „მიუონის" თვალსაზრისით? რა მანძილს გადის იგი „საკუთარი" თვალსაზრისით?

ა მ ო ხ ს ნ ა. ლაბორატორიულ სისტემაში, ჩვენი თვალსაზრისით, მიუონის სიცოცხლის ხანგრძლივობა ტოლია:

$$\tau = \frac{l}{v} = \frac{5{,}0\cdot 10^3}{0{,}99\cdot 3\cdot 10^8} = 1{,}7\cdot 10^{-5}\ \text{წმ.}$$

მიუონთან დაკავშირებულ სისტემაში, მისი „საკუთარი" თვალსაზრისით, სიცოცხლის ხანგრძლივობა ნაკლებია დროის შენელების გამო:

$$\tau_0 = \tau\sqrt{1 - v^2/c^2} < \tau.$$

როცა $\beta \equiv v/c \approx 1$, ფესვი ასე გამოითვლება (დაიმახსოვრეთ ეს ხერხი):

$$\sqrt{1-\beta^2} = \sqrt{(1+\beta)(1-\beta)} \approx \sqrt{2(1-\beta)} = \sqrt{0{,}02} \approx 0{,}14.$$

მიუონის „საკუთარი" თვალსაზრისით, სიცოცხლის ხანგრძლივობა და გავლილი მანძილი ტოლია:

$$\tau_0 = 2{,}4\cdot 10^{-6}\ \text{წმ.} \quad l' = v\tau_0 = 0{,}99\cdot 3\cdot 2{,}4\cdot 10^2 = 700\ \text{მ.}$$

კითხვები, ამოცანები

12.2. რას ეწოდება საკუთარი დრო? რატომ არის იგი ძალზე მოსახერხებელი მახასიათებელი?

12.3. დროის შენელების ფორმულაში ჩასვით სიჩქარის მნიშვნელობები $v=c$, $v>c$ და ახსენით.

12.4. რა არის γ რელატივისტური კოეფიციენტის ფიზიკური შინაარსი? გამოთვალეთ მისი მნიშვნელობა, თუ $v=0{,}6c$; $0{,}865c$.

12.5. π^+-მეზონის სიცოცხლის ხანგრძლივობა საკუთარ სისტემაში $\tau_0 = 2{,}5\cdot 10^{-8}$ წმ. ლაბორატორიული სისტემის მიმართ მისი სიჩქარე

v=0,99c. რა მანძილს გაივლის იგი ლაბორატორიულ სისტემაში და რას ედრებოდა ეს მანძილი რელატივისტური მოვლენა რომ არ არსებობდეს?

12.6. უძრავი დამკვირვებლის სინათლის საათით გაზომილი N „წიკწიკის“ დრო 1 წამის ტოლია. რა დროს აჩვენებს მოძრავი დამკვირვებლის ზუსტად ისეთივე საათი N „წიკწიკისას“?

12.7. „*ძირს ფარდობითობის თეორია!*“ ოპონენტი ამტკიცებს, რომ დროის შენელება განპირობებულია სინათლის საათის თავისებურებით. თუ მის ნაცვლად ჩვეულებრივ საათს ავიღებთ, რომლის მექანიზმი სინათლის სიჩქარეზე გაცილებით მცირე სიჩქარით მუშაობს, დროის არავითარი შენელება არ გვექნება. უპასუხეთ.

12.8. უძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით, მისი საათის ზედა სარკიდან სინათლის იმპულსის არეკვლის მომენტში დაახლოებით სად იქნება სინათლის იმპულსი მოძრავ საათში (იხ. ნახ. 12.4)?

12.9. რატომ გვაძლევს (12.3) სწორ პასუხს მიუხედავად იმისა, რომ $\Delta t'$ არ არის მოძრავი სისტემის ერთ წერტილში მომხდარი მოვლენის ხანგრძლივობა?

12.10. თუ ნაწილაკი აჩქარებულად მოძრაობს, მასთან დაკავშირებული ათვლის სისტემა და საათი არ იქნება ინერციული. როგორ გამოვიყენოთ (12.2) კავშირი?

13. სიგრძის შემოკლება

1. გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. წინა გაკვეთილში დავასაბუთეთ, რომ მოძრაობის მიმართულებისადმი სხეულის განივი ზომა ინვარიანტია. ახლა ვაჩვენოთ, რომ სხეულის სიჩქარის გასწვრივი ზომა ფარდობითია, ვარიანტულია. დავუშვათ, რომ რაკეტაში (მოძრავ ინერციულ ათვლის სისიტემაში) მოძრაობის მიმართულების გასწვრივ მოთავსებულია ღერო. ასტრონავტის მიერ გაზომილი ღეროს სიგრძე l_0-ით აღვნიშნოთ. ასტრონავტისათვის ღერო უძრავია, ე. ი. l_0 არის *უძრავი* ღეროს სიგრძე. ყველამ იცის, როგორ გაზომოს უძრავი ღეროს სიგრძე. მაგრამ როგორ გაზომოს ღეროს სიგრძე ლაბორატორიის დამკვირვებელმა, მას ღერო ხომ v სიჩქარით ჩაუვლის (რაკეტასთან ერთად)? ბუნებრივია, ლაბორატორიის დამკვირვებელმა *ერთდროულად* უნდა აიღოს ღეროს ბოლოების კოორდინატები და საბოლოო მნიშვნელობას სწყისი გამოაკლოს. მოძრავი ღეროს სიგრძის ასეთი განსაზღვრა არავის არ აეჭვებს. მაგრამ ერთ-

დროულობა ფარდობითია! ამიტომ სიგრძეც ფარდობითი გამოდის. ფარდობითობის თეორია იძლევა, რომ

$$l = l_0\sqrt{1 - v^2 / c^2} \qquad (13.1)$$

l არის მოძრავი ღეროს სიგრძე (მოძრავი სხეულის სიჩქარის გასწვრივი ზომა). (13.1)-დან $l<l_0$ – მოძრავი სხეულის სიგრძე ნაკლებია, ვიდრე უძრავისა. მაკროსკოპული სხეულებისათვის $v<<c$, $v^2/c^2\approx0$ და $l\approx l_0$ – ჩვეულებრივ პირობებში სიგრძის შემოკლების შემჩნევა შეუძლებელია.

ამრიგად, სხეულის სიჩქარის გასწვრივი ზომა ფარდობითია და ის უკავშირდება დროის, ერთდროულობის ფარდობითობას. როგორც აზრს მოკლებულია შეკითხვა სიჩქარის მნიშვნელობის შესახებ ათვლის სისტემის მითითების გარეშე, ასევე აზრს მოკლებულია მსჯელობა სიგრძის თაობაზე ათვლის სისტემის მიუთითებლად.

უკეთ რომ გავიგოთ სიგრძის ფარდობითობის აზრი, ფიზიკის ისტორიას მივუბრუნდეთ. (13.1) ფორმულას ლორენცის შემოკლებას უწოდებენ. იგი ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად იქნა შემოთავაზებული ფიცჯერალდისა და ლორენცის მიერ 1892 წელს, ფარდობითობის თეორიის შექმნამდე კარგა ხნით ადრე, მაიკელსონის ცდის შედეგის ასახსნელად. ამ „ახსნას" დღეს მხოლოდ ისტორიული, და არა ფიზიკური, მნიშვნელობა აქვს. ისინი – და ყველა სხვა აინშტაინამდე – ფიქრობდნენ, რომ სხეულის სიგრძე „რეალურად" მოკლდება რაღაც ფიზიკური პროცესის შედეგად (მაგალითად, მსგავსად შემოკლებისა გაცივებისას). მხოლოდ აინშტაინმა დაასაბუთა, რომ ღეროში არავითარი ფიზიკური პროცესი არ ხდება, უბრალოდ გასწვრივი ზომა ფარდობითია, როგორც მაგალითად, სიჩქარე. ფიზიკის შინაგანი მათემატიკურად მკაცრი ლოგიკა ზოგჯერ საშუალებას იძლევა ახალი ფორმულის გამოყვანისა ისე, რომ ჭეშმარიტი ფიზიკური შინაარსი გაუგებარი რჩება. სწორედ ასე იყო მიღებული წყება ფორმულებისა, შემდგომ დასაბუთებული ფარდობითობის სპეციალური თეორიის მიერ, ამ თეორიის შექმნამდე. მაგრამ ფიზიკა არ იწყება მათემატიკური ფორმულებიდან, არამედ – ფუნდამენტური ფიზიკური იდეებიდან, რომელიც შემდეგ იღებს მათემატიკურ სახეს [28, გვ. 225].

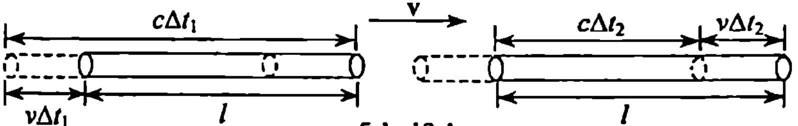
გამოვიყვანოთ (13.1) სიგრძის შემოკლების ფორმულა. კვლავ სინათლის საათი გამოვიყენოთ, წარმოსახვითი ექსპერიმენტი განვიხილოთ. ვთქვათ, რაკეტაში სიჩქარის გასწვრივ ძევს სინათლის საათი. ასტრონავტი ამ საათით ზომავს სინათლის იმპულსის მიერ სარკეებს შორის მანძილის წინ და უკან გავლის დროს. თუ ამ დროს $\Delta t'$-ით აღვნიშნავთ, უძრავი საათის $l'\equiv l_0$ სიგრძე ტოლია:

$$l_0 = c\Delta t'/2. \qquad (13.2)$$

განვიხილოთ იმავე სიგრძის გაზომვის პროცედურა ლაბორატორიის (უძრავი) დამკვირვებლის თვალსაზრისით. დავუშვათ, ლაბორატორიულმა დამკვირკებელმა თავისი საათით გაზომა, რომ სინათლის იმპულსმა კოსმონავტის საათში მარცხენა სარკიდან მარჯვენამდე Δt_1 დროში მიაღწია. რადგან ამ დროში ასტრონავტის საათი $v\Delta t_1$ მანძილზე გადაადგილდება, სინათლის იმპულსი $l+v\Delta t_1$ მანძილს გაივლის, სადაც l არის ასტრონავტის საათის სიგრძე ლაბორატორიის დამკვირვებლის თვალსაზრისით (ნახ. 13.1, მარცხნივ). ამრიგად,

$$c\Delta t_1 = l + v\Delta t_1, \Rightarrow \Delta t_1 = l/(c - v). \qquad (13.3)$$

ვთქვათ, მარჯვენა სარკიდან მარცხენამდე უკანა გზის გასავლელად სინათლის იმპულსს Δt_2 დრო დასჭირდა ლაბორატორიის საათის მიხედვით. ამ დროში მარცხენა სარკე სინათლის იმპულსის შემხვედრად გადა-



ნახ. 13.1.

ადგილდება $v\Delta t_2$ მანძილზე და სინათლის იმპულსი $l-v\Delta t_2$ მანძილს გაივლის, ამიტომ (ნახ. 13.1, მარჯვნივ)

$$c\Delta t_2 = l - v\Delta t_2, \Rightarrow \Delta t_2 = l/(c + v). \qquad (13.4)$$

სინათლის იმპულსი მთელი გზის გავლას, მარცხენა სარკიდან მარჯვენამდე და უკან, მოანდომებს დროს:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = 2lc/(c^2 - v^2), \Rightarrow l = (c\Delta t/2)(1 - v^2/c^2). \qquad (13.5)$$

თუ (13.5)-ში ჩავსვამთ დროის შენელების (12.1) ფორმულას და (13.2)-ს გავითვალისწინებთ, მივიღებთ (13.1) სიგრძის შემოკლების ფორმულას. ასეთი გამოყვანა ნათლად გვიჩვენებს, რომ სიგრძის შემოკლება დროის, ერთდროულობის ფარდობითობის გამოვლენაა.

2. სიგრძის შემოკლების შესწავლის შემდეგ შეგვიძლია თვისებრივად ვუპასუხოთ მ. 8.2-ის გაკვეთილში დასმულ კითხვაზე: როგორ ქმნის მოძრავი სოლენოიდი მაგნიტურთან ერთად ელექტრულ ველსაც?

ამოცანა 13.1.. უძრავი სადენი, რომელშიც მუდმივი დენი გადის, ელექტრონეიტრალურია და მხოლოდ მაგნიტურ ველს ქმნის. როგორ ახსნით, რომ სადენის გასწვრივ მოძრავ ინერციულ ათვლის სისტემაში ელექტრული ველიც არსებობს?

ა მ ო ხ ს ნ ა. უძრავი დენიანი სადენი ელექტრონეიტრალურია, რადგან მის ყოველ წერტილში – ფიზიკურად მცირე მოცულობაში – უარყოფითი ელექტრონებისა და დადებითი იონების ელექტრული მუხტის სიმკვრივეები მოდულით ტოლია. ახლა დენიანი სადენი მის გასწვრივ მოძრავი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ განვიხილოთ, ანუ, რაც იგივეა, თავის გასწვრივ მოძრავი დენიანი სადენი – ლაბორატორიული სისტემის მიმართ. მუხტი ინვარიანტია, ხოლო მოცულობა გასწვრივი ზომის შემოკლების გამო – ფარდობითი, ამიტომ მუხტის სიმკვრივეც ფარდობითია (იხ. ამოცანა 13.9). უძრავ გამტარში თავისუფალი ელექტრონები მოძრაობს, იონები კი უძრავია. მოძრავ სისტემაში, საზოგადოდ, იონებიცა და ელექტრონებიც მოძრაობს, მაგრამ განსხვავებული სიჩქარეებით. რადგან სიჩქარეები სხვადასხვაა, მუხტის სიმკვრივეები სხვადასხვანაირად შეიცვლება, დაირღვევა მათი მოდულთა ტოლობა და გამტარი ელექტრონეიტრალური აღარ იქნება.

ამრიგად, თუ უძრავი დენიანი გამტარი ელექტრონეიტრალურია და მხოლოდ მაგნიტურ ველს ქმნის, მოძრაობისას იგი აღარ არის ელექტრონეიტრალური და მაგნიტურთან ერთად ელექტრულ ველსაც ქმნის.

კითხვები, ამოცანები

13.2. სიგრძის შემოკლების ფორმულაში ჩასვით სიჩქარის მნიშვნელობები $v=c$, $v>c$ და ახსენით.

13.3. შეიძლება (13.5)-ში დროის შენელების ფორმულის გამოყენება?

13.4. სიგრძის შემოკლების ფორმულა ფარდობითობის თეორიის შექმნამდე მიიღეს. რატომ იყო მისი ინტერპრეტაცია მცდარი?

13.5. გაკვეთილში სიგრძის შემოკლების ფორმულა ლაბორატორიის დამკვირვებლის თვალსაზრისითაა გამოყვანილი. თუ დაეთანხმება მას ასტრონავტი (მოძრავი დამკვირვებელი)?

13.6. კიდევ როგორ შეიძლება ამოცანა 12.1-ში მიუონის „თვალსაზრისით" გავლილი მანძილის გამოთვლა?

13.7. ლაბორატორიასა და რაკეტაში სიჩქარის პარალელურად მოთავსებულია ერთნაირი სინათლის საათები. კოსმონავტის გაზომვის თანახმად მისი საათის სიგრძეა 1 მ. რას მიიღებს ლაბორატორიის დამკვირვებელი თავისი საათის სიგრძის გაზომვისას?

13.8. „*ძირს ფარდობითობის თეორია!*" ორი ერთნაირი ღეროდან ერთი მოთავსებულია რაკეტაში, მეორე – ლაბორატორიაში ფარდობითი სიჩქარის გასწვრივ. ლაბორატორიული დამკვირვებლის თვალ-

საზრისით მოკლეა კოსმონავტის ღერო, კოსმონავტის თვალსაზრისით – პირიქით. როგორ შეიძლება, რომ ერთნაირი ღეროებიდან ერთი მეორეზე ერთდროულად გრძელიც იყოს და მოკლეც? მაშასადამე, ფარდობითობის თეორია მცდარია. სად არის შეცდომა?

13.9. კუბი მოძრაობს თანაბარწრფივად თავისი წახნაგის მართობი სიჩქარით. როგორ შეიცვლება მისი მოცულობა? თუ კუბი ერთგვაროვნადაა დამუხტული, როგორ შეიცვლება მუხტის სიმკვრივე?

14. საათის პარადოქსი

1. საათის პარადოქსის გარჩევა ოპტიმალურია დროის შენელებისა და სიგრძის შემოკლების შესწავლის შემდეგ. აინშტაინის მიერ დროის ფარდობითობის დასაბუთებამ [9] თავდაპირველად სათანადო ყურადღება არ მიიქცია. მაგრამ როგორც კი ფრანგმა ფიზიკოსმა ლანჟევენმა დროის ფარდობითობა ცოცხალი ორგანიზმისათვის გამოიყენა, მაშინვე გაჩაღდა კამათი და წარმოიშვა საათის პარადოქსი. პოპულარულ ლიტერატურაში მას ტყუპების პარადოქსაც უწოდებენ. მისი აზრი შემდეგში მდგომარეობს. ვთქვათ, ერთ-ერთი ტყუპის ცალი (სიტყვაზე, B) გაფრინდა კოსმოსური ხომალდით. დედამიწაზე დარჩენილი A ტყუპისცალის თვალსაზრისით B-სთვის დრო ნელა მიმდინარეობს და მგზავრობის ბოლოს B უფრო ახალგაზრდა აღმოჩნდება. მაგრამ, თანახმად ფარდობითობის პრინციპისა, B-ს თვალსაზრისით მოძრაობს A, თვითონ კი უძრავია. ამიტომ დრო შენელებულია A-სთვის და მგზავრობის ბოლოს A უფრო ახალგაზრდა აღმოჩნდება. მაგრამ ხომ არ შეიძლება ერთი და იგივე ძმა ერთდროულად უფრო ახალგაზრდაც და ხნიერიც აღმოჩნდეს მეორეზე? აქედან ზოგიერთი ასკვნიდა, რომ ფარდობითობის თეორია არასწორია. სინამდვილეში არავითარი წინააღმდეგობა არ არსებობს და პარადოქსი წარმოიშობა ფარდობითობის თეორიის გაუგებრობის გამო. გავარჩიოთ იგი [29]-დან აღებული ამოცანის საფუძველზე.

2. ამოცანა 14.1. ვარსკვლავ არკტურამდე მანძილი 40,0 სინათლის წლის ტოლია. მისკენ კოსმოსურ ხომალდზე, რომლის სიჩქარეა $0{,}99c$, გაფრინდა ტყუპის ცალი დედამიწაზე დარჩენილი ძმისა. რამდენი წლით უმცროსი აღმოჩნდება იგი დედამიწაზე დაბრუნებისას დარჩენილ ძმასთან შედარებით (ორივეს თვალსაზრისით)?

ა მ ო ხ ს ნ ა. გავამარტივოთ ამოცანა და ჩავთვალოთ, რომ აჩქარებული მოძრაობის საერთო დრო სტარტზე, არკტურზე მობრუნებასა და

ფინიშზე უმნიშვნელოა თანაბარი ფრენის მთელ დროსთან შედარებით. მოსახერხებელია მანძილის გაზომვა სინათლის წელიწადით, რომელიც ტოლია სინათლის მიერ ერთ წელიწადში გავლილი მანძილისა.

დედამიწაზე დარჩენილი A ძმის თვალსაზრისით, მოგზაურობას 1%-ით მეტი დრო დასჭირდება, ვიდრე სინათლეს (v=0,99c):

$$t_L(A) = 80,0 \cdot 1,01 = 80,8 \text{ წ}$$

(ქვედა ინდექსი ათვლის სისტემას აღნიშნავს, ფრჩხილებში – დამკვირვებელს). დროის შენელების გამო, A ძმის თვალსაზრისით, B ძმისათვის ხომალდში ნაკლები დრო გაივლის:

$$t_R(A) = t_L(A)\sqrt{1-\beta^2} = 11,4 \text{ წ}$$

(ფესვი ისევე გამოითვლება, როგორც ამოცანა 12.1-ში).

გამოვთვალოთ მგზავრობის დრო B ძმის თვალსაზრისით. რადგან მას დედამიწა v=0,99c სიჩქარით შორდება, მანძილი შემოკლებას განიცდის:

$$l(B) = l\sqrt{1-\beta^2} = 40,0 \cdot 0,141 = 5,64 \text{ სინ.წ.}$$

(ყურადღება მიაქციეთ გამოთვლის სიზუსტეს). ამიტომ

$$t_R(B) = 2 \cdot 5,64 \cdot 1,01 = 11,4 \text{ წ.}$$

ხაზი გავუსვათ, რომ $t_R(B) = t_R(A)$ საკუთარი დრო ორივე დამკვირვებლისათვის ერთნაირია, ინვარიანტია.

ამრიგად, ორივე ძმის თვალსაზრისით, დედამიწაზე დარჩენილი ძმა 80,8-11,4=69,4 წლით ხნიერი აღმოჩნდება.

როგორ წარმოიშობა პარადოქსი?

არ გამოგვითვლია, რა დრო გავიდა დედამიწაზე B-ს თვალსაზრისით: $t_L(B)$. რადგან B-ს თვალსაზრისით თვითონ უძრავია, ხოლო A ძმა მის მიმართ მოძრაობს, ამიტომ დრო A ძმისათვის შენელდება და მოგზაურობას დასჭირდება

$$t_L(B) = t_R(B)\sqrt{1-\beta^2} = 1,6 \text{ წ. (?!)}$$

მაგრამ ხომ არ შეიძლება A ძმა ხნიერიც იყოს და ახალგაზრდაც! ფარდობითობის თეორიის განვითარების დასაწყისში მსგავსი არგუმენტები მოჰყავდათ (ვისაც ფიზიკა სათანადოდ არ ესმოდა) იმის „დასამტკიცებლად", რომ ეს თეორია მცდარია. ცხადია, უნდა გამოვიდეს, რომ

$$t_L(B) = t_L(A).$$

სად არის შეცდომა? ამოცანა სიმეტრიის საფუძველზე შევაბრუნეთ: A-ს თვალსაზრისით მოძრაობს B, ხოლო B-ს თვალსაზრისით მოძრაობს A, თანახმად ფარდობითობის პრინციპისა. ამასთანავე იგულისხმებოდა, რომ ინერციული ათვლის სისტემა ორია, ერთი დედამიწასთან დაკავშირებუ-

ლი, მეორე – ხომალდთან. მაგრამ ეს ასე არ არის. დროის, ერთდროულობის ფარდობითობის გამო ნებისმიერი ინერციული ათვლის სისტემის საათები მხოლოდ ერთმანეთთან არის სინქრონიზებული (და არა – სხვა სისტემის საათებთან). უკან დაბრუნებისას B ძმა იმყოფება ახალ ინერციულ ათვლის სისტემაში, არა იმაში, რომელშიც – ვარსკვლავისაკენ მგზავრობისას. მართალია, ხომალდი იგივეა, მაგრამ შეიცვალა საათების სინქრონიზაცია. მაშასადამე, გვაქვს სამი ინერციული სისტემა. ამოცანა ასიმეტრიულია და მისი შებრუნება ცალსახა შედეგს გვაძლევს, კერძოდ, თუ გავითვალისწინებთ სინქრონიზაციის ფარდობითობას ან სივრცე-დროის დიაგრამას ავაგებთ, ვიპოვით შეცდომას. ეს საკითხები სცილდება სასკოლო დონეს (თუმცა, არც ისე რთულია), ამიტომ გამოთვლას გამოვტოვებთ და პირდაპირ შედეგს მოვიყვანთ. „დაკარგული" დრო ტოლია (l გაზომილია სინათლის წელიწადით, თუ არადა c-ზე გაიყოფა):

$$2l\frac{v}{c} = 2 \cdot 40{,}0 \cdot 0{,}99 = 79{,}2 \text{ წ}.$$

ასე რომ, ორივე ძმის თვალსაზრისი ერთმანეთს ემთხვევა:

$$t_L(B) = 1{,}6 + 79{,}2 = 80{,}8 = t_L(A)!$$

ზოგჯერ პარადოქსს სხვანაირად ხსნიან. არკტურზე მობრუნებისას B ძმა აჩქარებულად მოძრაობს, აჩქარებული სისტემა კი არაინერციულია. ამიტომ უნდა გამოვიყენოთ ფარდობითობის ზოგადი თეორია, რომელიც საკმაოდ რთულია. გამოთვლები ამ შემთხვევაშიც სწორ შედეგს იძლევა, მაგრამ მთავარი სხვა არის. პარადოქსის გახსნისათვის სულაც არ არის აუცილებელი აჩქარებისა და ფარდობითობის ზოგადი თეორიის განხილვა.

ახლა ამოცანა ისე შევცვალოთ, რომ ორი ინერციული ათვლის სისტემა გვქონდეს. ნუ დაბრუნდება B ძმა უკან, კითხვა ასე დავსვათ: B ძმის ჩაფრენისას არკტურზე რომელი ძმა უფრო ახალგაზრდა (ხნიერი) აღმოჩნდება? ერთი შეხედვით, ამოცანა სიმეტრიული გახდა და მისი შებრუნება მართლაც მოგვცემს პარადოქსს. ზოგჯერ უმართებულოდ პასუხობენ, რომ საკითხის გარკვევისათვის აუცილებელია ძმების შეხვედრა. ეს ასე არ არის (ხომ შეიძლება B ძმას არკტურზე ცხოვრება მოეწონოს). მაგრამ ძმების ასაკის შედარებისათვის ორი საათი – ერთი A ძმისა და მეორე B ძმისა – საკმარისი აღარ არის. არკტურზე უნდა იყოს საათი, სინქრონიზებული დედამიწის A საათთან (აინშტაინის მეთოდით). ვხედავთ, რომ ამოცანა მაინც ასიმეტრიულია: პასუხის გასაცემად B საათის ჩვენება უნდა შევადაროთ სინქრონულად მომუშავე ორი, დედამიწისა და არკტურის, საათის ჩვენებას. ამიტომ ამოცანის შებრუნება კვლავ ცალსახა

პასუხს იძლევა: ყოველთვის ჩამორჩება ის საათი, რომლის ჩვენებასაც ვადარებთ მეორე ინერციული ათვლის სისტემის ორი სინქრონიზებული საათის ჩვენებას (მიუხედავად იმისა, რომელს ჩავთვლით უძრავად).

15. სიჩქარეთა რელატივისტური შეკრება

1. განსახილველ საკითხს რთული მეთოდური პრობლემები უკავშირდება. სამწუხაროდ, საკმაოდ ზედაპირული, ფორმალური ტრადიცია დამკვიდრდა სიჩქარეთა რელატივისტური შეკრების, ანუ სიჩქარეთა გარდაქმნის, გადაცემისა როგორც საშუალო, ასევე უმაღლეს სკოლაში. საქმე ის არის, რომ სახელმძღვანელოებში (ძნელიც კი არის გამონაკლისის დასახელება), როგორც წესი, ყურადღება გამახვილებულია მხოლოდ იმაზე, რომ სიჩქარეთა გარდაქმნის ფორმულა, რასაკვირველია, ეთანხმება სინათლის სიჩქარის ინვარიანტობას. პოპულარულად საკითხი ასე გადაიცემა: ფარდობითობის თეორიაში $c+c$ არ უდრის $2c$-ს, არამედ – ისევ c-ს. მაგრამ ეს ყოველთვის ასე არ არის, საჭიროა დაზუსტება, რაც სახელმძღვანელოებს აკლია. $c \pm v$ გამოსახულება აინშტაინმა თავისი პირველი სტატიის [9] დასაწყისშივე გამოიყენა, მშვენივრადაა საკითხი გადმოცემული [27] წიგნშიც. რატომ დარჩა სასწავლო-მეთოდური ლიტერატურის მიღმა (გლობალურად) ეს ნატიფი მხარე საკითხისა, სრულიად გაუგებარია. უამისოდ შეუძლებელია გავიგოთ განსხვავება სიჩქარეთა გარდაქმნასა და მოცემულ ათვლის სისტემაში სიჩქარეთა შეკრებას შორის (როდესაც შესაძლებელია $c+c=2c$).

თანამიმდევრულად განვიხილოთ თემა. ჯერ ვუპასუხოთ კითხვაზე: როგორ გამოვიყვანოთ სიჩქარეთა რელატივისტური შეკრების ფორმულა? ზემოთ ხაზგასმით ითქვა, რომ აუცილებლად მიგვაჩნია სასკოლო კურსში ფარდობითობის თეორიის ძირითადი ფორმულების გამოყვანა. მაგრამ მოცემული საკითხი გამონაკლისია. ამა თუ იმ სახით, ფაქტობრივად, სიჩქარეთა რელატივისტური შეკრების წესის მიღების ორი გზა არსებობს: ან ლორენცის გარდაქმნათა, ან სივრცე-დროის დიაგრამის გამოყენება. ორივე ეს გზა საკმაოდ გრძელია და ჩვენი გამოცდილებით – არაეფექტური. ამიტომ უარი ვთქვით გამოყვანაზე ფაკულტატიური წესითაც კი. კიდევ ერთი გამარტივების თაობაზე. სიჩქარის ყველა მდგენელის გარდაქმნის განხილვა რთული გამოდგა. ამის გამო შემოვისაზღვრებით ერთგანზომილებიანი ამოცანით, როდესაც სიჩქარეები პარალელურია – მხოლოდ თითო გეგმილი გააჩნიათ. ჩვენთვის გაკვეთილის ასეთი განტ-

ვირთვა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რათა შევძლოთ ზემოაღნიშნული „დაკარგული“ სიზუსტისა და სიღრმის დაბრუნება-დამკვიდრება.

მოვიყვანოთ სიჩქარეთა რელატივისტური შეკრების, ანუ სიჩქარეთა გარდაქმნის, ფორმულა იმ შემთხვევისათვის, როდესაც სიჩქარეები პარალელურია X (და X') ღერძისა. მისი ჩაწერა უმჯობესია გეგმილებისათვის (და არა მოდულებისათვის), რათა ერთი ფორმულით მოვიცვათ ერთ და საპირისპირო მხარეს მოძრაობა:

$$v_x = \frac{v_x' + v_s}{1 + v_x' v_s / c^2}. \tag{15.1}$$

$\mathbf{v}_s$ და X (X') ღერძი ერთ მხარესაა მიმართული, ამიტომ $v_{s\,x}\equiv v_s$. რადგან (15.1) ფორმულა გამოუყვანლად მოგვყავს, აუცილებელია თითოეული წევრის შინაარსის ზუსტი განმარტება. გამოთქმის ფორმა შეიძლება სხვადასხვანაირი იყოს, რაც ზოგჯერ შინაარსს ფარავს.

$\mathbf{v}$ (v_x) არის სხეულის სიჩქარე უძრავი (ლაბორატორიული) ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ ანუ სიჩქარე უძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით. ამ სიჩქარეს ზომავს უძრავი დამკვირვებელი თავისი სისტემის მასშტაბითა და სინქრონიზებული საათებით.

$\mathbf{v}'$ (v_x') არის სხეულის სიჩქარე მოძრავი (რაკეტა) ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ ანუ სიჩქარე მოძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით. ამ სიჩქარეს ზომავს მოძრავი დამკვირვებელი თავისი სისტემის (რაკეტის) მასშტაბითა და სინქრონიზებული საათებით.

$\mathbf{v}_s$ (v_s) – ინერციულ ათვლის სისტემათა ფარდობითი მოძრაობის სიჩქარე. მისი გაზომვისას ორივე დამკვირვებელი იღებს მოდულით ერთნაირ და მიმართულებით საპირისპირო სიდიდეს.

უთუოდ, საჭიროა შებრუნებული გარდაქმნის ფორმულაც: შტრიხიანი სიჩქარე უშტრიხო სიჩქარით გამოვსახოთ. მისი მიღება (15.1)-დან ალგებრულად შეიძლება. მოსწავლეებს უნდა გავაცნოთ სხვა, ფიზიკური მიდგომა. მსგავს შემთხვევებში ფიზიკოსი ალგებრას არ იყენებს. ფარდობითობის პრინციპის თანახმად, უშტრიხო სისტემა (ლაბორატორია) შტრიხიანის (რაკეტის) მიმართ საპირისპირო მიმართულებით $-v_s$ სიჩქარით მოძრაობს. ამიტომ, თუ (15.1)-ში v_s შევცვლით $-v_s$-ით და გადავსვამთ შტრიხებს, მივიღებთ შებრუნებული გარდაქმნის ფორმულას:

$$v_x' = \frac{v_x - v_s}{1 - v_x v_s / c^2}. \tag{15.2}$$

(15.1) და (15.2) ფორმულების ათვისება სხვადასხვა შემთხვევაში მათი გამოყენებით ხდება. ცხადია, უპირველესად არჩევნებენ, რომ მათგან არ მიიღება c-ზე მეტი სიჩქარე. ვთქვათ, $v_x'=c$, მაშინ (15.1)-დან $v_x=c$!

$v<<c$ მცირე სიჩქარეებისათვის მნიშვნელში წილადის უგულებელყოფა შეიძლება და გალილეის სიჩქარეთა შეკრების წესს მივიღებთ:

$$v_x = v_x' + v_s . \qquad (15.3)$$

ითვლება, რომ ამით ამოიწურება სიჩქარეთა გარდაქმნის შინაარსი. დავრწმუნდეთ, რომ ეს ასე არ არის [30].

(15.3) კერძო შემთხვევაა (15.1)-ისა, მაგრამ მათ შორის შინაარსობრივად მნიშვნელოვანი განსხვავებაა. არარელატივისტურ ფიზიკაში არავითარი მნიშვნელობა არა აქვს სიჩქარეები (15.3)-ში ერთი დამკვირვებლის, თუ სხვადასხვა თვალსაზრისითაა აღებული. მიზეზი დროის აბსოლუტურობა არის. მაგრამ დრო ფარდობითია და ეს ორი შემთხვევა რელატივისტურ ფიზიკაში ერთმანეთისაგან მკაფიოდ უნდა განვასხვაოთ. სიჩქარეთა რელატივისტური შეკრება, ანუ სიჩქარეთა გარდაქმნა, მაშინ „მუშაობს", როდესაც სიჩქარეები გაზომილია *სხვადასხვა* ინერციულ ათვლის სისტემაში (გაიხსენეთ თითოეული წევრის შინაარსი). მაგრამ რა მოხდება, თუ დამკვირვებელი ყველა სიჩქარეს თავისი *ერთი* ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ განიხილავს და შეკრებს? ასეთი რამ ზოგჯერ საჭიროცაა, რამეთუ ამოცანის ამოხსნას აიოლებს. ერთი მსგავსი შემთხვევა უკვე გვქონდა, მაგრამ დუმილით ავუარეთ გვერდი. ახლა დადგა დრო მისი გარჩევისა.

უძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით, სიგრძის შემოკლების ფორმულის გამოყვანისას გამოვთვალეთ დრო, საჭირო სინათლის იმპულსისათვის v სიჩქარით მოძრავი ღეროს სარკეებს შორის l მანძილის წინ და უკან გასავლელად. ამოვწეროთ (13.3) და (13.4) სათანადო ფორმულები:

$$\Delta t_1 = \frac{l}{c-v}, \quad \Delta t_2 = \frac{l}{c+v}. \qquad (15.4)$$

I შემთხვევაში სინათლე ღეროს მოძრაობის მიმართულებით ვრცელდება, II-ში – საპირისპიროდ. ეს ფორმულები შეიძლება უშუალოდ დავწეროთ, გაკვეთილში მოყვანილი თვალსაჩინო გამოყვანის გარეშე, ე. ი. უფრო მარტივად ამოვხსნათ ამოცანა. უძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით, ღერო მის მიმართ v სიჩქარით მოძრაობს, ხოლო სინათლე – c სიჩქარით, ამიტომ *მისივე თვალსაზრისით*, სინათლე ღეროს მიმართ I შემთხვევაში c-v, ხოლო II-ში – $c+v$ ფარდობითი სიჩქარით ვრცელდება. თუ ღეროს l სიგრძეს ფარდობით სიჩქარეზე გავყოფთ, პასუხს პირდაპირ მივიღებთ.

ეწინააღმდეგება მოყვანილი მსჯელობა ფარდობითობის თეორიას – იმას, რომ სინათლის სიჩქარე ინვარიანტული, ზღვრული სიჩქარეა? არა. ღეროს მიმართ სინათლის ფარდობითი $c \pm v$ სიჩქარე, განხილული *ერთი* უძრავი დამკვირვებლის მიერ, წმინდა წარმოსახვითი, კინემატიკური სიჩქარეა – მისი უშუალო გაზომვა შეუძლებელია, რამეთუ არ წარმოადგენს ურთიერთქმედების გადაცემის სიჩქარეს. ასეთ სიჩქარეებს ფარდობითობის თეორია არ შემოსაზღვრავს, მათ შეიძლება ნებისმიერი მნიშვნელობა ჰქონდეთ (მაგალითები ადრეც განვიხილეთ). ეს არ არის მხოლოდ ფორმალური სიჩქარეები, გარჩეული მაგალითი თვალსაჩინოდ გვიჩვენებს, რომ მათი გამოყენება სასარგებლოა. უფრო მეტიც, ფიზიკაში ძალაუნებურად გვიწევს c სინათლის სიჩქარეზე მეტი სიჩქარეების განხილვა (ასეთია, მაგალითად, თვით სინათლის ფაზური სიჩქარე გარემოში, რომლის გარდატეხის მაჩვენებელი $n<1$). თუ ასეთი დასახვეწი მხარეები დროზე არ „გამოვამზეურეთ", არასწორი შეხედულებები ყალიბდება, რაც ძალზე უშლის ხელს დამწყებს ფიზიკის საფუძვლების შეგნებულ დაუფლებაში.

შევაჯამოთ. თუ გვინდა დავაკავშიროთ სიჩქარეები, გაზომილი სხვადასხვა ინერციულ ათვლის სისტემაში, მაშინ უნდა ვისარგებლოთ სიჩქარეთა რელატივისტური შეკრების, ანუ სიჩქარეთა გარდაქმნის, წესით. თუ ყველა სიჩქარე – როგორც შესაკრები, ასევე მათი ჯამი – განიხილება მხოლოდ ერთი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ, მაშინ უნდა გამოვიყენოთ სიჩქარეთა შეკრების ჩვეულებრივი პარალელოგრამის წესი. ურიგო არ იქნება ტერმინოლოგიის განსხვავებაც: პირველ შემთხვევაში – „სიჩქარეთა გარდაქმნა", მეორეში – „სიჩქარეთა შეკრება" (თუმცა ეს დამკვიდრებული არ არის). მივაქციოთ ყურადღება, რომ პირველ შემთხვევაში საუბარია გაზომილ (გაზომვად) სიჩქარეებზე, მეორე შემთხვევაში ვსარგებლობთ გამოთქმით „სიჩქარეები განიხილება ერთი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ", ვინაიდან ყველა სიჩქარის უშუალო გაზომვა შეუძლებელია (მაგრამ შეიძლება გამოთვლა).

კიდევ ერთხელ გვინდა აღვნიშნოთ, რომ სიღრმისეულ წვდომაზე ზრუნვა კი არ ართულებს სწავლას, არამედ მნიშვნელოვნად ზრდის დაინტერესებასა და გაგებას.

2. რადგან სიჩქარეთა გარდაქმნის ფორმულა არ გამოგვყავს, მეთოდური და ფიზიკური ანალიზი სრულად გადაფარავს გაკვეთილის შინაარსს და მის გადაცემაზე აღარ შევჩერდებით. განვიხილოთ ამოცანები.

ამოცანა **15.1.** ამჩქარებელმა რადიოაქტიურ ბირთვს $0,4c$ სიჩქარე მიანიჭა, ხოლო გამოტყორცნის მომენტში ბირთვმა მოძრაობის საპირის-

პირო მიმართულებით ელექტრონი გამოასხივა ამჩქარებლის მიმართ 0,7c სიჩქარით. რას უდრის ელექტრონის სიჩქარე ბირთვის მიმართ?

ა მ ო ხ ს ნ ა. ასეთი ამოცანა ტიპურია სიჩქარეთა რელატივისტური შეკრების, გარდაქმნის წესის გამოყენებაზე. მაგრამ კითხვა მთლად გააზრებულად არ არის დასმული. ზემოთქმულიდან გამომდინარე, ამოცანას ორი ამონახსენი აქვს, კრებულებში კი, როგორც წესი, ერთი პასუხია.

თუ ბირთვის მიმართ ელექტრონის სიჩქარე ბირთვთან დაკავშირებული, მასთან ერთად მოძრავი ინერციული დამკვირვებლის თვალსაზრისით გვაინტერესებს, მაშინ სიჩქარეთა რელატივისტური გარდაქმნის წესი უნდა გამოვიყენოთ. მივმართოთ X (X') ღერძი ბირთვის მოძრაობის მხარეს, მაშინ v_s=0,4c, v_x=–0,7c (ელექტრონი საპირისპირო მიმართულებით მოძრაობს) და (15.2)-დან მივიღებთ:

$$v'_x = \frac{-0,7c - 0.4c}{1 + 0,7 \cdot 0.4} = -0,9c.$$

$v'<c$ – ასეც უნდა იყოს ფარდობითობის თეორიის თანახმად. ნიშანი „-" გვიჩვენებს, რომ ელექტრონი ბირთვის მიმართ X (X') ღერძის მიმართულების საპირისპირო მხარეს მოძრაობს.

ბირთვის მიმართ ელექტრონის ფარდობითი სიჩქარე გამოვთვალოთ (მაგრამ უშუალოდ ვერ გავზომავთ) ლაბორატორიული (უძრავი) სისტემის დამკვირვებლის თვალსაზრისით. მაშინ არ გვჭირდება ფარდობითობის თეორია, (15.3)-დან

$$v'_x = v_x - v_s = -1,1c,$$

რაც (1.1) სიჩქარეთა შეკრების პარალელოგრამის წესის კერძო შემთხვევაა. $v'>c$ არ ეწინააღმდეგება ფარდობითობის თეორიას, როგორც ზემოთ ავხსენით. ასეთი საინტერესო ამონახსნის „დაკარგვა" ფიზიკის სწავლებას ფორმალურს ხდის.

კითხვები, ამოცანები

15.2. დედამიწაზე მყოფი დამკვირვებლისათვის ორი გალაქტიკა ურთიერთსაპირისპიროდ მოძრაობს თითოეული $c/2$ სიჩქარით. რას უდრის გალაქტიკების ფარდობითი სიჩქარე გალაქტიკის დამკვირვებლის თვალსაზრისით?

15.3. ორი ფოტონი ერთმანეთის შემხვედრად მოძრაობს. რას ეთანაბრება მათი ფარდობითი სიჩქარე?

16. რელატივისტური იმპულსი

1. რელატივისტური დინამიკის შესწავლისას, ცხადია, საკვანძო მნიშვნელობა აქვს ისეთი ფუნდამენტური სიდიდეების განსაზღვრას, როგორიცაა მასა, იმპულსი, ენერგია და მუდმივობისა და მოძრაობის კანონების ჩამოყალიბებას. საჭიროა თავიდანვე ნათლად გამოვყოთ იმ ამოცანათა წრე, რომლის საფუძველზეც შეიძლება რელატივისტური დინამიკის შესწავლა. სინათლის – ურთიერთქმედების გადაცემის – სიჩქარის სასრულობა გარდაუვალად იძლევა ველის ფიზიკური რეალობის ცნებას (იხ. მ. 7.3): ჩაკეტილ სისტემაში მუდმივია ნაწილაკებისა და ველის სრული იმპულსი, ენერგია, იმპულსის მომენტი. მაგრამ რელატივისტურ მექანიკაში მხოლოდ ნაწილაკები გვაინტერესებს. როგორ განვიხილოთ ისინი ველის გარეშე, რაც, მკაცრად თუ ვიტყვით, ურთიერთქმედების უგულებელყოფას ნიშნავს? ამის გაკეთება მხოლოდ გარკვეული მიახლოებით შეიძლება. აი, რატომ არის აუცილებელი რელატივისტურ მექანიკაში განსახილველ ამოცანათა კლასის შემოსაზღვრა. სამწუხაროდ, ამას ყურადღება არ ექცევა სასწავლო-მეთოდურ ლიტერატურაში (რაც ფორმალიზმის შედეგია, რამეთუ არ განიხილება ველის ფიზიკური რეალობის ცნება). უპრიანია ნაწილაკთა (სხეულთა) დაჯახების შესწავლა: არსებითი ურთიერთქმედება მჟღავნდება მხოლოდ უშუალოდ დაჯახებისას, ძალიან მცირე ხნის განმავლობაში, დანარჩენ დროს კი ურთიერთქმედება, ე. ი. ველის ენერგია და იმპულსი, შეიძლება უგულებელვყოთ. ამიტომ, უშუალოდ დაჯახების გარდა, შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ მუდმივია მხოლოდ ნაწილაკების ჯამური ენერგია და იმპულსი. ამიტომაც ემყარება ნებისმიერი წიგნი რელატივისტურ მექანიკაში ნაწილაკთა დაჯახების ამოცანებს (თუმცა მიზეზი იშვიათად თუ არის ახსნილი).

ფარდობითობის თეორიის სწავლების ერთ-ერთი ძირითადი ხარვეზი, როგორც არაერთხელ აღვნიშნეთ, არის მოძველებული, არქაული ინტერპრეტაციის დაკონსერვება სასწავლო-მეთოდურ ლიტერატურაში. მეცნიერებმა კარგა ხანია უარყო იგი, მაგრამ უცნაურია, რომ თანამედროვე თვალთახედვა ჯერ კიდევ სათანადოდ არ ასახულა სასწავლო ლიტერატურაში, პრაქტიკულად მთელი მსოფლიოს მასშტაბით [22]. განსაკუთრებით კი მეთოდური ლიტერატურა ჩამორჩა. უპირველესად, ეს მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულებასა და მასთან დაკავშირებულ ფუნდამენტურ საკითხებს ეხება. გავაშუქოთ პრობლემის ფიზიკური არსი და მეთოდურ მხარესაც მივხედოთ [30].

იმპულსის ნიუტონისეული განსაზღვრება ასეთია:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} = m\frac{d\mathbf{r}}{dt}. \qquad (16.1)$$

m არის (4.1)-ის მიხედვით განსაზღვრული მასა, $\mathbf{v}$ – სხეულის სიჩქარე, რომელიც ტოლია $\mathbf{r}$ რადიუს-ვექტორის წარმოებულისა t დროით (გაკვეთილში წარმოებულის ცნებას არ ვიყენებთ). ცდა გვიჩვენებს, რომ ჩაკეტილი სისტემის სხეულთა იმპულსების ჯამი, განსაზღვრული (16.1)-ის მიხედვით, მუდმივია მხოლოდ $v<<c$ მცირე სიჩქარეების შემთხვევაში. ამიტომ დიდი სიჩქარეებისათვის (16.1) განსაზღვრება აღარ გამოდგება, თავს იჩენს მისი უზუსტობა. ფარდობითობის თეორია გვაძლევს, რომ სხეულის იმპულსი შემდეგნაირად უნდა განისაზღვროს:

$$\mathbf{p} = m\frac{d\mathbf{r}}{d\tau}, \qquad (16.2)$$

სადაც τ არის საკუთარი, ე. ი. ნაწილაკთან (სხეულთან) ერთად მოძრავი საათით ათვლილი, დრო, m – მასა ნიუტონისეული გაგებით. თუ გამოვიყენებთ საკუთარ და უძრავი სისტემის (ლაბორატორიულ) დროებს შორის კავშირს – იხ. (12.1) ფორმულა, მივიღებთ:

$$\mathbf{p} = \gamma m\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \gamma m\mathbf{v}. \qquad (16.3)$$

ცდა გვიჩვენებს, რომ ჩაკეტილი სისტემის ნაწილაკთა იმპულსების ჯამი, განსაზღვრული (16.3)-ის მიხედვით, რელატივისტური სიჩქარეებისათვის მუდმივია. მცირე სიჩქარეებისათვის (16.3)-დან (16.1) მიიღება, ვინაიდან $\gamma \to 1$ (16.3)-ში γ-ს არსებობა უშუალოდ გვიჩვენებს, რომ იმპულსის განსაზღვრების რელატივისტური დაზუსტება დაკავშირებულია დროის ფარდობითობასთან, ხოლო მასა უნდა განვსაზღვროთ როგორც ინვარიანტული სიდიდე, დამოუკიდებელი სხეულის სიჩქარეზე. ნათელია, (4.1) განსაზღვრება უნდა შეიცვალოს მასის ზუსტი განსაზღვრებით, რომლის არსი იგივე რჩება: მასა განისაზღვრება იმპულსის მუდმივობის კანონის მეშვეობით. გამეორება რომ არ გამოგვივიდეს, მასის მარტივ განსაზღვრებას ქვემოთ, გაკვეთილში, გავეცნობით.

ნიუტონის მეორე კანონის რელატივისტური სახეა

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}, \qquad (16.4)$$

სადაც იმპულსი (16.3)-ით განისაზღვრება (სხვათაშორის, ნიუტონმა მეორე კანონი (16.4) სახით მოგვცა; $m\mathbf{a} = \mathbf{F}$ ჩაწერა, რომელიც მხოლოდ $v<<c$ შემთხვევაშია სწორი, მოგვიანებით გავრცელდა).

მასის განსაზღვრება, როგორც ინვარიანტული სიდიდისა, ძალზე მოსახერხებელია, აქვს ღრმა ფიზიკური შინაარსი და საკმაო ხანია, რაც მეცნიერებაში დამკვიდრდა. მაგრამ მეთოდურ და სასწავლო ლიტერატურაში ძველებური მდგომარეობა რჩება.

ისტორიულად (16.3) გამოსახულების სხვა, მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების, ინტერპრეტაცია იქნა არჩეული. ეს ისტორია ფარდობითობის თეორიის შექმნამდე გვარიანი ხნით ადრე დაიწყო, როდესაც ტომსონმა 1881 წელს ელექტრომაგნიტური მასის ცნება შემოიტანა. მან განიხილა $v<<c$ მცირე სიჩქარით მოძრავი ელექტრონი, როგორც პატარა დამუხტული სფერო და მისი ელექტრომაგნიტური ენერგია გამოთვალა. ელექტრული ველის ენერგია v-ზე არ არის დამოკიდებული, მუდმივია, და მას არ შეაქვს ფიზიკური წვლილი მექანიკურ და ელექტრომაგნიტურ ენერგიათა ჯამში (ენერგია მუდმივის სიზუსტით განისაზღვრება). მხოლოდ მაგნიტური ველის ენერგიის გათვალისწინებაა საჭირო, რომელიც v^2-ზეა დამოკიდებული. კინეტიკურ ენერგიაზე მისი დამატება გვაძლევს, თითქოს ელექტრონის ინერტული მასა მოძრაობის შედეგად გაიზარდა ელექტრომაგნიტური მასით. ასე წარმოიშვა წარმოდგენა, რომ დამუხტული ნაწილაკის მასა მოძრაობისას იზრდება. მაგრამ მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულება ჯერ კიდევ არ განიხილება, რადგან ტომსონისეული მასის ნამატი მუდმივია. მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების ცნება 1899 წელს შემოიტანა ლორენცმა. შემდეგ ეს საკითხი ინტენსიურად შეისწავლებოდა როგორც თეორიულად, ასევე ექსპერიმენტულად. დღეს ამას მხოლოდ ისტორიული მნიშვნელობა აქვს. გვჭირდება მარტო ის, რომ „სწორი“ ფორმულა ლორენცმა 1904 წელს მიიღო (რადგან მხოლოდ $m\mathbf{a}=\mathbf{F}$ არარელატივისტური განტოლება იყო ცნობილი, მასა სიჩქარის მიმართულებაზეც აღმოჩნდა „დამოკიდებული“ და სიჩქარისადმი განივი და გასწვრივი მასების ცნება შემოიტანეს. ფორმულა განივ მასას ეხება):

$$m_v = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} = \gamma m_0 . \tag{16.5}$$

m_0 არის უძრავი სხეულის მასა, ანუ (4.1)-ით განსაზღვრული ნიუტონისეული მასა, m_v – v სიჩქარით მოძრავი სხეულის მასა (v ინდექსს ვიყენებთ, რათა იგი ჭეშმარიტი მასისაგან განვასხვაოთ). ამრიგად, ფარდობითობის თეორიამდე ფიზიკაში დამკვიდრდა მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების ინტერპრეტაციის ტრადიცია.

აინშტაინმა პირველ სტატიაში [9] ვერ მიიღო (16.5) ფორმულა, რადგან უხერხულად აირჩია ელექტრომაგნიტური ძალის გამოსახულება

მოძრაობის არარელატივისტურ განტოლებაში. მაგრამ მდგომარეობა მალე გამოსწორდა, ფარდობითობის თეორიაში დადგინდა მოძრაობის რელატივისტური განტოლების სახე მასის, როგორც ერთი სკალარული სიდიდის, ცნებით (მოიხსნა საჭიროება განივი და გასწვრივი მასების ხელოვნურად შემოტანისა) და მიღებულ იქნა (16.5) ფორმულა. ამით გაგრძელდა მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების ინტერპრეტაციის ტრადიცია, დამკვიდრდა ტერმინები m_0 უძრაობის მასისა და m_v მოძრაობის, რელატივისტური მასისა (ინდექსის გარეშე). ფორმალურად შენარჩუნებულ იქნა იმპულსის ნიუტონისეული განსაზღვრება $\mathbf{p}=m_v\mathbf{v}$, ხოლო ენერგიისათვის აინშტაინის ცნობილმა ფორმულამ $E=m_vc_2$ სახე მიიღო (სამწუხაროდ, ინდექსის გარეშე იგი დღესაც პოპულარული რჩება).

მაგრამ თანდათან გამოირკვა, რომ $m_v=\gamma m_0$ რელატივისტური მასა ძალზე მოუხერხებელი სიდიდეა, რამეთუ არ არის ინვარიანტი და ვერ ხერხდება მასში უშუალო ფიზიკური შინაარსის ჩადება. თუ გავიზიარებთ მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების ინტერპრეტაციას, ფაქტობრივად, უპასუხოდ რჩება რთული კითხვები: თუ მასა ნივთიერების რაოდენობის ზომაა, გაუგებარია, რატომ უნდა იყოს იგი სიჩქარეზე დამოკიდებული? თუ მასა ინერტულობის ზომაა და რადგან ინერტულობა სხეულის თანდაყოლილი თვისებაა (ნიუტონისეული გამოთქმა), გაუგებარია, რატომ უნდა იყოს ეს თვისება მოძრაობაზე დამოკიდებული?

როგორ გავარკვიოთ, რომელი ინტერპრეტაციაა მისაღები? ამოსავალი უნდა იყოს სიღრმისეული ურთიერთკავშირი *მასას, იმპულსსა და ენერგიას* შორის. ასეთი გზა დასახა აინშტაინმა ჯერ კიდევ 1921 წელს [31], როდესაც ენერგია-იმპულსის ოთხვექტორი ჩაწერა საკუთარი დროის მეშვეობით რელატივისტური მასის ცნების გარეშე (გასაგები რომ იყოს, იმპულსისათვის ეს ნიშნავს (16.2) განსაზღვრებას, ენერგიის თაობაზე – შემდეგ). საგულისხმოა ფარდობითობის თეორიის შემდეგი თანაფარდობა ენერგიას, იმპულსსა და მასას შორის:

$$\left(\frac{E}{c^2}\right)^2-\left(\frac{p}{c}\right)^2=m^2. \qquad (16.6)$$

(16.6) ცხადი სახით არ შეიცავს γ კოეფიციენტს და მიუთითებს, რომ სწორედ m ინვარიანტული სიდიდე არის მასა. მეცნიერებამ დიდი ხანია მიიღო ასეთი ინტერპრეტაცია. დროა, რომ სასწავლო და მეთოდურ ლიტერატურაშიც აისახოს ეს.

ზემოთ, სათანადო საკითხთა განხილვისას, რამდენიმე მიზეზი დავასახელეთ, დამამუხრუჭებელი თანამედროვე თვალსაზრისის დამკვიდრებისა

ფიზიკის სასწავლო-მეთოდურ ლიტერატურაში: თვით სწავლების კონსერვატიული ხასიათი, სიღრმისეული წვდომის ნაცვლად ზედაპირული, ფორმალური მიდგომა... როგორც ჩანს, მნიშვნელოვანია ფსიქოლოგიური ბარიერიც. როდესაც ამდენ წიგნში – გამონაკლისი მწირია – ერთი და იგივე წერია, რომ მასა სიჩქარეზეა დამოკიდებული, მოსწავლე, სტუდენტი, მასწავლებელი (სამწუხაროდ, არა მხოლოდ ისინი) მას მოძველებულად, მეცნიერების გუშინდელ დღედ, ველარ აღიქვამს. შეიძლება ითქვას, რომ ამის გამოსასწორებლად მეთოდურ ლიტერატურაში თითქმის არაფერი არ გაკეთებულა. განსაკუთრებით აძლიერებს უნდობლობას შემდეგი. ნაირ-ნაირ წიგნებში ერთხმად ამტკიცებენ, რომ მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების (16.5) ფორმულა კარგადაა დადასტურებული ექსპერიმენტულად. კი, მაგრამ, თუკი მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების ინტერპრეტაცია მიუღებელია, როგორღა დასტურდება იგი ექსპერიმენტულად? როგორ არ ვენდოთ ექსპერიმენტულ შედეგებს? აი, კითხვები, რომლებიც ბევრს ებადება, პასუხს კი ვერ იღებენ. მეთოდურ და სასწავლო ლიტერატურაში ამაზე პრაქტიკულად არაფერია ნათქვამი.

(16.5) ფორმულის ექსპერიმენტულად შესამოწმებლად სამივე სიდიდე: m, v, m_v დამოუკიდებლად უნდა გაიზომოს. მაგრამ როგორ გავზომოთ რელატივისტური მასა, თუ მას უშუალო ფიზიკური შინაარსი არა აქვს და ამ ცნების უარყოფის შემდეგ $m_v=\gamma m$ გამოსახულება, უბრალოდ, მათემატიკურ აღნიშვნად გადაიქცა? თითქოს დაუჯერებელია, მაგრამ რელატივისტური მასა *უშუალოდ* მართლაც არავის არ გაუზომავს იმ უბრალო მიზეზის გამო, რომ ეს შეუძლებელია. უშუალოდ გაზომვასა და გამოთვლას შორის დიდი განსხვავებაა. მაშ, რა დამოკიდებულებას ამოწმებდნენ ექსპერიმენტულად?

ექსპერიმენტები მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების გასარკვევად ელექტრულ და მაგნიტურ ველებში დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობაზე ტარდებოდა. პირველი ექსპერიმენტული შრომა დიდი სიჩქარეებისას მასის გაზრდის „დადგენის" თაობაზე 1901 წელს გამოჩნდა (კაუფმანი). იმ დროისათვის (16.5) ფორმულა ჯერ კიდევ არ იყო გამოყვანილი, არც მოძრაობის რელატივისტური განტოლების სახე იყო ცნობილი და, გასაგებია, ვერ გაირკვა, რომ ექსპერიმენტული შედეგები მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულებას კი არ ადასტურებდა, არამედ – არარელატივისტური განტოლების გამოყენების უსაფუძვლობას. შემდეგ კი, როდესაც ფარდობითობის თეორია ჩამოყალიბდა, უმართებულო ინტერპრეტაციის გამო კვლავ გაურკვეველი დარჩა, რომ, ფაქტობრივად, ცდით მოწმდებოდა γ

რელატივისტური კოეფიციენტის დამოკიდებულება სიჩქარეზე და ის, რომ (16.3) რელატივისტური იმპულსი γ-ს შეიცავს. ეს კი სულაც არ ნიშნავს, რომ მასა სიჩქარეზეა დამოკიდებული. ახლა ამ ზოგად შენიშვნას დავეჯერდეთ და თვალსაჩინოდ გაკვეთილში განვიხილოთ.

2. გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. იმპულსის მუდმივობის კანონი ბუნების ფუნდამენტური კანონია. $\mathbf{v}$ სიჩქარით მოძრავი m მასის სხეულის იმპულსი მექანიკაში ასე განვსაზღვრეთ:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} = m\frac{\Delta \mathbf{s}}{\Delta t}, \tag{16.7}$$

სადაც $\Delta \mathbf{s}$ არის Δt დროში შესრულებული გადაადგილება. გავიხსენოთ მასის განსაზღვრებაც:

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{a_1}{a_2}. \tag{16.8}$$

(16.8)-ის თანახმად, მასა სიჩქარეზე დამოუკიდებელი სიდიდეა.

ცდა გვიჩვენებს, რომ დიდი, სინათლის სიჩქარის მახლობელი, სიჩქარეებისათვის ჩაკეტილი სისტემის სხეულთა იმპულსების ჯამი, განსაზღვრული (16.7)-ის მიხედვით, მუდმივი აღარ არის. ეს ნიშნავს, რომ (16.7) განსაზღვრება ზუსტი არ არის, ვარგისია მხოლოდ $v<<c$ მცირე სიჩქარეებისათვის და დიდი სიჩქარეებისათვის დაზუსტებას საჭიროებს. ფარდობითობის თეორია ასე აზუსტებს იმპულსის განსაზღვრებას:

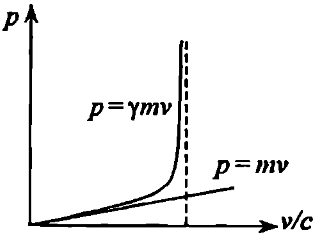
$$\mathbf{p} = m\frac{\Delta \mathbf{s}}{d\tau}. \tag{16.9}$$

τ არის საკუთარი დრო – დრო, ათვლილი ნაწილაკთან (სხეულთან) ერთად მოძრავი საათით. თუ გამოვიყენებთ საკუთარ და უძრავი სისტემის (ლაბორატორიულ) დროებს შორის კავშირს – იხ. (12.1), მივიღებთ:

$$\mathbf{p} = \gamma m\frac{\Delta \mathbf{s}}{dt} = \gamma m\mathbf{v}. \tag{16.10}$$

ცდა ადასტურებს, რომ ნებისმიერი სიჩქარეებისათვის ნაწილაკთა ჩაკეტილი სისტემისათვის მუდმივია (16.10)-ის მიხედვით განსაზღვრული იმპულსების ჯამი. იმპულსის (16.10) განსაზღვრებას ღრმა ფიზიკური შინაარსი აქვს: იგი ნათლად გვიჩვენებს, რომ იმპულსის ცნების რელატივისტური დაზუსტება *დროის ფარდობითობით* არის განპირობებული (გაიხსენეთ γ-ს ფიზიკური შინაარსი). $v<<c$ მცირე სიჩქარეებისათვის $\gamma \approx 1$ და (16.10)-დან (16.7) მიიღება. ნახ. 16.1-ზე გამოსახულია სიჩქარეზე იმპულსის დამოკიდებულების გრაფიკი. ჩანს, რომ დიდი სიჩქარეები-

სათვის რელატივისტური იმპულსი ნიუტონისეულზე უფრო სწრაფად იზრდება, მცირე სიჩქარეებზე კი ისინი ერთმანეთს ემთხვევა.



ნახ. 16.1.

მასის (16.8) განსაზღვრებაც დაზუსტებას მოითხოვს: როგორც ვიცით, იგი მხოლოდ $v<<c$ მცირე სიჩქარეებისათვის არის მართებული. მასის რაოდენობრივი განსაზღვრისათვის იმპულსის მუდმივობის კანონი გამოვიყენოთ. განვიხილოთ ორი ნაწილაკის დრეკადი ცენტრალური დაჯახება (სიჩქარეები ერთ წრფეზე ძევს). ვთქვათ, პირველი ნაწილაკის m_1 მასა ცნობილია და გვინდა მეორე ნაწილაკის m_2 მასა განვსაზღვროთ. გამოთვლების გასაადვილებლად კიდევ უფრო გავამარტივოთ ამოცანა: დავუშვათ, რომ ნაწილაკთა იმპულსების ჯამი ნულის ტოლია. ეს ნიშნავს, რომ დაჯახებამდე და დაჯახების შემდეგ ნაწილაკები ურთიერთსაპირისპიროდ მოძრაობს – იხ. ნახ. 16.2 (ეს დაშვება არ არის პრინციპული შეზღუდვა: ყოველთვის შეიძლება შეირჩეს ისეთი მოძრავი ინერციული ათვლის სისტემა, რომელშიც ნაწილაკთა სრული იმპულსი ნულის ტო-

ნახ. 16.2.

ლია. ფიზიკოსები ასეთ მოხერხებულ ათვლის სისტემას მასათა ცენტრის სისტემას ანდა, მოკლედ, C-სისტემას უწოდებენ). გავზომოთ სიჩქარეები, ვთქვათ, დაჯახების შემდეგ. (16.10)-ის გათვალისწინებით დავწეროთ იმპულსის მუდმივობის კანონი გაზომილ სიჩქარეთა მოდულებისათვის (მიმართულება ცნობილია):

$$\frac{m_1 v_1}{\sqrt{1-v_1^2/c^2}}-\frac{m_2 v_2}{\sqrt{1-v_2^2/c^2}}=0,$$

საიდანაც ადვილად გამოვთვლით მასათა ფარდობას:

$$\frac{m_2}{m_1}=\frac{v_1}{v_2}\frac{\sqrt{1-v_2^2/c^2}}{\sqrt{1-v_1^2/c^2}}. \qquad (16.11)$$

(16.11) ტოლობა m_2 მასას განსაზღვრავს m_1 მასის საშუალებით. ასე განსაზღვრული მასა ინვარიანტულია ნებისმიერი სიჩქარისათვის. $v<<c$ მცირე სიჩქარეებისათვის (16.11)-დან (16.8)-ს ვიღებთ, რადგან დაჯახების განხილულ შემთხვევაში $v_1/v_2=a_1/a_2$ (C-სისტემაში სიჩქარეთა ფარდობა გვაქვს, ლაბორატორიულ სისტემაში – აჩქარებათა ფარდობა). ამრიგად, ნებისმიერი სიჩქარისათვის მასის რაოდენობრივ სრულყოფილ განსაზღვრებას იმპულსის მუდმივობის კანონი გვაძლევს.

თვალი გავუსწოროთ ფიზიკის სირთულეს. რელატივისტურ კვანტურ ფიზიკაში ნივთიერებასა და ველს (გამოსხივებას) შორის პრინციპული განსხვავება არ არსებობს – ელექტრონი, ფოტონი (კვანტი)... ელემენტარული ნაწილაკებია. შედეგად *მასის, როგორც ნივთიერების რაოდენობისა და ინერტულობის ზომის, ენერგიისაგან განცალკევებული გააზრება არასრულფასოვანი ხდება.* როგორია მასის ბუნება? ეს თანამედროვე ფიზიკის უპირველესი და ამოუხსნელი კითხვაა. მასისა და ენერგიის ურთიერთკავშირის შესწავლისას გავარკვევთ, რომ მასა უძრაობის ენერგიის ზომაა, ინერტულობის ზომა კი სხეულის სრული ენერგიაა.

ახლა ვალი მოვიხადოთ ისტორიის წინაშე. ფარდობითობის თეორიის დაბადებისას მასის ინტერპრეტაციის სხვა გზა იქნა არჩეული, რადგან ასეთი ინტერპრეტაცია უკვე დამკვიდრებული იყო ფიზიკაში. იმპულსის (16.10) გამოსახულებაში γm ნამრავლს მასის განზომილება აქვს, ამიტომ შემდეგი აღნიშვნებით ვისარგებლოთ:

$$m_v=\gamma m_0=\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \qquad (16.12)$$

m_0-ს უძრაობის მასა უწოდეს (რადგან $m_v=m_0$, თუ $v=0$), m_v-ს – მოძრაობის, ანუ რელატივისტური მასა. (16.12)-ის ინტერპრეტაცია ასეთი იყო: მასა დამოკიდებულია სიჩქარეზე. მაგრამ თანდათან გაირკვა, რომ რელატივისტური მასა ძალზე მოუხერხებელი სიდიდეა: არ არის ინვარიანტი, გაუგებარია მისი დამოკიდებულება სიჩქარეზე... მეცნიერებამ კარგა ხანია უარი თქვა რელატივისტური მასის ცნებაზე, ამიტომ ზედმეტია უძრაობის მასის ცნებაც – მას უბრალოდ მასა ეწოდება და ინვარიანტული სიდიდეა (ამიტომ ინდექსი ზედმეტია). სამწუხაროდ, სასწავლო ლიტერატურა ძალზე ჩამორჩა მეცნიერების განვითარებას: ჯერ კიდევ ინტენსიურად გამოიყენება მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების მოძველებული ინტერპრეტაცია, რომელიც გავლილი ეტაპია.

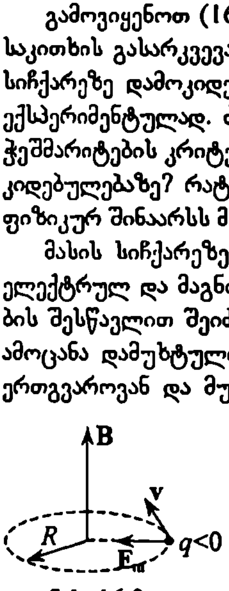
ნიუტონის მეორე კანონი რელატივისტური სახით დავწეროთ:

$$\frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t} = \mathbf{F}, \qquad (16.13)$$

სადაც $\mathbf{p}$ რელატივისტური იმპულსი (16.10)-ით განისაზღვრება. $v \ll c$ მცირე სიჩქარეებისათვის $\gamma \approx 1$, $\mathbf{p} \approx m\mathbf{v}$ და (16.13)-დან $m\mathbf{a}=\mathbf{F}$ ტოლობას ვიღებთ. რელატივისტურ შემთხვევაში აჩქარების მიმართულება, საზოგადოდ, აღარ ემთხვევა ძალის მიმართულებას.

გამოვიყენოთ (16.13) მოძრაობის განტოლება ერთი მნიშვნელოვანი საკითხის გასარკვევად. მრავალ სახელმძღვანელოში წერია, რომ მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების (16.12) ფორმულა კარგად დასტურდება ექსპერიმენტულად. ძალაუნებურად იბადება კითხვა: ექსპერიმენტი ხომ ჭეშმარიტების კრიტერიუმია და როგორღა ვამბობთ უარს (16.12) დამოკიდებულებაზე? რატომ ვამბობთ, რომ რელატივისტური მასა უშუალო ფიზიკურ შინაარსს მოკლებულია?

მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების ექსპერიმენტული გამოკვლევა ელექტრულ და მაგნიტურ ველებში დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობის შესწავლით შეიძლება. განვიხილოთ პრაქტიკულად მნიშვნელოვანი ამოცანა დამუხტული ნაწილაკის (ვთქვათ, ელექტრონის) მოძრაობისა ერთგვაროვან და მუდმივ მაგნიტურ ველში. რადგან მაგნიტური ძალა ყოველთვის მართობია დამუხტული ნაწილაკის სიჩქარისა, მაგნიტური ველი მუშაობას არ ასრულებს და ამიტომ ნაწილაკის სიჩქარის მოდული არ იცვლება. სიჩქარე ისე მივმართოთ, რომ ნაწილაკი $\mathbf{B}$ მაგნიტურ ველში მის მართობად შევიდეს, ე. ი. $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$ ამ შემთხვევაში $\mathbf{v}$-ს არ ექნება $\mathbf{B}$ მაგნიტური ინდუქციის პარალელური მდგენელი და მაგნიტური ძალის მოქმედებით ნაწილაკი იმოძრავებს წრეწირზე, რომლის სიბრტყე $\mathbf{B}$-ს მართობია (ნახ. 16.3). რადგან სიჩქარის მოდული მუდმივია, γ-ც მუდმივია და (16.13)-დან



ნახ. 16.3.

$$\gamma m \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \mathbf{F}_m. \qquad (16.14)$$

$\Delta \mathbf{v}/\Delta t = \mathbf{a}_c$ ცენტრისკენული აჩქარებაა. ნახ. 16.3-დან ჩანს, რომ ყველა ვექტორის მიმართულება ცნობილია, ამიტომ (16.14) მოდულებისათვის დავწეროთ. გავითვალისწინოთ: $a_c=v^2/R$, სადაც R წრეწირის რადიუსია, ხოლო $F_m=qvB$, სადაც q ნაწილაკის მუხტია. გვექნება:

$$\gamma m = qBR/v. \qquad (16.15)$$

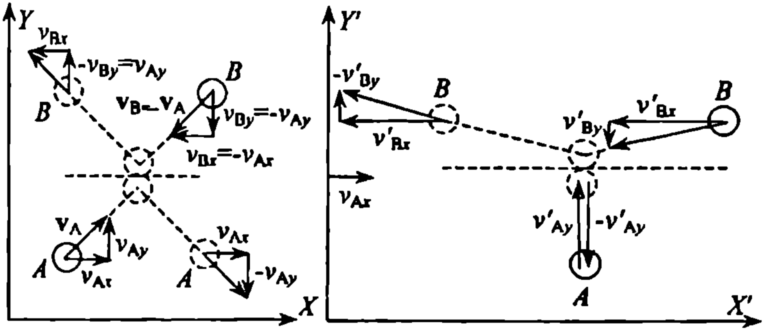
(16.12) დამოკიდებულების შესამოწმებლად მასში შემავალი სიდიდეები უნდა გავზომოთ. ნაწილაკის $m_0 \equiv m$ მასა (ძველი ტერმინოლოგიით – უძრაობის მასა) ცნობილია. უნდა გაიზომოს m_v რელატივისტური მასა v სიჩქარის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის. რას გვაძლევს (16.15) ფორმულა? ნაწილაკის q მუხტი ცნობილია, B-ს გავზომავთ. v-ს ცვლილებისას R რადიუსი შეიცვლება და ორივეს გაზომვა შეიძლება. ერთი შეხედვით, თითქოს ცდით დავადგენთ $m_v \equiv \gamma m$ სიდიდის v სიჩქარეზე დამოკიდებულების სახეს. მაგრამ არა – m_v ხომ უბრალოდ γm ნამრავლის აღნიშვნაა და სინამდვილეში დავადგენთ γ რელატივისტური კოეფიციენტის v სიჩქარეზე დამოკიდებულებას – იხ. ნახ. 12.1. ეს უაღრესად მნიშვნელოვანია, მაგრამ სხვა რამეა. ასე რომ, m_v რელატივისტური მასა *უშუალოდ* არავის გაუზომავს და ამის გამო არც (16.12) დამოკიდებულება შემოწმებულა. გამოთვლით კი ფიზიკური სიდიდეების ნებისმიერი კომბინაციის გამოთვლა შეიძლება, მაგრამ ეს არაფერს არ ამტკიცებს.

3. დავასაბუთოთ რელატივისტური იმპულსის (16.2) გამოსახულება. სათანადო მეთოდიკის დამუშავებისას ვეყრდნობოდით [15, 24] წიგნებს, რომლებშიც მოცემულია ოპტიმალური მეთოდი სიჩქარისადმი იმპულსის განივი მდგენელის ინვარიანტობის დამტკიცებისა. იგი საშუალებას იძლევა რელატივისტური იმპულსის ცნება საკუთარი დროის მეშვეობით შემოვიტანოთ, დროის ფარდობითობის საფუძველზე, მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების ინტერპრეტაციის გარეშე. ჩვენი მიზნებისათვის საჭიროა ამ მეთოდის სათანადო გამარტივება, ადაპტაცია. ეს კი გარდაუვლად იწვევს რთული დეტალების გაშუქებაზე უარის თქმას, გარკვეულწილად სიმკაცრის დათმობის ხარჯზე. ამიტომ საკითხი ფაკულტატიური გაკვეთილის სახით განვიხილოთ, თუმცა მისი გაგება განსაკუთრებულ სირთულეს არ წარმოადგენს.

ფ ა კ უ ლ ტ ა ტ ი უ რ ი   გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. როგორ დავადგინოთ რელატივისტური იმპულსის (16.9) გამოსახულება? დავეყრდნოთ იმპულსის მუდმივობის ფუნდამენტურ კანონს, რომელიც ნებისმიერ შემთხვევაში უნდა შესრულდეს. მაგრამ ეს საკმარისი არ არის. რელატივისტური იმპულსის საძიებელი გამოსახულება $v \ll c$ მცირე სიჩქარეებისათვის ნიუტონისეულ (16.7) გამოსახულებად უნდა გადავიდეს, რადგან ეს უკანასკნელი არარელატივისტურ მიახლოებაში კარგად დასტურდება ცდით.

განვიხილოთ ორი ერთნაირი ბირთვის (ნაწილაკის) დრეკადი სრიალა დაჯახება (სიჩქარეები ერთ წრფეზე არ ძევს). სიმარტივისათვის ამოცანას ზედმიწევნით სიმეტრიული სახე მივცეთ: ვთქვათ, ბირთვები ერთმა-

ნეთს უახლოვდება მოდულით ერთნაირი და მიმართულებით საპირისპირო სიჩქარეებით. მაშინ იმპულსთა ჯამი დაჯახებამდე ნულის ტოლია და, იმპულსის მუდმივობის კანონის თანახმად, დაჯახების შემდეგაც. ამიტომ დაჯახების შემდეგ ბირთვები იმავე მოდულის სიჩქარეებით შორდება ერთმანეთს, რადგან დრეკადი დაჯახებისას სიჩქარეთა მოდული არ იცვლება. თუ კოორდინატთა სისტემას ისე სიმეტრიულად ავირჩევთ, როგორც ნახ. 16.4-ზე მარცხნივ არის გამოსახული, ადვილად დავინახავთ, რომ A და B ბირთვების სიჩქარეთა გეგმილები X ღერძზე დაჯახების



ნახ. 16.4.

შედეგად არ იცვლება, y-გეგმილები კი მხოლოდ ნიშანს იცვლის. ამიტომ იმპულსის x-გეგმილებიც ავტომატურად ინახება და ანალიზისათვის გვრჩება მხოლოდ იმპულსის y-გეგმილების ჯამის მუდმივობა, სახელდობრ, ნულთან ტოლობა:

$$p_{Ay} + p_{By} = 0. \tag{16.16}$$

განვიხილოთ იგივე დაჯახება მოძრავი ინერციული ათვლის სისტემიდან – რაკეტიდან, რომლის სიჩქარე ზუსტად უდრის დაჯახებამდე A ბირთვის სიჩქარის v_{Ax} პროექციას. ასეთი მოძრავი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ A ბირთვი Y ღერძის გასწვრივ მოძრაობს – იხ ნახ. 16.4, მარჯვნივ. ჩანს, რომ B ბირთვის სიჩქარის v_{Bx}' პროექცია დაჯახების შედეგად არ იცვლება და კვლავ მხოლოდ იმპულსის y-გეგმილების ჯამის მუდმივობაა გამოსაკვლევი. მოძრავი ათვლის სისტემის მიმართ იმპულსთა ჯამი ნულის ტოლი არ არის, ამიტომ y-გეგმილების ჯამის მუდმივობა ასე ჩავწეროთ:

$$\Delta p'_{Ay} = -\Delta p'_{By}. \tag{16.17}$$

ამოცანის სიმეტრია საშუალებას გვაძლევს ადვილად განვსაზღვროთ

იმპულსის y-გეგმილების ცვლილება. ნახ. 16.4-ის გათვალისწინებით:

$$\Delta p'_{Ay} = -2p'_{Ay}, \quad \Delta p'_{By} = -2p'_{By}. \tag{16.18}$$

თუ ამ მნიშვნელობებს (16.17)-ში შევიტანთ, მივიღებთ:

$$p'_{Ay} + p'_{By} = 0. \tag{16.19}$$

ნახ. 16.4-ზე სიჩქარის ვექტორების სიგრძეთა თანაფარდობა თვისებრივად დაცულია (თანახმად სიჩქარეთა რელატივისტური გარდაქმნის წესისა – გამოთვლები სცილდება სასკოლო დონეს). რადგან ნიუტონისეული იმპულსი სიჩქარის პროპორციულია, ჩანს, რომ იგი (16.19)-ს – იმპულსის მუდმივობის კანონს რელატივისტურ შემთხვევაში – არ აკმაყოფილებს.

შევადაროთ (16.16) და (16.19) ტოლობები. ვხედავთ, რომ რაკეტის მიმართ ბირთვების იმპულსთა y-გეგმილების ჯამი ისევ ნულის ტოლია მიუხედავად იმისა, რომ ვექტორული ჯამი ნულისგან განსხვავებული მუდმივაა. ამრიგად, იმპულსთა y-გეგმილების ჯამს ორივე ათვლის სისტემის მიმართ ერთნაირი – ნულის ტოლი – მნიშვნელობა აქვს, ე. ი. ინვარიანტული სიდიდეა. ბირთვების სიჩქარის მოდული ნებისმიერად ავირჩიეთ, ამიტომ რაკეტის მუდმივი სიჩქარეც ნებისმიერია და, მაშასადამე, გამოტანილი დასკვნის სისწორე სიჩქარის მნიშვნელობაზე დამოკიდებული არ არის. ეს შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ ჯამის თითოეული წევრიც ცალ-ცალკე ინვარიანტია. ამრიგად, თითოეული ბირთვის იმპულსის y-გეგმილი ორივე სისტემაში ერთნაირია, ინვარიანტია:

$$p_y = p'_y = \text{inv}. \tag{16.20}$$

განვაზოგადოთ დასკვნა: *ინერციული ათვლის სისტემის სიჩქარისადმი განივი მდგენელი სხეულის იმპულსისა ინვარიანტული სიდიდეა.*

დავწეროთ იმპულსის y-გეგმილის არარელატივისტური გამოსახულება: $p_y = m\Delta y/\Delta t$. ახლა უკვე ვიცით, როგორ განვაზოგადოთ ეს გამოსახულება ნებისმიერი სიჩქარისათვის – ინვარიანტული სიდიდე უნდა მივიღოთ. m მასა და Δy განივი ზომა ინვარიანტული სიდიდეებია, მაგრამ Δt დრო – არა. ინვარიანტული სიდიდე საკუთარი დროა, ამიტომ განზოგადებისათვის Δt უნდა $\Delta\tau$ საკუთარი დროით შევცვალოთ. რელატივისტური იმპულსის y-გეგმილს $p_y = m\Delta y/\Delta\tau$ ინვარიანტული სახე ექნება. სივრცეში ყველა მიმართულება ტოლფასია. ასეთ თვისებას იზოტროპიულობა ეწოდება. ამიტომ ანალოგიური გამოსახულებები x- და z-გეგმილებისათვისაც შეგვიძლია დავწეროთ, რაც (16.9) ვექტორულ სახეს გვაძლევს.

4. ჩვეულებისამებრ, ამოცანები განვიხილოთ.

ამოცანა **16.1.** რელატივისტური იმპულსის გამოსახულებაში შეიტანეთ სიჩქარის მნიშვნელობები: $v=c$, $v>c$ და ახსენით შედეგები.

ა მ ო ხ ს ნ ა. თუ (16.10)-დან $p=\infty$ – ეს შეუძლებელია, ფიზიკური აზრი არა აქვს. ამიტომ სხეულებისათვის ყოველთვის $v>c$, რადგან $m\neq0$. იმის წარმოსადგენად, თუ რამდენად შეიძლება მასიანი ნაწილაკების სიჩქარე სინათლისას მიუახლოვდეს, მაგალითებს დავასახელებთ. ამჩქარებელში ელექტრონებისათვის c-v~1 სმ/წმ-ის მიღწევაა შესაძლებელი; კოსმოსური სხივების შემადგენლობაში, როგორც ჩანს, არსებობს პროტონები, რომელთათვისაც c-v~10^{-12} სმ/წმ!

სინათლის კვანტი – ფოტონი – $v=c$ სიჩქარით მოძრაობს, ამიტომ მასა $m=0$. ფოტონს მასა, ინერტულობა არ გააჩნია. მისი იმპულსი და ენერგია სასრული სიდიდეებია ($0/0$ = სასრულ სიდიდეს). (16.6)-დან ფოტონის იმპულსი და ენერგია ერთმანეთს ასე უკავშირდება: $p=E/c$. კვანტური ფიზიკა იძლევა, რომ ფოტონის ენერგია $E=h\nu$, სადაც h პლანკის მუდმივაა, ν – სინათლის სიხშირე.

ახლა უფრო გასაგებია ადრე ნათქვამი (მ. 4.1): ელექტრომაგნიტურ ველს, ტალღას მასა არ გააჩნია, ინერციის მუდმივის, ინერციული ათვლის სისტემების გარეშე კი მას ვერ შევისწავლით:

$v>c$-თვის ფესქვეშა გამოსახულება უარყოფითია და ფორმულას ფიზიკური აზრი არა აქვს.

კითხვები, ამოცანები

16.2. მრავალ წიგნში წერია, რომ მასა სიჩქარეზეა დამოკიდებული. რა ფიზიკური აზრი აქვს რელატივისტურ მასას? დაასახელებთ ექსპერიმენტებს, რომლებიც უშუალოდ ადასტურებენ მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულებას?

16.3. რას წარმოადგენს (16.11) გამოსახულება: მასის განსაზღვრებასა თუ იმპულსის მუდმივობის კანონს?

16.4. რას წარმოადგენს (16.13) გამოსახულება: ძალის განსაზღვრებასა თუ ნიუტონის მეორე კანონს? ჩამოაყალიბეთ ძალის რელატივისტურად ზუსტი განსაზღვრება.

16.5. დაასაბუთეთ, რომ რელატივისტურ ფიზიკაში აჩქარების მიმართულება, საზოგადოდ, არ ემთხვევა ძალის მიმართულებას. რომელ შემთხვევებში დაემთხვევა მათი მიმართულებები ერთმანეთს?

16.6. სხეულზე მუდმივი ძალა მოქმედებს. როგორ შეიცვლება სიჩქარისა და იმპულსის მნიშვნელობები ნიუტონისა და რელატივისტური მექანიკის მიხედვით, თუ $t\to\infty$?

17. ენერგია. მასისა და ენერგიის ურთიერთკავშირი

1. აინშტაინის მიერ ენერგიისა და მასის ურთიერთკავშირის აღმოჩენა კაცობრიობის ერთ-ერთი უდიდესი აღმოჩენაა. გასაგებია, თუ რა არსებითი მნიშვნელობა აქვს აინშტაინის ცნობილი ფორმულის, რომელიც ენერგიასა და მასას აკავშირებს, დასაბუთებასა და თანამედროვე ინტერპრეტაციას. რელატივისტური იმპულსის განსაზღვრისა და ნიუტონის მეორე კანონის რელატივისტური სახით ჩაწერის შემდეგ, ენერგიის გამოსახულების მიღება ბუნებრივად შეიძლება მუშაობის ცნების საფუძველზე. მაგრამ ეს გზა სასკოლო კურსისათვის არ გამოდგება, რადგან ინტეგრირებას მოითხოვს. სასკოლო კურსებში პოპულარულია ენერგიის ფორმულის დადგენის ხერხი, რომელიც უმაღლეს მათემატიკას არ საჭიროებს, მაგრამ ემყარება მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულების ცნებას [21], რაც ჩვენთვის მიუღებელია.

წინამდებარე კურსისათვის საჭირო გახდა ენერგის რელატივისტური გამოსახულების მიღების ისეთი მეთოდიკის შემუშავება, რომელიც ორგანული გაგრძელება იქნებოდა კურსის საფუძვლების გააზრებისა. მკითხველს ორ გზას ვთავაზობთ.

კურსის შესწავლის მთელ მანძილზე თანამიმდევრულად ვაშუქებდით იმპულსისა და ენერგიის ცნებების, მათი მუდმივობის კანონების სიღრმისეულ კავშირს. ბუნებრივია, რომ ეს კავშირი დავსახოთ ამოსავლად. გავაანალიზოთ რელატივისტური იმპულსის გამოსახულება. დავიწყოთ მარტივი, $v \ll c$ მცირე სიჩქარეების, შემთხვევიდან. მაგრამ v/c ფარდობის რომელი ხარისხის სიზუსტით შემოვისაზღვროთ? პირველი მიახლოება ($\gamma \approx 1$) ნიუტონის ფიზიკის მართებულობის პირობაა, ამიტომ γ კოეფიციენტი მეორე მიახლოებაში, (v^2/c^2)-ის სიზუსტით, გამოვთვალოთ. ასეთი გამოთვლა უმაღლესი მათემატიკის (მწკრივად უშუალო გაშლის) გამოყენების გარეშე სირთულეს არ წარმოადგენს (იხ. ამოცანა 17.3). გაკვეთილში ვაჩვენებთ, რომ შედეგის განზოგადება გვაძლევს:

$$\mathbf{p} = \frac{E}{c^2}\mathbf{v}. \tag{17.1}$$

(17.1) კავშირს ღრმა ფიზიკური შინაარსი აქვს: ნივთიერებას (და ველსაც) ენერგია-იმპულსი ერთად, როგორც ერთი მთლიანი, გადააქვს – ენერგიისა და იმპულსის დაშორება შეუძლებელია. თუ (17.1)-ში ჩავსვამთ რელატივისტური იმპულსის (16.3) გამოსახულებას, მივიღებთ აინშტაინის რელატივისტურ ფორმულას ენერგიისათვის:

$$E = \gamma mc^2. \qquad (17.2)$$

ენერგიის რელატივისტური გამოსახულების მიღების მეორე გზა დაწვრილებით განვიხილოთ, რადგან გაკვეთილში არ გამოვიყენებთ (არჩევის თავისუფლებას მასწავლებელს ვუტოვებთ). შემდეგნაირად განვსაჯოთ. ძირითადი რელატივისტური მოვლენების იმ ინტერპრეტაციიდან, რომელიც ჩვენეული კურსისათვის ამოსავალია, ნათელია, რომ ენერგიის საძიებელი გამოსახულება დროის ფარდობითობით არის განპირობებული. γ რელატივისტურ კოეფიციენტს ის ფიზიკური შინაარსი მივეცით, რომ იგი დროის ფარდობითობას ასახავს. იმაშიც საფუძვლიანად დავრწმუნდით, თუ რა არსებითი მნიშვნელობა აქვს ფიზიკაში ინვარიანტულ სიდიდეებს. ამიტომ γ-ს გამოყენებით შევეცადოთ შევადგინოთ ენერგიის განზომილების მქონე ინვარიანტული სიდიდე და ვნახოთ, რა გამოგვივა.

რადგან ნებისმიერი რიცხვი ინვარიანტია, $\gamma=(1-\beta)^{-1/2}$-დან ერთიანი განვსაზღვროთ ($\beta\equiv v/c$) და კვადრატში ავიყვანოთ, რათა ფესვისგან გავთავისუფლდეთ (კვადრატში აყვანით ფრჩხილების გახსნისა და შეკრება-გამოკლების საშუალება გვექნება):

$$\gamma^2(1-\beta^2)=1. \qquad (17.3)$$

ახლა შევარჩიოთ ენერგიის განზომილების მქონე ინვარიანტული კომბინაცია ფიზიკური სიდიდეებისა. ასეთია mc^2, რადგან (17.3)-ში γ კვადრატშია, ორივე მხარე mc^2-ის კვადრატზე გავამრავლოთ:

$$\left(\gamma mc^2\right)^2-(\gamma mv)^2c^2=m^2c^4. \qquad (17.4)$$

(17.4)-ის მარცხენა მხარეში ორივე წევრი სიჩქარის მიხედვით იცვლება, მაგრამ მათი სხვაობა ინვარიანტული სიდიდეა. მეორე წევრის ფრჩხილებში მდგომი γmv სიდიდე რელატივისტური იმპულსია. რას წარმოადგენს პირველი წევრის ფრჩხილებში მდგომი γmc^2 სიდიდე? არსებითია, რომ მას ენერგიის განზომილება აქვს. მაგრამ კიდევ უფრო მეტის თქმა შეიძლება. რადგან მართებულია იმპულსის მუდმივობის კანონი, ამ სიდიდის მუდმივობის კანონიც იარსებებს, თუ არადა (17.4) თანაფარდობა არ შესრულდებოდა. ეს ორი ფუნდამენტური მოსაზრება — განზომილება და შენახვა — სრულ საფუძველს იძლევა ამ სიდიდის გაიგივებისათვის სხეულის ენერგიასთან. ამრიგად, მივიღეთ ენერგიის (17.2) რელატივისტური გამოსახულება და (16.6) ფუნდამენტური ინვარიანტული კავშირი:

$$\left(\frac{E}{c^2}\right)^2-\left(\frac{p}{c}\right)^2=m^2. \qquad (17.5)$$

გავაანალიზოთ ენერგიის რელატივისტური ფორმულა. (17.2)-ში γ კოეფიციენტის არსებობა (მსგავსად რელატივისტური იმპულსისა) უშუალოდ გვიჩვენებს, რომ ენერგიის ცნების სიღრმისეული გადააზრება დროის ფარდობითობას უკავშირდება და არა – მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულებას. სამწუხაროდ, ჯერაც პოპულარულია – ზოგიერთი ცნობილი ფიზიკოსის ხელშეწყობითაც – $E=mc^2$ ჩაწერა, სადაც m აღნიშნავს მეცნიერების განვითარებით უარყოფილ რელატივისტურ, სიჩქარეზე დამოკიდებულ, მასას. ღრმა ფიზიკური ფორმულის ასეთი „პოპულარიზაცია" ცუდ სამსახურს უწევს ფარდობითობის თეორიის შემსწავლელებს, ხელს უშლის ჭეშმარიტი არსის გაგებას.

როცა $v=0$, მაშინ $\gamma=1$ და (17.2)-დან გამომდინარეობს, რომ უძრავ სხეულს ენერგია გააჩნია. აინშტაინისეული აღნიშვნის [31] მიხედვით

$$E_0 = mc^2. \tag{17.6}$$

თავისუფალ უძრავ სხეულს ენერგია გააჩნია. უძრაობის ენერგია განპირობებულია თვით ნივთიერების არსებობით. აინშტაინამდე უძრაობის ენერგიის არსებობა ცნობილი არ იყო. ენერგიის რელატივისტური გამოსახულება გვიჩვენებს მასისა და ენერგიის მჭიდრო კავშირს: მასა ენერგიასთან ერთად იცვლება. თუ უძრაობის ენერგია ΔE_0 სიდიდით შეიცვალა, მასა აუცილებლად შეიცვლება

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2} \tag{17.7}$$

სიდიდით და პირიქით. აინშტაინი მასისა და ენერგიის ურთიერთკავშირს ფარდობითობის თეორიის ყველაზე მნიშვნელოვან შედეგად თვლიდა.

(17.2) ფორმულა უძრაობის ენერგიასთან ერთად თავისუფალი სხეულის მოძრაობის, ანუ კინეტიკურ, ენერგიასაც შეიცავს. K კინეტიკური ენერგიის რელატივისტური გამოსახულება ასეთია:

$$K = E - E_0 = (\gamma - 1)mc^2. \tag{17.8}$$

$v \ll c$ მცირე სიჩქარეებისათვის (17.5) ფორმულა კინეტიკური ენერგიის $mv^2/2$ ცნობილ არარელატივისტურ ფორმულას გვაძლევს.

თუ ნაწილაკის სიჩქარე (სიტყვაზე, ფოტონის) $v=c$, (17.1)-დან $pc=E$. (17.5)-ში შეტანა $m=0$ მნიშვნელობას გვაძლევს: c სიჩქარით მოძრავი ნაწილაკის მასა ნულის ტოლია. ასეთი ნაწილაკისათვის არ არსებობს საკუთარი ათვლის სისტემა, რომელშიც იგი უძრავი იქნებოდა. მასიან ნაწილაკს ($m\neq0$) მხოლოდ $v<c$ სიჩქარით შეუძლია მოძრაობა.

სხეულის mc^2 უძრაობის ენერგია შეიცავს სხეულის შემადგენელი ნაწილაკების უძრაობის ენერგიათა $\sum m_i c^2$ ჯამს, მათ კინეტიკურ ენერ-

გიასა და ერთმანეთთან ურთიერთქმედების ენერგიას. გამოდის, რომ

$$mc^2 \neq \sum_i m_i c^2, \Rightarrow m \neq \sum_i m_i. \qquad (17.9)$$

რელატივისტურ ფიზიკაში მასა არ არის ადიტიური სიდიდე: სისტემის მასა არ უდრის შემადგენელი ნაწილაკების მასათა ჯამს. ასეთი რამ უცხოა ნიუტონის ფიზიკისათვის. მასათა შეკრების კანონი მხოლოდ მიახლოებით სრულდება არარელატივისტურ შემთხვევაში, როდესაც სხეულის კინეტიკური ენერგია გაცილებით ნაკლებია უძრაობის ენერგიაზე. ამიტომ ჩვეულებრივ პირობებში მასის ცვლილებას ვერ ვამჩნევთ. არარელატივისტურ მიახლოებაში სხეულთა უძრაობის ენერგია პრაქტიკულად უცვლელია და მისი გათვალისწინება საჭირო არ არის: ტოლობის ორივე მხარეში ერთნაირი მუდმივები იკვეცება, უძრაობის ენერგია არ მჟღავნდება – „თვლემს". მიკროსამყაროში მიმდინარე გარდაქმნებისას კი უძრაობის ენერგია იცვლება და უცილობლივ შედის ენერგიის ბალანსში.

მასის (17.7) ცვლილება საკმაოდ უჩვეულოა. მაგალითად, გათბობისას სხეულის უძრაობის ენერგია იზრდება. ამიტომ მასაც იზრდება. ცხადია, ნივთიერების რაოდენობა (ჩვეულებრივი გაგებით) არ შეცვლილა. ამ შემთხვევაში მასის გაზრდა ნაწილაკების კინეტიკურ და ურთიერთქმედების ენერგიათა გაზრდამ გამოიწვია – მასა არ არის ნივთიერების რაოდენობის ზომა. არც ინერტულობის ზომა არის *ინვარიანტული მასა* რელატივისტურ ფიზიკაში. მართლაც, ინერტულობის თვისება Δt დროში სიჩქარის Δv ცვლილების მიხედვით განისაზღვრება, მაგრამ ეს ორივე სიდიდე ვარიანტულია, ფარდობითია.

განხილული გვიჩვენებს, რომ რელატივისტურ ფიზიკაში მასის, როგორც ნივთიერების რაოდენობისა და ინერტულობის ზომის, ენერგიისაგან განცალკევებულად გააზრება აღარ არის ადეკვატური. ენერგიას, იმპულსსა და მასას შორის (17.5) სიღრმისეული კავშირის გამო გასაგები ხდება, რომ მასაში წვლილი ოთხივე სახის ფუნდამენტურ ურთიერთქმედებას შეაქვს (მეტ-ნაკლებად). თუ არარელატივისტურ ფიზიკაში სხეულის მასა მისი ნაწილაკთა რაოდენობით განისაზღვრება,რელატივისტურ შემთხვევაში, როდესაც ნაწილაკთა ენერგია გაცილებით აღემატება უძრაობის ენერგიას, სხეულის მასა განისაზღვრება არა მხოლოდ და არა იმდენად ნაწილაკთა რაოდენობით, არამედ მათი ენერგიითა და იმპულსით. რელატივისტურ ფიზიკაში ინვარიანტული მასა არ არის არც ადიტიური, არც ნივთიერებისა და ინერტულობის ზომაა. (17.6)-ის მიხედვით მასა უძრაობის ენერგიას განსაზღვრავს, ხოლო (17.1)-ში იმპულსსა და

სიჩქარეს შორის პროპორციულობის კოეფიციენტი ენერგიას შეიცავს.

მასა არის უძრაობის ენერგიის ზომა, ხოლო ინერტულობის ზომას სხეულის (სისტემის) სრული ენერგია წარმოადგენს.

გავარჩიოთ მასის ენერგიად და პირიქით გადასვლის რთული საკითხი, რომელიც განსაკუთრებით გააბუნდოვანა მარქსისტულმა ფილოსოფიამ. განვიხილოთ ნაწილაკისა და ანტინაწილაკის (პროტონი-ანტიპროტონი, ელექტრონი-პოზიტრონი, ...) ანიჰილაცია. ნაწილაკებს აქვს მასა და ენერგია — უძრაობისა და კინეტიკური. ანიჰილაციის შედეგად იბადება γ-კვანტი — ელექტრომაგნიტური ველი, რომელსაც არ გააჩნია მასა, მაგრამ აქვს ენერგია. რასაკვირველია, სრული ენერგია ანიჰილაციისას მუდმივია. ფიზიკოსები არცთუ იშვიათად იყენებენ გამოთქმას — მასა გადადის ენერგიად. ეს „სტენოგრაფიული" გამოხატვაა იმისა, რომ ნივთიერება ველად გარდაიქმნა. ცხადია, შებრუნებული გარდაქმნაც შეიძლება. მაგრამ გასარკვევია, ინახება თუ არა მასა გარდაქმნისას?

ერთი შეხედვით, პასუხი ნათელია: თუ საუბარია ცალკეულ ნაწილაკთა მასაზე, მათი ჯამი, როგორც ვნახეთ, არ ინახება, არ არის მუდმივი. მაგრამ, ვინაიდან რელატივისტურ ფიზიკაში მასა არ არის ადიტიური სიდიდე, ნაწილაკთა მასათა ჯამი აღარ წარმოადგენს სისტემის ადეკვატურ მახასიათებელს. როგორ განვსაზღვროთ სისტემის მასა (სირთულის გამო ეს საკითხი I გამოცემაში გამოვტოვეთ)?

ცხადია, სისტემის მასას ვერ მივიღებთ შემადგენელი ნაწილაკების მასების შეკრებით, რამეთუ მასა ადიტიური არ არის. ამოსავალი (17.5) თანაფარდობაა. სიმარტივისათვის ორი თავისუფალი ნაწილაკის სისტემა ავიღოთ. ენერგია და იმპულსი იკრიბება, ამიტომ სისტემის მასა ტოლია:

$$m^2 = \frac{\left(E_1 + E_2\right)^2}{c^4} - \frac{\left(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2\right)^2}{c^2} \neq \left(m_1 + m_2\right)^2 \qquad (17.10)$$

ნათლად ჩანს, რომ მასა არ არის ადიტიური: $m \neq m_1 + m_2$ — სისტემის მასა არ უდრის შემადგენელი ნაწილაკების მასათა ჯამს და დამოკიდებულია მათ ენერგიაზე, იმპულსზე, $\mathbf{p}_1$ და $\mathbf{p}_2$ ვექტორებს შორის კუთხეზე. *ვინაიდან ჩაკეტილი სისტემის სრული ენერგია და იმპულსი მუდმივია, სისტემის მასა ინახება.* ყოველივე ეს ძალზე უცნაურია არარელატივისტური ფიზიკის თვალსაზრისით. მაგალითად, თუ ორი ერთნაირი ენერგიის ფოტონი ერთი მიმართულებით მოძრაობს, $(\mathbf{p}_1+\mathbf{p}_2)^2=4p^2$ და $E=pc$ კავშირის გათვალისწინებით (17.10) გვაძლევს: ასეთი *სისტემის* მასა $m=0$. ეს ბუნებრივად აღიქმება, რადგან ფოტონს მასა არ გააჩნია. მაგრამ, თუ ორი ფოტონი საპირისპიროდ მოძრაობს, $\mathbf{p}_1+\mathbf{p}_2=0$ და $m=2E/c^2$, მიუხედავად

იმისა, რომ ფოტონს მასა არ გააჩნია! ამის გააზრება ადვილი არ არის (რას იზამ, ფიზიკაში არ არსებობს კეისრის გზა...). თვალსაჩინო ნიმუშია იმისა, რომ რელატივისტურ შემთხვევაში სისტემის მასაში არსებითი წვლილი შემადგენელი ნაწილაკების ენერგიასა და იმპულსს შეაქვს.

2. გ ა კ ვ ე თ ი ლ ი. უეჭველია, დროის ფარდობითობა ენერგიის ცნებაზეც ახდენს არსებით გავლენას. როგორ დავადგინოთ სხეულის ენერგიის რელატივისტური გამოსახულება? ფიზიკის შესწავლის პროცესში არაერთხელ დავრწმუნდით, რომ იმპულსისა და ენერგიის ცნებებს, მუდმივობის კანონებს შორის შინაგანი სიღრმისეული კავშირია, ერთმანეთის გარეშე არ არსებობს. ამიტომ გავაანალიზოთ რელატივისტური იმპულსის გამოსახულება, რათა გავარკვიოთ, რა ცვლილებებს იწვევს ფარდობითობის თეორია ენერგიის შესახებ ჩვენს წარმოდგენაში.

თავდაპირველად მარტივი, მცირე სიჩქარეების, შემთხვევა განვიხილოთ. v/c ფარდობის პირველი ხარისხის სიზუსტით $\gamma\approx 1$ და რელატივისტური იმპულსი $m\mathbf{v}$ ნიუტონისეულ სიდიდეს გვაძლევს, რომელიც არაფერს გვეუბნება ენერგიის შესახებ. ამიტომ γ კოეფიციენტი $(v/c)^2$-ის სიზუსტით გამოვთვალოთ (იხ. ამოცანა 17.3):

$$\gamma=\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\approx 1+\frac{1}{2}\cdot\frac{v^2}{c^2}. \qquad (17.11)$$

$\mathbf{p}=\gamma m\mathbf{v}$ რელატივისტური იმპულსი შემდეგნაირად შეგვიძლია ჩავწეროთ:

$$\mathbf{p}\approx m\mathbf{v}+\frac{mv^2}{2c^2}\mathbf{v}. \qquad (17.12)$$

ვხედავთ, რომ (17.12)-ის მარჯვენა მხარის მეორე წევრში $mv^2/2$ კინეტიკური ენერგია გაჩნდა. რა მივიღეთ? როდესაც უძრავ სხეულს $\mathbf{v}$ სიჩქარეს მივანიჭებთ, ნიუტონისეულ მნიშვნელობასთან შედარებით მის მიერ შეძენილი იმპულსის $\Delta\mathbf{p}=\mathbf{p}-m\mathbf{v}$ ნამატი ცალსახად უკავშირდება კინეტიკური ენერგიის $\Delta K=mv^2/2$ ნამატს:

$$\Delta\mathbf{p}\approx\frac{\Delta K}{c^2}\mathbf{v}. \qquad (17.13)$$

(17.13) თანაფარდობა ჩვენ მიახლოებით მივიღეთ. აინშტაინმა დაასაბუთა, რომ სხეულის რელატივისტურ იმპულსსა და რელატივისტურ ენერგიას შორის კავშირი ზუსტია, ფუნდამენტურია და მსგავსი სახე აქვს:

$$\mathbf{p}=\frac{E}{c^2}\mathbf{v}. \qquad (17.14)$$

(17.14) თანაფარდობა ღრმა ფიზიკური შინაარსის არის: სხეულს ენერგია

და იმპულსი ერთად, როგორც ერთი მთლიანი, გადააქვს – ენერგიისა და იმპულსის დაშორება შეუძლებელია. (17.14)-ში (16.10) რელატივისტური იმპულსის გამოსახულების ჩასმა აინშტაინის ფორმულას გვაძლევს:

$$E = \gamma mc^2. \qquad (17.15)$$

(17.15) ფორმულა ენერგიას ახალ, ღრმა შინაარსს აძლევს. γ კოეფიციენტის არსებობა პირდაპირ მიუთითებს, რომ ეს დროის ფარდობითობასთან არის დაკავშირებული (და არა – მასის სიჩქარეზე დამოკიდებულებასთან; ენერგიის ფორმულას $E=mc^2$ სახით წერდნენ და, სამწუხაროდ, არცთუ იშვიათად, ახლაც წერენ, სადაც m აღნიშნავს γm_0 რელატივისტურ მასას; ამ ცნებას არ გამოვიყენებთ). ენერგიის შინაარსის გარკვევა უძრავი სხეულის შემთხვევიდან დავიწყოთ. როცა v=0, (17.15)-დან გამომდინარეობს, რომ სხეულს აქვს ენერგია. მას უძრაობის ენერგიას უწოდებენ:

$$E_0 = mc^2. \qquad (17.16)$$

უძრაობის ენერგია განპირობებულია თვით სხეულის არსებობით. უძრაობის ენერგიაზე აინშტაინამდე წარმოდგენაც კი არ ჰქონდათ. ეს კაცობრიობის ერთ-ერთი უდიდესი აღმოჩენაა. მასასა და ენერგიას შორის მჭიდრო კავშირი არსებობს. *მასა უძრაობის ენერგიის ზომაა.* შეუძლებელია ერთ-ერთის ცვლილება მეორის შესატყვისი ცვლილების გარეშე:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2} \qquad (17.17)$$

ნებისმიერი სხეული შედგება ნაწილაკებისაგან, რომლებიც მოძრაობენ და ერთმანეთთან ურთიერთქმედებენ. ამიტომ სხეულის (17.16) უძრაობის ენერგია თავის თავში შეიცავს არა მარტო ნაწილაკების ჯამურ უძრაობის ენერგიას, არამედ მათ სრულ კინეტიკურ და ურთიერთქმედების ენერგიასაც. აქედან გამომდინარეობს, რომ სხეულის m მასა არ უდრის მისი შემადგენელი ნაწილაკების მასათა ჯამს: რელატივისტურ ფიზიკაში მასა არ არის ადიტიური სიდიდე. ასეთი რამ უცხოა ნიუტონის მექანიკისათვის. მასათა შეკრების კანონი ზუსტი არ არის: იგი მიახლოებით სრულდება არარელატივისტურ შემთხვევაში, როცა სხეულის სიჩქარე $v<<c$. ასეთ მიახლოებაში სხეულის კინეტიკური ენერგია გაცილებით ნაკლებია უძრაობის ენერგიაზე და მასის ცვლილებას ვერ ვამჩნევთ, მაგრამ იგი არსებითია ბირთვული გარდაქმნებისას.

საილუსტრაციოდ გამოვიყენოთ სხვადასხვა თვალსაზრისით რამდენჯერმე განხილული ელექტრონისა და პოზიტრონის ანიჰილაციის რეაქცია. ელექტრონსა და პოზიტრონს მასები გააჩნიათ, ამიტომ – უძრაობის ენერგიაც. ანიჰილაციის შედეგად წარმოიშობა γ-კვანტი (ელექტრომაგ-

ნიტური ველი), რომელსაც მასა არ გააჩნია. ორივე ნაწილაკის უძრაობის და კინეტიკურ ენერგიათა ჯამი ტოლია γ-კვანტის ენერგიისა, თანახმად ენერგიის მუდმივობის კანონისა. მასა? *სიმოკლისათვის* ფიზიკოსები ამბობენ, რომ მასა ენერგიად გადავიდა. ცხადია, შებრუნებული გადასვლაც ხდება, მაგალითად, γ-კვანტით ნივთიერების დასხივებისას შეიძლება ელექტრონ-პოზიტრონის წყვილი დაიბადოს. სხვა მაგალითიც განვიხილოთ. გათბობისას სხეულის უძრაობის ენერგია იზრდება. ამიტომ, თანახმად (17.16)-ისა, მასაც იზრდება. ცხადია, ნივთიერების რაოდენობა არ შეცვლილა. ამ შემთხვევაში მასის გაზრდა გამოიწვია ნაწილაკების კინეტიკურ და ურთიერთქმედების ენერგიათა გაზრდამ. ვხედავთ, რომ რელატივისტურ ფიზიკაში მასის, როგორც ნივთიერების რაოდენობისა და ინერტულობის ზომის, ენერგიისაგან განცალკევებულად გააზრება აღარ არის სრულფასოვანი. (17.14)-ის მიხედვით ინერტულობის ზომას სხეულის სრული ენერგია წარმოადგენს.

დავუბრუნდეთ (17.15) ფორმულას. სხეულის უძრაობის ენერგიასთან ერთად იგი მოძრაობის ენერგიასაც შეიცავს. ამიტომ რელტივისტურ ფიზიკაში K კინეტიკური ენერგია შემდეგნაირად განისაზღვრება:

$$K = E - mc^2 = mc^2(\gamma - 1). \tag{17.18}$$

დარწმუნდით, რომ (17.18)-დან $v<<c$ მცირე სიჩქარეებისათვის (17.11)-ის გათვალისწინებით კინეტიკური ენერგიის $K=mv^2/2$ ფორმულა მიიღება.

აინშტაინის (17.15) ფორმულას განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს ატომის ბირთვისა და ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკისათვის. მეცნიერებისათვის ჯერ კიდევ უცნობია ბირთვული გარდაქმნების მექანიზმი, მაგრამ აინშტაინის ფორმულის გამოყენებით, გავზომავთ რა სათანადო მასებს, შეგვიძლია ზუსტად გამოვთვალოთ რეაქციის ენერგია. ეს მუდმივად მიმდინარეობს მთელი მსოფლიოს ლაბორატორიებში. ამ ფორმულის გარეშე შეუძლებელი იქნებოდა ატომური რეაქტორებისა და ნაწილაკების ამჩქარებელთა კონსტრუირება... ყოველივე ეს საუკეთესო ექსპერიმენტული დადასტურებაა ფარდობითობის თეორიის მართებულობისა.

3. გავარჩიოთ რამდენიმე ამოცანა.

ამოცანა 17.1. 3,0კმ სიგრძის ამჩქარებელი $4{,}0\cdot10^4$მევ ენერგიას ანიჭებს ელექტრონს. იპოვეთ მისი სიჩქარე. რას ედრებოდა ასეთი სიჩქარის ელექტრონის კინეტიკური ენერგია და რა მანძილის გავლა დასჭირდებოდა მას ამ ენერგიის მისაღწევად არარელატივისტური ფიზიკის თანახმად, თუ ლაბორატორიულ სისტემაში სიგრძის ერთეულზე შეძენილი

ენერგია დაახლოებით მუდმივია? რას ეთანაბრება ამჩქარებლის სიგრძე ელექტრონის „თვალსაზრისით“?

ა მ ო ხ ს ნ ა.

მოც.: $l=3{,}0\cdot10^3$ მ

$E=6{,}4\cdot10^{-9}$ ჯ

$\nu-?\ l_c-?\ l'-?$

40 გევ$=4\cdot10^{10}$ ევ$=4\cdot10^{10}\cdot1{,}6\cdot10^{-19}$ ჯ$=$ $=6{,}4\cdot10^{-9}$ ჯ.

მაკროსკოპული თვალსაზრისით, $\sim10^{-9}$ ჯ რიგის ენერგია ძალიან მცირეა, მაგრამ ელექტრონის სიჩქარის შეფასებით დავრწმუნდეთ, რამდენად დიდია იგი მიკროსამყაროში. (17.13) კვადრატში ავიყვანოთ, გამოვიყენოთ $1-\beta^2\approx2(1-\beta)$ მიახლოება და c-ν სიდიდე გამოვთვალოთ ($\beta\equiv\nu/c$):

$$c-\nu=m^2c^5/2E^2$$

ჩავსვათ რიცხვითი მნიშვნელობები:

$$c-\nu=\frac{\left(9{,}1\cdot10^{-31}\right)^2\left(3\cdot10^8\right)^5}{2\cdot\left(6{,}4\cdot10^{-9}\right)^2}=2{,}5\cdot10^{-2}\ \frac{\text{მ}}{\text{წმ}}$$

$\nu<c$, მაგრამ ძალზე ახლოსაა მასთან. მაშასადამე, ~10 გევ$\sim10^{-9}$ ჯ რიგის ენერგია მართლაც ძალიან დიდია მიკროსამყაროში. სიჩქარეთა სხვაობის შეგრძნებისათვის შემდეგი თავშესაქცევი სავარჯიშო ამოვხსნათ: რამდენით გაასწრებს სინათლე ელექტრონს $x=10^3$ კმ მანძილზე?

$$\Delta x=\frac{x}{c}(c-\nu)=\frac{10^6}{3\cdot10^8}\cdot2{,}5\cdot10^{-2}\sim10^{-4}\text{ მ}-\text{ მხოლოდ }0{,}1\text{ მმ-ით!}$$

ამჩქარებლის სიგრძე ელექტრონის „თვალსაზრისით“, მასთან დაკავშირებულ ათვლის სისტემაში, ლორენცის შემოკლების გამო უდრის:

$$l'=l\sqrt{1-\beta^2}\approx l\sqrt{2(1-\beta)}=3{,}0\cdot10^3\left(2\cdot8{,}2\cdot10^{-11}\right)^{1/2}=4\text{ სმ!}$$

ვნახოთ, რას მივიღებთ არარელატივისტური ფიზიკის მიხედვით. $\nu\approx c$ სიჩქარით მოძრავი ელექტრონის კინეტიკური ენერგია ტოლია:

$$mc^2/2=9{,}1\cdot10^{-31}\cdot9\cdot10^{16}/2=4{,}1\cdot10^{-14}\text{ ჯ.}$$

ეს 10^5-ჯერ ნაკლებია, ვიდრე სინამდვილეში! ამოცანის პირობით ლაბორატორიულ სისტემაში ერთეულ სიგრძეზე შეძენილი $E/l=2{,}1\cdot10^{-12}$ ჯ/მ ენერგია დაახლოებით მუდმივია. ამიტომ ელექტრონს $\nu\approx c$ სიჩქარის მისაღწევად ასეთი მანძილის გავლა დასჭირდებოდა:

$$l_c=\left(mc^2/2\right)/\left(E/l\right)=2\text{ სმ.}$$

2 სმ ნაცვლად 3 კმ-ისა! ეს საუკეთესო დადასტურებაა ფარდობითობის თეორიის ჭეშმარიტებისა: არავინ აგებდა 3 კმ სიგრძის ამჩქარებელს,

რომელიც მილიონობით დოლარი ჯდება, რელატივისტური ფიზიკა სწორი რომ არ იყოს.

ამოცანა 17.2. v=0,6c სიჩქარით მოძრავი m მასის ნაწილაკი ეჯახება ისეთსავე უძრავ ნაწილაკს. დაჯახება აბსოლუტურად არადრეკადია. იპოვეთ მიღებული ნაწილაკის სიჩქარე და მასა.

ა მ ო ხ ს ნ ა. გამოვიყენოთ იმპულსისა და ენერგიის მუდმივობის კანონები. აბსოლუტურად არადრეკადი დაჯახების შედეგად მიღებული ნაწილაკის მასა და სიჩქარე შესაბამისად M და v' ასოებით აღვნიშნოთ.

(16.10)-ის მიხედვით იმპულსის მუდმივობის კანონი ასე ჩაიწერება:

$$\gamma m v = \gamma' M v'. \qquad (17.19)$$

ენერგიის მუდმივობის კანონი გვაძლევს – იხ. (17.15) და (17.16):

$$\gamma m c^2 + m c^2 = \gamma' M c^2. \qquad (17.20)$$

(17.19) გავყოთ (17.20)-ზე, გავშალოთ γ, γ' რელატივისტურ კოეფიციენტთა გამოსახულება და v' სიჩქარე გამოვთვალოთ:

$$v' = \frac{v}{1+\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{c}{3}.$$

ჩავსვათ v' სიჩქარის მნიშვნელობა (17.19)-ში და M მასა ვიპოვოთ:

$$M = 3m/\sqrt{2} > 2m.$$

მიღებული ნაწილაკის მასა აღემატება საწყის ნაწილაკთა მასების ჯამს!

ამოცანა 17.3. გამოთვალეთ γ კოეფიციენტი $\beta \equiv v/c$ ფარდობის მეორე ხარისხის სიზუსტით.

ა მ ო ხ ს ნ ა. ფესქვეშა გამოსახულებას მივუმატოთ და გამოვაკლოთ $\beta^4/4$ წევრი. მივიღებთ:

$$1-\beta^2 = \left(1-\beta^2/2\right)^2 - \beta^4/4.$$

მე-4 ხარისხის წევრი სიმცირის გამო უგულებელვყოთ და ამოვფესვოთ:

$$\sqrt{1-\beta^2} \approx 1-\beta^2/2.$$

მარჯვენა მხარე გავამრავლოთ და გავყოთ ($1+\beta^2/2$)-ზე და კვლავ უგულებელვყოთ მეოთხე ხარისხის წევრი. მივიღებთ (17.11)-ს.

კითხვები, ამოცანები

17.4. რაზე მიუთითებს γ კოეფიციენტის არსებობა რელატივისტურ ფორმულებში?

17.5. დაასახელეთ ნაწილაკები, რომელთაც არ გააჩნიათ უძრაობის ენერგია. თუ არსებობს მათთვის საკუთარი ათვლის სისტემა?

17.6. რატომ არ მჟღავნდება უძრაობის ენერგია ჩვეულებრივ პირობებში?

17.7. ენერგიის (17.15) ფორმულაში ჩასვით $v=c$, $v>c$ და ახსენით.

17.8. რა არის ინერტულობის ზომა რელატივისტურ ფიზიკაში? რისი ზომაა მასა? რატომ არ არის მასა ადიტიური სიდიდე?

17.9. თუ ინახება ჩაკეტილი სისტემის მასა? რას იტყვით გამოთქმაზე: მასა გადადის ენერგიად და პირუკუ?

17.10. ფოტონი უმასო ნაწილაკია. ახსენით, განსხვავდება თუ არა ნულისაგან ფოტონების გაზის მასა.

17.11. ამოცანა 17.1-ში შეადარეთ ელექტრონის ენერგია მის უძრაობის ენერგიას. როგორ ნაწილაკს ეწოდება ულტრარელატივისტური? რა კავშირია მის ენერგიასა და იმპულსს შორის (შდრ. ფოტონს)?

17.12. რას უდრის სიჩქარე და იმპულსი პროტონისა, რომლის კინეტიკური ენერგია უძრაობის ენერგიის ნახევარია ($m_p=1{,}67\cdot10^{-27}$ კგ)?

17.13. 1 გ ქვანახშირის დაწვისას გამოიყოფა $2{,}9\cdot10^{4}$ ჯ ენერგია, ხოლო 1გ ურანის დაშლისას – $8{,}1 10^{10}$ ჯ. 1 გ ნივთიერების უძრაობის ენერგიის რა ნაწილს შეადგენს ეს მნიშვნელობები?

17.14. 1 კგ წყალბადისა და 8 კგ ჟანგბადის შეერთებისას გამოიყოფა დაახლოებით $E=10^{8}$ ჯ ენერგია. თუ შეიძლება მასის ცვლილების აღმოჩენა ქიმიური სასწორით, რომელიც 10^{-7} რიგის მასის ფარდობით ცვლილებას ზომავს (ეს რეკორდული მიღწევაა)?

17.15. შეიძლება თუ არა ნაწილაკის თავისთავადი დაშლისას უფრო მეტი მასის ნაწილაკი წარმოიშვას?

17.16. ნაწილაკი ეჯახება ისეთსავე უძრავ ნაწილაკს. დაჯახება დრეკადია. რა კუთხით გაიტყორცნება ნაწილაკები არარელატივისტურ მიახლოებაში? რატომ არ არის მართებული იგივე რელატივისტურ შემთხვევაში?

18. ფარდობითობის ზოგადი თეორიის ელემენტები

1. ფარდობითობის სპეციალური თეორიის წარმოშობა განაპირობა იმ სიღრმისეულმა პრობლემებმა, რომლებიც XIX საუკუნის 60-იან წლებში ჩამოყალიბებულმა ელექტრომაგნიტური ველის მაქსველის თეორიამ წამოჭრა. პრობლემატიკის გადაწყვეტაში სხვადასხვა მეცნიერმა შეიტანა ფუძემდებელი წვლილი. უპირველესად უნდა დავასახელოთ გამოჩენილი მეცნიერები ლორენცი და პუანკარე... მაგრამ ფიზიკურად დასრულებული და განსხვავებული გადაჭრა აინშტაინს ეკუთვნის – ფარდობითობის

სპეციალური თეორია (1905 წ.). რაც შეეხება ფარდობითობის ზოგად თეორიას, იგი მთლიანად აინშტაინის გენიის ნაყოფია – სპეციალური თეორიის აინშტაინისეული განზოგადების არც ექსპერიმენტული, არც თეორიული მინიშნება არ არსებობდა. ფარდობითობის ზოგად თეორიაზე მუშაობას აინშტაინი 1907 წლიდან შეუდგა, ძირითადი რელატივისტური ეფექტები 1911 წელს დაადგინა, ხოლო დასრულებული სახე 1916 წელს მისცა. ფარდობითობის ზოგადი თეორია არის გამრუდებული სივრცე-დროის, გრავიტაციის „გეომეტრიზაციის" დახვეწილი და ლამაზი, მაგრამ მეტად რთული მათემატიკური ენის ფიზიკური თეორია. შევეცადოთ გადმოვცეთ მისი არსის მოკლე მონახაზი. ძირითადად აინშტაინის [31] ნაშრომს დავეყრდნობით. მათ, ვისაც უფრო ფართოდ სურს გაეცნოს ზოგადი თეორიის საწყისებს, [23] წიგნს დავუსახელებთ.

ფარდობითობის სპეციალური თეორია არ ეხება ნიუტონის გრავიტაციის შორსქმედების თეორიას, რომელიც არ ეთანხმება ფარდობითობის პრინციპსა და ურთიერთქმედების გადაცემის სიჩქარის სასრულობას. მართლაც, ნიუტონის მსოფლიო მიზიდულობის კანონი

$$F=G\frac{m_1m_2}{r^2} \tag{18.1}$$

ცხადი სახით არ შეიცავს დროს. ურთიერთქმედების შედეგად სხეულთა გადაადგილებისას ურთიერთქმედების ძალა შეიცვლება, მაგრამ დროის რომელ მომენტში? (18.1)-ის თანახმად, იმავე მომენტში, რადგან დრო არ ფიგურირებს, ე. ი. $c=\infty$. გარდა ამისა, ლორენცის ძალის შესწავლისას ელექტრომაგნეტიზმში აღვნიშნეთ, რომ მისი სიჩქარეზე დამოკიდებულება რელატივისტური მოვლენაა. გამომდინარე ფიზიკის ერთიანობიდან, ეს მართებული უნდა იყოს ნებისმიერი ბუნების ძალისათვის. მაგრამ (18.1) სიჩქარეზე არ არის დამოკიდებული, ამიტომ იგი რელატივისტური გამოსახულება არ არის და არ აკმაყოფილებს ფარდობითობის პრინციპს. ჯერ კიდევ ლორენცმა და პუანკარემ გადადგეს პირველი ნაბიჯები მსოფლიო მოზიდულობის ძალის გამოსახულების ისეთნაირი შეცვლისათვის, რომ ფარდობითობის პრინციპი დაკმაყოფილებულიყო. მაგრამ აინშტაინის გააზრება განზოგადების გზისა სრულიად უნიკალური იყო.

ფარდობითობის სპეციალურმა თეორიამ ფარდობითობის პრინციპი ფიზიკის უზოგადეს დებულებად, ფიზიკის საფუძვლად დაამკვიდრა. მაგრამ ფარდობითობის პრინციპი ათვლის სისტემათა სიმრავლიდან ინერციულ ათვლის სისტემებს გამოარჩევს. აინშტაინი სვამს კითხვას: რა არის ასეთი უპირატესობის ობიექტური მიზეზები? მისი პასუხია: ჩვენ არ

შეგვიძლია ასეთი ობიექტური მიზეზების მოძიება. ამიტომ პრობლემას შემდეგნაირად აყენებს: განვაზოგადოთ ფარდობითობის პრინციპი არაინერციულ, ე. ი. ინერციულის მიმართ აჩქარებულად მოძრავ, ათვლის სისტემებზე – ფაქტობრივად, ნებისმიერ ათვლის სისტემაზე. მაგრამ როგორ მოვახერხოთ ეს, როდესაც ერთმანეთის ტოლფასი ინერციული ათვლის სისტემები ძირეულად განსხვავდება არაინერციული სისტემებისგან? რა ვუყოთ ინერციის პრინციპს? რა კავშირი აქვს გრავიტაციასთან ასეთ განზოგადებას? აინშტაინმა აჩვენა, რომ განზოგადებისათვის ამოსავალი უნდა იყოს ინერტული და გრავიტაციული მასების ტოლობა.

ინერტული მასა იმპულსის მუდმივობის კანონის საფუძველზე განვსაზღვრეთ. მასის განსაზღვრა (18.1) მსოფლიო მიზიდულობის კანონიდანაც შეიძლება. ასე განსაზღვრული მასა – გრავიტაციული მასა – გრავიტაციული ურთიერთქმედების ზომა არის. მაგალითად, სიმძიმის ძალა

$$\mathbf{G} = m_{gr}\mathbf{g}. \tag{18.2}$$

m_{gr} გრავიტაციული მასაა, $\mathbf{g}$ – გრავიტაციული ველის დაძაბულობა, ე. ი. გრავიტაციული მასის ერთეულზე მოქმედი ძალა (მსგავსად ელექტრული ველის დაძაბულობისა). (18.1)-ის მიხედვით, დედამიწისათვის $g=GM/R^2$ ემთხვევა თავისუფალი ვარდნის აჩქარებას. ნიუტონის II კანონი დავწეროთ m_{in} ინერტული მასის სხეულის თავისუფალი ვარდნისათვის:

$$m_{in}\mathbf{a} = m_{gr}\mathbf{g}.\ \text{თუ}\ \mathbf{a} = \mathbf{g},\ \Rightarrow\ m_{in} = m_{gr}. \tag{18.3}$$

ინერტული და გრავიტაციული მასები ტოლია. ჯერ კიდევ გალილეიმ დაადგინა, რომ ყველა სხეული, მიუხედავად სხვადასხვაგვარობისა, ერთნაირი აჩქარებით ვარდება: $\mathbf{a} = \mathbf{g}$. მაგრამ გალილეის ცდების სიზუსტე დიდი არ იყო. მასის ცნება ნიუტონმა შემოიტანა და მან უფრო ზუსტი ცდები ჩაატარა ინერტული და გრავიტაციული მასების ტოლობის შესამოწმებლად. 1894 წელს ეტვეშმა ინერტული და გრავიტაციული მასების ტოლობა 10^{-9} სიზუსტით დაადასტურა. ასე რომ, აინშტაინის დროს საკმაოდ ზუსტი მონაცემები არსებობდა. ფარდობითობის ზოგადი თეორიის შექმნის შემდეგ, პრინციპული მნიშვნელობის გამო, გაზომვის სიზუსტის გაზრდა აუცილებელი გახდა. თანამედროვე მონაცემებით ინერტული და გრავიტაციული მასები 10^{-12} სიზუსტითაა ტოლი! ნიუტონის ფიზიკაში მათი ტოლობა გარკვეულწილად შემთხვევით თანხვედრად აღიქმება, ვინაიდან გაურკვეველი რჩება მათი ჭეშმარიტი ბუნება. ფარდობითობის ზოგადმა თეორიამ თანხვედრას პრინციპული მნიშვნელობა მიანიჭა.

განვიხილოთ არაინერციული ათვლის სისტემა, რომელიც ინერციულის მიმართ $\mathbf{a}_{in}$ მუდმივი აჩქარებით მოძრაობს. სხვადასხვა მასის თავი-

სუფალი სხეულები ამ არაინერციული სისტემის მიმართ ყველა $-a_{in}$ ერთნაირი აჩქარებით — თანაბარაჩქარებულად — იმოძრავებს, ე. ი. აჩქარება სხეულის მასაზე არ არის დამოკიდებული ისევე, როგორც გრავიტაციულ ველში. შევადაროთ არაინერციული სისტემა ინერციულ სისტემას, რომელშიც g დაძაბულობის ერთგვაროვანი და მუდმივი გრავიტაციული ველი გვაქვს. ასეთ ინერციულ სისტემაში ყველა სხეული g ერთნაირი აჩქარებით, თანაბარაჩქარებულად ვარდება — აჩქარება სხეულის მასაზე არ არის დამოკიდებული. თუ $g=-a_{in}$, მოძრაობა ორივე სისტემაში ერთნაირად მიმდინარეობს, არაინერციული სისტემა გრავიტაციული ველის გარეშე ეკვივალენტურია ინერციული სისტემისა გრავიტაციული ველით და ეს იმიტომ, რომ გრავიტაციული და ინერტული მასები ტოლია. დავრწმუნდეთ, რომ ეკვივალენტობის შებრუნება შეიძლება: ინერციული სისტემა ერთგვაროვანი და მუდმივი გრავიტაციული ველით ტოლფასია არაინერციული ათვლის სისტემისა გრავიტაციული ველის გარეშე. ვთქვათ, ინერციული ათვლის სისტემის გრავიტაციულ ველში თავისუფლად ვარდება „აინშტაინის ლიფტი“ — არაინერციული ათვლის სისტემა: $a_{in}=g$. ლიფტის მიმართ სხეული (რომელიც ინერციულ სისტემაში ლიფტთან ერთად ვარდება) ან უძრავი იქნება, ან თანაბარწრფივად იმოძრავებს, თუ სიჩქარეს მივანიჭებთ. მაშასადამე, შეგვიძლია ვთქვათ, რომ სხეული თავისუფალია, მასზე არაფერი მოქმედებს და თავისუფლად ვარდნილ არაინერციულ სისტემაში გრავიტაციული ველი არა გვაქვს, „გამოირთო“. ყოველთვის თუ შეიძლება ასეთი ურთიერთეკვივალენტური სისტემების შერჩევა, გრავიტაციული ველის მოსპობა? არა, რადგან გრავიტაციული ველი, საზოგადოდ, არც ერთგვაროვანია და არც მუდმივი. მაგრამ ყოველთვის შეიძლება შევარჩიოთ სივრცის იმდენად მცირე არე და დროის იმდენად მცირე შუალედი, ანუ, როგორც ამბობენ, სივრცე-დროის მცირე არე, რომ გრავიტაციული ველი მის ფარგლებში მუდმივად და ერთგვაროვნად ჩავთვალოთ. ასეთ შემთხვევაში ყოველთვის შეიძლება ისეთი არაინერციული ათვლის სისტემის შერჩევა, რომ გრავიტაციული ველი „გამოვრთოთ“ და ეს ინერტული და გრავიტაციული მასების ტოლობითაა განპირობებული. ჩამოვაყალიბოთ ფიზიკის ფუნდამენტური დებულება — *ეკვივალენტობის პრინციპი*, რომელიც აინშტაინმა საფუძვლად დაუდო ფარდობითობის ზოგად თეორიას:

სივრცე-დროის საკმარისად მცირე არეში არაინერციული სისტემა გრავიტაციული ველის გარეშე და ინერციული სისტემა გრავიტაციული

ველით სრულიად ეკვივალენტურია: ფიზიკის ყველა კანონს ორივე სისტემაში ერთნაირი სახე აქვს.

რატომ არის ეკვივალენტობის პრინციპი ფარდობითობის პრინციპის განზოგადება არაინერციულ სისტემებზე? ფარდობითობის პრინციპის თანახმად, ყველა ინერციული ათვლის სისტემა ეკვივალენტურია: ლოკალური ფიზიკური ცდებით სისტემის შიგნით – კვლავ გავიხსენოთ გალილეის გემის ტრიუმი – შეუძლებელია სისტემის თანაბარწრფივი მოძრაობის სიჩქარის გაზომვა. ეკვივალენტობის პრინციპის თანახმად, ლოკალური ფიზიკური ცდებით შეუძლებელია ათვლის სისტემის აჩქარების გაზომვა და იმის დადგენა, რომ ათვლის სისტემა არაინერციულია გრავიტაციული ველის გარეშე, თუ ინერციულია გრავიტაციული ველით. აჩქარებული მოძრაობაც ფარდობითია, მსგავსად თანაბარწრფივი მოძრაობისა. ამით გამოიხატება ფარდობითობის პრინციპის განზოგადება არაინერციულ სისტემებზე.

ახლა აინშტაინის კითხვა დავსვათ: რა ევრისტიკული, შემეცნებითი ღირებულება აქვს ეკვივალენტობის პრინციპს, ფარდობითობის სპეციალური თეორიის განზოგადებას მის საფუძველზე? ფარდობითობის სპეციალურ თეორიაში ცნობილია ფიზიკის კანონები ინერციული ათვლის სისტემების მიმართ, როდესაც გრავიტაციული ველი არა გვაქვს, ხოლო გრავიტაციული ველის კანონები უცნობია. ინერციული სისტემიდან არაინერციულ სისტემაზე გადასვლისას ფიზიკის კანონების სახის დადგენა შესაძლებელია კოორდინატებისა და დროის გარდაქმნით (ფიზიკის ელემენტარულ კურსში არაინერციული ათვლის სისტემები არ შეისწავლება და თქმულს უფრო გასაგებს გახდის ქვემოთ გარჩეული მაგალითი). ეკვივალენტობის პრინციპის თანახმად, ასეთი გადაყვანით გრავიტაციული ველის კანონებს მივიღებთ ინერციული სისტემის მიმართ.

როგორ ხდება მოძრაობის, ფიზიკური მოვლენების შესწავლა ფარდობითობის ზოგად თეორიაში? რატომ არის მისი მათემატიკური ენა ასე რთული? ჯერ ათვლის სისტემის თაობაზე – მისი გაგება იცვლება.

ნიუტონის ფიზიკაში ათვლის სისტემა მყარია, რომელიც მთელ სივრცეზე ვრცელდება უსასრულო დროის განმავლობაში. ასეთია ჰელიოცენტრული სისტემა, რომელიც მზის სისტემას მოიცავს და უცვლელია მისი არსებობის მანძილზე, ასეთია უძრავი ვარსკვლავების სისტემა და სხვ. ნიუტონის ფიზიკაში სივრცე ევკლიდურია – მართებულია ევკლიდეს გეომეტრია. ფარდობითობის სპეციალურმა თეორიამ სივრცე და დრო ორგანულად დააკავშირა, წარმოაჩინა ერთიანი სივრცე-დროის სახით

(სივრცე-დროის კონტინუუმი), რომელიც ოთხგანზომილებიანია და ფსევდოევკლიდური. რადგან ფსევდოევკლიდურობას ელემენტარულ კურსში არ ვიყენებთ, დიდი „ცოდვა" არ იქნება, თუ კვლავ სივრცის ევკლიდურობაზე ვილაპარაკებთ. ფარდობითობის სპეციალურ თეორიაში ათვლის სისტემა კვლავ მყარია, უსაზღვროდ განფენილი მთელ სივრცე-დროში. ასეთ ათვლის სისტემებს *გლობალური* ვუწოდოთ. ფარდობითობის ზოგად თეორიაში, როგორც ეკვივალენტობის პრინციპიდან ჩანს, ათვლის სისტემა მხოლოდ *ლოკალურია*: იგი მოიცავს სივრცე-დროის საკმარისად მცირე არეს, რომლის ფარგლებშიც გრავიტაციული ველი ერთგვაროვანი და მუდმივია. ამგვარად, ფარდობითობის ზოგად თეორიაში ფიზიკური მოვლენების აღწერა და შესწავლა *ლოკალურად* ხდება. როგორ დავადგინოთ, არჩეული ათვლის სისტემა ლოკალურია თუ არა? ისევე, როგორც ინერციული ათვლის სისტემების არჩევისას, ამ შემთხვევაშიც პასუხი დამოკიდებულია გაზომვის სიზუსტეზე. სანიმუშოდ განვიხილოთ დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრი, როგორც ათვლის სისტემა, რომელშიც დედამიწის გრავიტაციული ველი „გამორთულია". მასში სხეული ისე იქცევა, როგორც თავისუფალი. ავიღოთ ორი პატარა სხეული, რომლებიც უძრავია. თუ *გაზომვის მოცემული სიზუსტისათვის* ვერ აღმოვაჩენთ მათ *ფარდობით* გადაადგილებას ან აჩქარებას (რეალურად ასეც არის), თანამგზავრი ლოკალურ ათვლის სისტემად ჩაითვლება, თუ არადა – უფრო მცირე ათვლის სისტემა უნდა ავირჩიოთ.

როგორია სივრცე-დროის ლოკალური თვისებები ფარდობითობის ზოგადი თეორიის თანახმად? განვიხილოთ აინშტაინისეული მაგალითი. ვთქვათ, დისკო S ინერციული სისტემის მიმართ ბრუნავს თავისი სიბრტყის მართობი სიმეტრიის ღერძის გარშემო. დისკოს ხისტად დავუკავშიროთ S' სისტემა, რომელიც მასთან ერთად ბრუნავს S-ის მიმართ და, ნათელია, არაინერციულია. S'-ის მიმართ ფიზიკის კანონები უცნობია, მაგრამ ვიცით ფარდობითობის სპეციალური თეორიის კანონები S-ის მიმართ და ამიტომ შეგვიძლია მათი განსაზღვრა S'-ის მიმართაც. ამისათვის საკმარისია განვიხილოთ დროის იმდენად მცირე შუალედი და დისკოს იმდენად მცირე ელემენტი, რომ მისი ბრუნვითი მოძრაობა თანაბარწრფივად ჩავთვალოთ. გავზომოთ დისკოს შემომსაზღვრელი წრეწირისა და დიამეტრის სიგრძე. დავუშვათ, გვაქვს ბევრი ზუსტად ერთნაირი პატარა მყარი ღერო, ერთეული სიგრძისა. ერთმანეთის მიყოლებით დავალაგოთ ისინი ერთ-ერთი დიამეტრისა და წრეწირის გასწვრივ. S სისტემაში ერთდროულად გავზომოთ ყველა ღეროს ბოლოთა მდებარეობა. უძ-

რავი დისკოსათვის, ცხადია, მივიღებთ, რომ $l/d=\pi$. მაგრამ ბრუნვისას ასე არ იქნება. S დამკვირვებლის თვალსაზრისით, დიამეტრზე მოთავსებულ ღეროთა სიგრძეზე მოძრაობა გავლენას არ ახდენს, რადგან სიჩქარე მართობია ღეროსი (განივი ზომის ინვარიანტობა), ხოლო წრეწირის სიგრძეზე განლაგებული ღეროები შემოკლებულია (ლორენცის შემოკლება) – ყოველი პატარა ღერო დისკოს წრფივი სიჩქარის გასწვრივ მოძრაობს. ამიტომ წრეწირის სიგრძე მეტი გამოვა: $l'>l$, $l'/d>\pi$– ამას მიიღებს S'დამკვირვებელიც თავის სისტემაში გაზომვისას. მბრუნავ ათვლის სისტემაში არ არის მართებული ევკლიდეს გეომეტრია! შემდეგ: მოვათავსოთ S სისტემის საათებთან სინქრონიზებული საათები დისკოს ცენტრსა და კიდეზე. ცენტრში მოთავსებული საათი უძრავია და ამიტომ სინქრონულად იმუშავებს S-ის საათებთან, კიდეზე მოთავსებული საათი კი მოძრაობის გამო ჩამორჩება (დროის შენელება). ჩამორჩენა დამოკიდებულია საათის მდებარეობაზე, რადგან დისკოს წრფივი სიჩქარე სხვადასხვა ადგილზე სხვადასხვაა, ე. ი. არც დრო არის ერთგვაროვანი არაინერციულ სისტემაში. ეკვივალენტობის პრინციპის თანახმად, მბრუნავი არაინერციული სისტემა ტოლფასია ინერციული სისტემისა გრავიტაციული ველით. დასკვნა: გრავიტაციული ველი სივრცე-დროის თვისებებზე მოქმედებს, სივრცე-დრო არ არის ევკლიდური (ფსევდოევკლიდური).

წმინდა მათემატიკური თვალსაზრისით, არაევკლიდური სივრცე სხვადასხვანაირი შეიძლება იყოს. ფარდობითობის ზოგადი თეორიის თანახმად, ფიზიკური სივრცე-დრო ოთხგანზომილებიანია და გამრუდებული, რომლის სიმრუდე წერტილიდან წერტილამდე იცვლება (*რიმანის* სივრცე). ოთხგანზომილებიანი გამრუდებული სივრცის თვალსაჩინო წარმოდგენა შეუძლებელია, იგი მხოლოდ მათემატიკურად აღიწერება. შესატყვისი საკმაოდ რთული მათემატიკური ენა ტენზორული აღრიცხვაა. რა იწვევს სივრცე-დროის გამრუდებას? ფარდობითობის ზოგად თეორიამდე ფიზიკური მოვლენები, მატერიის მოძრაობა განიხილებოდა სივრცე-დროის კონტინუუმში, რომლის თვისებები განსაზღვრავს მატერიის თვისებებს, მაგრამ თავად არ არის დამოკიდებული ამ უკანასკნელის თვისებებზე. აინშტაინი ხაზს უსვამს, რომ ასეთი მდგომარეობა ეწინააღმდეგება მეცნიერებისათვის დამახასიათებელ აზროვნების მეთოდს. ფარდობითობის ზოგადი თეორია წინ გადადგმული ნაბიჯია: მატერია მოქმედებს სივრცე-დროის თვისებებზე, ამრუდებს მას, ისინი ურთიერთკავშირშია.

იმის გასაგებად, თუ როგორ აიხსნება გრავიტაცია სივრცე-დროის გამრუდებით, თვალსაჩინო ორგანზომილებიანი ანალოგია მოვიშველიოთ.

წარმოვიდგინოთ გაჭიმული ბატუტი, რომლის სიბრტყე ანალოგი იყოს ევკლიდური სივრცისა (უფრო ზუსტად, გაუმრუდებელი ანუ, როგორც ამბობენ, ბრტყელი ფსევდოევკლიდური ოთხგანზომილებიანი სივრცე-დროისა). ორივე შემთხვევაში მართებულია ევკლიდეს გეომეტრია. მაგალითად, ბატუტი ისეა მოქსოვილი, რომ პატარა უჯრედებისაგან შედგება და თითოეული უჯრედის დიაგონალისათვის პითაგორას თეორემა სრულდება. მოვათავსოთ ბატუტის შუაში მძიმე ბირთვი. ბატუტი ჩაიღუნება, უჯრედების სიბრტყე სხვადასხვანაირად გამრუდდება და მათთვის აღარ იქნება მართებული პითაგორას თეორემა. მსგავსადვე სხვადასხვანაირად გამრუდდება სივრცე-დრო ნივთიერების (მატერიის) მოქმედებით – იგი აღარ იქნება ევკლიდური (ფსევდოევკლიდური). ახლა ბატუტის კიდეებთან განსხვავებული მასის პატარა ბირთვები დავაწყოთ. ისინი ჩაღუნულ ბატუტზე დაგორდებიან მძიმე ბირთვისკენ, თითქოს იგი მათ „იზიდავდეს". ასე გამოვლინდება ბატუტის ჩაღუნვა. „მიზიდვა" ბატუტის ჩაღუნვით, სიმრუდით განისაზღვრება და ბირთვების მასაზე არ არის დამოკიდებული. ანალოგიურად აიხსნება გრავიტაცია, როგორც გამრუდებული სივრცე-დროის სტრუქტურის გამოვლენა, გრავიტაციული ველი „გეომეტრიული" ველია. ინერტული და გრავიტაციული მასები ერთი ბუნებისაა და ერთმანეთს ემთხვევა.

ფარდობითობის ზოგად თეორიაში მოძრაობის აღწერა ლოკალურია: მაგალითად, თანამგზავრში არ იგრძნობა გრავიტაცია, ამიტომ ნურც ვილაპარაკებთ მასზე – სხეულები თანამგზავრში და თვით თანამგზავრი სივრცე-დროის გარკვეულ (ლოკალურ) არეში თავისუფლად, ყოველგვარი ძალების მოქმედების გარეშე მოძრაობს „იდეალურ წრფეზე", რომელსაც გეოდეზიურ წირს უწოდებენ. გეოდეზიური წირი არის ევკლიდეს გეომეტრიის წრფის განზოგადება ოთხგანზომილებიანი გამრუდებული სივრცე-დროისათვის, ხოლო თავისუალი მოძრაობა გამრუდებული სივრცე-დროის ლოკალურ არეში – ინერციის პრინციპისა. გეოდეზიურ წირზე მოძრაობს გასროლილი ქვა, პლანეტები მზის გარშემო... ლოკალური სიმრუდეები იკრიბება, რომლებიც ამ შემთხვევაში მცირეა და დიდ მანძილებზე გრავიტაციული მიზიდვის ეფექტს გვაძლევს, რაც კარგად აღიწერება ნიუტონისეული მსოფლიო მიზიდულობის ფენომენოლოგიური („ფიქტიური") ძალით.

2. მრავალრიცხოვანი ნაშრომი მიეძღვნა ფარდობითობის ზოგადი თეორიის საწყისების თვალსაჩინოდ გადაცემას გამრუდებული სივრცე-დროის საფუძველზე, რათა იგი მისაწვდომი გამხდარიყო დამწყებთათვის.

მაგრამ, შეიძლება ითქვას, რომ მიზანი მიუღწეველი რჩება, რასაკვირველია, სირთულის გამო. ფიზიკური იდეების სირთულეს ის აძლიერებს, რომ ვერ ხერხდება მათემატიკური რეალიზება ელემენტარულ დონეზე.

ნათქვამი არ ნიშნავს, რომ უარი ვთქვათ ფარდობითობის ზოგადი თეორიის ელემენტების სწავლებაზე. საჭიროა პრობლემის სხვა მეთოდური გადაჭრაც ვცადოთ. გამომდინარე დიდაქტიკური პრინციპიდან – მარტივიდან რთულზე თანამიმდევრული გადასვლა – მიზანშეწონილია ფარდობითობის ზოგადი თეორიის ელემენტების ათვისების დაწყება „პირველი მიახლოებიდან“. ამ მიახლოებაში ვგულისხმობთ გამოყენების საკმაოდ ფართო არეალის მქონე პირობებს, როდესაც ნივთიერებით გამოწვეული სივრცე-დროის გამრუდება მცირეა და შეიძლება უშუალოდ არ გავითვალისწინოთ. სხვანაირად, გრავიტაციული ურთიერთქმედება, გრავიტაციული ველი განვიხილოთ როგორც მატერიალური სუბსტანცია, ფიზიკური რეალობა ევკლიდეს (ზოგად კურსში კი ბრტყელ ფსევდოევკლიდურ) სივრცეში, ანალოგიურად ელექტრომაგნიტური ველისა და ამით გავცილდეთ ნიუტონის გრავიტაციის თეორიის ფარგლებს.

შემოთავაზებულ მოსაზრებას ფიზიკური გამართლება და შემეცნებითი ღირებულება აქვს. რელატივისტური წარმოდგენების საფუძველზე ფართოვდება წრე (ნიუტონის გრავიტაციის თეორიასთან შედარებით) იმ ამოცანებისა, რომელთა გადაწყვეტა შეიძლება და გრავიტაცია „ჯდება“ სამყაროს მარტივ, ერთიან ფიზიკურ სურათში. მსოფლმხედველობრივი თვალსაზრისით ეს მნიშვნელოვანია. ელექტრომაგნეტიზმის შესწავლისას ხაზი გავუსვით, რომ ამოსავალი უნდა იყოს ველის ფიზიკური რეალობის ცნება, რომელიც თავისი არსით რელატივისტურია (ფარდობითობის სპეციალური თეორიის შექმნა ამან განაპირობა). ფარდობითობის ზოგადი თეორია კი გრავიტაციული ველის „გეომეტრიზაციას“ ემყარება. ელემენტარულ დონეზე უპირისპირდება ორი კონცეფცია: ფიზიკური ველისა და „გეომეტრიული ველისა“, რომელიც მხოლოდ წარმოდგენის დონეზე თუ მიეცემა. ფიზიკის ერთიანობა მათ „გათანაბრებას“ მოითხოვს. ელემენტარულსა და ზოგად კურსებში ლაპარაკიც კი ზედმეტია ელექტრომაგნიტური ველის, როგორც სივრცე-დროის გამრუდების გამოვლენის, შესწავლაზე. ამიტომ ბუნებრივია დავწიოთ „რანგი“ გრავიტაციული ველისა და ისიც განვიხილოთ როგორც ფიზიკური ველი (რელატივისტური შესწავლის პირველი საფეხური). ეს მტკიცე საფუძველია შემდგომ, მაღალ საფეხურზე ასვლისათვის – გრავიტაციის „გეომეტრიზაციის“ ფიზიკური და მათემატიკური შესწავლისათვის.

ერთი შეხედვით, შეიძლება ვიფიქროთ, რომ ასეთ მიახლოებაში ფარდობითობის ზოგად თეორიაზე მითითება ფორმალურია. მაგრამ ეს ასე არ არის. განსხვავებით ნიუტონის ფიზიკისაგან, გამომდინარე რელატივისტური საფუძვლებიდან, შეგვიძლია განვიხილოთ არა მხოლოდ ის მოვლენები, რომლებსაც ნიუტონის გრავიტაციის თეორიაც ხსნის, არამედ მის ფარგლებს გარეთაც გავიდეთ. სახელდობრ, შევისწავლოთ შემთხვევები, როდესაც სიჩქარე სინათლის სიჩქარის რიგისაა $v{\sim}c$ და $\varphi=GM/r$ გრავიტაციული პოტენციალის ცვლილება აღარ არის გაცილებით ნაკლები c^2-ზე. ეს საინტერესო მეთოდურ პრობლემას სვამს: როგორ განვიხილოთ ელემენტარულ მათემატიკურ დონეზე რელატივისტური გრავიტაციული მოვლენები? ეფექტურია ფიზიკის სწავლების მეთოდიკისათვის არატრადიციული განზომილებათა ანალიზის გამოყენება [16] და მის საფუძველზე შეფასება, რადგან, როგორც წესი, ელემენტარულ დონეზე შეუძლებელია ზუსტი გამოთვლები. ასეთი პირველი ნაბიჯები, რომლის არ არსებობა სწავლების მეთოდიკის ხარვეზია, საჭიროცაა და აუცილებელიც ფიზიკის საფუძვლიანი შესწავლისათვის.

შემდგომი საკითხები ამოცანების სახით განვიხილოთ, ხოლო სასწავლო მასალის შინაარსისა და გადაცემის ფორმის (საუბარი, გაკვეთილი, დამატებით წასაკითხი მასალა...) არჩევანს მასწავლებელს ვუტოვებთ.

ამოცანა 18.1. გრავიტაციულ ველს დაძაბულობითა და პოტენციალით ახასიათებენ. გამომდინარე ელექტროსტატიკურ ველთან ანალოგიიდან, დავწეროთ M მასის სფერული ციური სხულის გრავიტაციული ველის დაძაბულობისა და პოტენციალის ფორმულები (სხეულის გარეთ).

ა მ ო ხ ს ნ ა. M გრვიტაციული მასა ანალოგიურია q ელექტრული მუხტისა – ორივე ველის წყაროა. დავწეროთ წერტილოვანი მუხტის დაძაბულობისა და პოტენციალის ფორმულები, რომლებიც მართებულია, აგრეთვე, თანაბრად დამუხტული სფერული სხეულისათვის მის გარეთ:

$$E=k\frac{q}{r^2},\ \varphi=k\frac{q}{r}.$$

კულონისა და მსოფლიო მიზიდულობის კანონების შედარებიდან ჩანს, რომ k და G მუდმივები ერთმანეთის ანალოგიურია. $\Rightarrow$ წერტილოვანი და სფერული (მის გარეთ) M მასის გრავიტაციული ველის g დაძაბულობისა და φ პოტენციალის ფორმულები ასეთია („-“ მიზიდვას ასახავს):

$$g=\frac{GM}{r^2},\ \varphi=-\frac{GM}{r} \qquad (18.4)$$

შეამოწმეთ, რომ φ-ს სიჩქარის კვადრატის განზომილება აქვს.

ამოცანა 18.2. მასიური ვარსკვლავიდან გამოსხივებული სინათლე ვერ გადალახავს გრავიტაციულ მიზიდულობას – გარე დამკვირვებლისათვის იგი უხილავი, ანუ „შავი“ იქნება. ასეთ ვარსკვლავებს შავი ხვრელები ეწოდა. შევაფასოთ შავი ხვრელის გრავიტაციული რადიუსი.

ა მ ო ხ ს ნ ა. შავი ხვრელის ისტორია XVIII საუკუნის ბოლოდან იწყება: ინგლისელმა მიჩელმა და ფრანგმა ლაპლასმა დამოუკიდებლად გამოთქვეს ვარაუდი, რომ შესაძლებელია არსებობდეს ისეთი მასიური ვარსკვლავები, რომელთა მიზიდავას სინათლე ვერ დასძლევს. ეს მოსაზრება ემყარებოდა სინათლის კორპუსკულისათვის მსოფლიო მიზიდულობისა და ენერგიის მუდმივობის კანონების გამოყენებას.

დავუშვათ, სინათლის კორპუსკულის მასაა m, ხოლო რადიალური სიჩქარე $v=c$. იგი M მასისა და r რადიუსის ვარსკვლავს დატოვებს (უსასრულოდ დაშორდება), თუ კინეტიკური ენერგია საკმარისი იქნება გრავიტაციული მიზიდვის დასაძლევად. კინეტიკურ და პოტენციურ (იგი უარყოფითია) ენერგიათა ჯამი ნულს გავუტოლოთ:

$$\frac{mc^2}{2}=G\frac{mM}{r}, \Rightarrow r_g=\frac{2GM}{c^2}. \qquad (18.5)$$

თუ ვარსკვლავი კოლაპსირებულია (შეკუმშულია) $r<r_g$ მანძილებამდე, გამოსხივებული სინათლე (და სხვა ნებისმიერი სიგნალი, ნაწილაკი – m მასას მნიშვნელობა არა აქვს) ვარსკვლავის გარეთ ვერ გამოვა, იგი შავი ხვრელი იქნება. r_g-ს გრავიტაციულ რადიუსს უწოდებენ. მაგალითად, მზისათვის r_g=3 კმ.

საკვირველი ის არის, რომ (18.5) ზუსტად ემთხვევა ფარდობითობის ზოგადი თეორიის შედეგს. გამოყვანა, ცხადია, არათანამიმდევრულია. კინეტიკური ენერგიის ფორმულაში $v=c$ მნიშვნელობის შეტანა არასწორია, რადგან $mv^2/2$ გამოსახულება მხოლოდ $v<<c$ მცირე სიჩქარეებისათვის გამოდგება. არც მსოფლიო მიზიდულობის კანონია მართებული დიდი სიჩქარეებისა და იმ შემთხვევისათვის, როდესაც $\varphi=GM/r$ გრავიტაციული პოტენციალის ცვლილება არ არის გაცილებით ნაკლები c^2-ზე (ასეა შავი ხვრელისათვის). ამიტომ გავრცელებულია აზრი, რომ (18.5)-ის თანხვედრა სწორ მნიშვნელობასთან შემთხვევითია. თუ ზუსტ თანხვედრაზეა საუბარი, ეს მართლაც ასეა, მაგრამ თუ რიგის თანხვედრაზე – იგი არ არის შემთხვევითი. ეს იმის ასახვაა, რომ ნიუტონის გრავიტაციული თეორია ფარდობითობის ზოგადი თეორიის ზღვრული შემთხვევაა.

ნათქვამი ნიშნავს, რომ მარტივ მოსაზრებათა საფუძველზე შეიძლება მხოლოდ შევაფასოთ, და არა ზუსტად გამოვთვალოთ, მოვლენის მახასი-

ათებელი პარამეტრი. საფუძველია განზომილებათა ანალიზი ფიზიკურ მოსაზრებებსა და ინტუიციასთან ერთად. სწორედ განზომილებათა სისწორე არის გარანტია შეფასების რიგის მართებულობისა.

ვნახოთ, როგორ შეიძლება გრავიტაციული რადიუსის კორექტული შეფასება. სინათლის კორპუსკულის, ფოტონის ენერგია E-თი აღვნიშნოთ, არ დავინტერესდეთ მისი ცხადი სახით. როგორ შევაფასოთ ვარსკვლავთან ფოტონის გრავიტაციული ურთიერთქმედების ენერგია, ფოტონს ხომ მასა არა აქვს? ფოტონს ახასიათებს ენერგია-იმპულსი, რომელიც გრავიტაციული ურთიერთქმედების ზომას განსაზღვრავს. შევაფასოთ მასის განზომილების მქონე სიდიდე, რომელიც ფორმალურად „გრავიტაციულ მასად" შეგვიძლია ჩავთვალოთ: $m \sim E/c^2 \sim p/c$. ახლა ადვილია M მასის ვარსკვლავისა და ფოტონის გრავიტაციული ურთიერთქმედების ენერგიის შეფასება (ისევ შეფასება!), გამომდინარე კვლავ განზომილებათა მოსაზრებებიდან(იხ. 18.4):

$$U \sim \frac{E}{c^2}\varphi \sim -G\frac{M}{r}\frac{E}{c^2}; \quad E = -U \text{ პირობიდან}$$

$$E \sim G\frac{ME}{c^2 r}, \Rightarrow r_g \sim \frac{GM}{c^2}. \tag{18.6}$$

(18.6) რიგით სწორია და ეს შემთხვევითობა კი არ არის, არამედ განპირობებულია ფიზიკის სიღრმისეული კანონზომიერებებით. ზუსტი გამოთვლა გვაძლევს, რომ პროპორციულობის განყენებული კოეფიციენტი $k = 2$. ამ თითქოსდა უბრალო „ორიანის მიღება" იმდენად რთულია, რომ არ ხერხდება ელემენტარული გამოყვანის ფარგლებში.

ამოცანა 18.3. შევაფასოთ ვარსკვლავის გრავიტაციული ველის გავლენა დროის მიმდინარეობაზე.

ა მ ო ხ ს ნ ა. ვთქვათ, T' არის ვარსკვლავზე მოთავსებული საათით (ატომით) გაზომილი მოვლენის ხანგრძლივობა, T – ამავე მოვლენის ხანგრძლივობა, გაზომილი გრავიტაციული ველის გარეთ ინერციულ სისტემაში მოთავსებული საათით (იდენტური ატომით). ველის გავლენა დავახასიათოთ დროის ფარდობითი ცვლილებით:

$$\frac{T' - T}{T} = \frac{\Delta T}{T}.$$

ფარდობითი ცვლილება განყენებული სიდიდეა. ამიტომ ამოცანის მახასიათებელი პარამეტრებიდან მეორე განყენებული სიდიდე შევადგინოთ. ეს ორი განყენებული სიდიდე ერთმანეთის პროპორციული იქნება, ხოლო პროპორციულობის კოეფიციენტი კი – ერთის რიგისა.

გრავიტაციულ მოქმედებას ახასიათებს: G გრავიტაციული მუდმივა, ვარსკვლავის M მასა და მისი R რადიუსი, გავრცელების c სიჩქარე (სინათლის სიჩქარე). მათი ერთეულებია:

$$[G]=\frac{ნ\cdot მ^2}{კგ^2}=\frac{მ^3}{წმ^2 კგ};\ [M]=კგ;\ [R]=მ;\ [c]=\frac{მ}{წმ}.\ \Rightarrow$$

$$\left[\frac{GM}{R}\right]=\frac{მ^2}{წმ^2}.$$

თუ ამ გამოსახულებას c^2-ზე გავყოფთ, მივიღებთ განყენებულ კომბინაციას. მაგრამ დასაზუსტებელია რომელი რომელზე გავყოთ. მოვიხმოთ შემდეგი ფიზიკური მოსაზრება: რელატივისტური მოვლენები v^2/c^2 ფარდობის (და უფრო მაღალი ხარისხის) რიგისაა, ამიტომ GM/R უნდა c^2-ზე გავყოთ. ამრიგად,

$$\frac{\Delta T}{T}\approx\frac{GM}{Rc^2},\Rightarrow T'\approx T\left(1+\frac{GM}{Rc^2}\right). \tag{18.7}$$

v^2/c^2 ფარდობის სიზუსტის გამოთვლები იძლევა, რომ (18.7)-ში პროპორციულობის კოეფიციენტი ერთის ტოლია. ჩანს, რომ $T'>T$ – გრავიტაციულ ველში დროის მიმდინარეობა შენელებულია.

დროის მიმდინარეობაზე გრავიტაციული ველის გავლენა ექსპერიმენტულადაა დადსტურებული. ფარდობითობის ზოგადი თეორიის ეს შედეგი, სპეციალურ თეორიის დროის შენელებასთან ერთად, თვითმფრინავებში მოთავსებული პორტატიული ატომური საათებით შემოწმდა. XX საუკუნის 70-80-იან წლებში ცეზიუმის 4 პორტატიული საათი მოათავსეს რეაქტიულ თვითმფრინავებზე, რომლებმაც დედამიწას შემოუფრინეს აღმოსავლეთისა და დასავლეთის მიმართულებით ($v\approx10^3$ კმ/სთ, $h\approx10$ კმ). მოძრავი საათების ჩვენებას ადარებდნენ ლაბორატორიის უძრავი საათის ჩვენებას. ცდის შემდგომმა გაუმჯობესებულმა დაკვირვებებმა თეორიისა და ექსპერიმენტის შედეგების 1 %-იანი თანხვედრა მოგვცა.

ამოცანა 18.4. გავეცნოთ, რა არის გრავიტაციული წითელი წანაცვლება და შევაფასოთ ეფექტი.

ა მ ო ხ ს ნ ა. გამოსხივებული სინათლის კვანტის – ფოტონის – დაშორებისას მასიური სხეულიდან (მაგალითად, ვარსკვლავიდან) მისი *გაზომილი* სიხშირე მცირდება (გამოსხივების სიხშირესთან შედარებით) ანუ იზრდება პერიოდი. $\lambda=cT$ ფორმულის თანახმად, იზრდება λ ტალღის სიგრძეც. სპექტრი წაინაცვლებს გრძელი (წითელი) ტალღებისაკენ და ამიტომ ამ მოვლენას გრავიტაციული წითელი წანაცვლება ეწოდება.

დავუშვათ, T არის გამოსხივების პერიოდი ვარსკვლავის გრავიტაციული ველის გარეშე (მაგალითად, ატომის გამოსხივება დედამიწაზე, რომლის გრავიტაციულ ველს უგულებელვყოფთ), T' – გრავიტაციული ველის მოქმედების პირობებში (მსგავსი ატომის გამოსხივება ვარსკვლავზე). ეფექტი დავახასიათოთ პერიოდის ფარდობითი ცვლილებით, რომელიც ტალღის სიგრძის ფარდობითი ცვლილების ტოლია:

$$\frac{T'-T}{T}=\frac{\Delta T}{T}=\frac{\Delta\lambda}{\lambda}.$$

ნათელია, ეფექტს სიხშირის ფარდობითი ცვლილებაც ახასიათებს:

$$\Delta T=\Delta\left(\frac{1}{\nu}\right)=\frac{1}{\nu_2}-\frac{1}{\nu_1}=\frac{\nu_1-\nu_2}{\nu_1\nu_2}\approx-\frac{\Delta\nu}{\nu^2},\ \text{თუ}\ \Delta\nu<<\nu_1\approx\nu_2,\Rightarrow$$

$$\frac{\Delta T}{T}=-\frac{\Delta\nu}{\nu}.$$

გრავიტაციულ ველში დროის შენელების გამო – იხ. (18.7) ფორმულა,

$$\frac{\Delta T}{T}\approx\frac{GM}{Rc^2}. \tag{18.8}$$

გრავიტაციული წითელი წანაცვლება მცირეა. მაგალითად, მზისათვის $\Delta T/T\sim10^{-6}$. მესბაუერის ეფექტის აღმოჩენის შემდეგ შესაძლებელი გახდა პერიოდის (სიხშირის) გაცილებით მეტი სიზუსტით გაზომვა და გრავიტაციული წითელი წანაცვლება ლაბორატორიულ პირობებშიც კი შეამოწმეს. თუ ფოტონების ნაკადს ზევით გავუშვებთ, დედამიწის გრავიტაციულ ველში წითელი წანაცვლების აღმოჩენა ათეული მეტრი სიმაღლისთვისაც შეიძლება ($\Delta T/T\sim gh/c^2\sim10^{-15}$). გაზომვები ადასტურებს თეორიის სისწორეს.

* * *

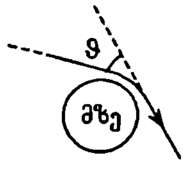
ლიტერატურაში საკმაოდ ხშირად გვხვდება გრავიტაციული წითელი წანაცვლების შემდეგნაირი „ახსნა“: ფოტონი გრავიტაციული მიზიდვის დაძლევაზე მუშაობას ასრულებს, რის შედეგადაც მისი ენერგია და, მაშასადამე, სიხშირე მცირდება. ასეთი მსჯელობისას იგულისხმება, რომ ფოტონი მსგავსია კლასიკური ნაწილაკისა, რომელსაც აქვს მასა, ამის გამო – პოტენციური ენერგია გრავიტაციულ ველში და მუშაობის შედეგად მისი ენერგია უწყვეტად (?!) მცირდება. მსგავს გააზრებას ფიზიკურ რეალობასთან კავშირი არა აქვს. ფოტონის გავრცელებისას მისი სიხშირე საერთოდ არ იცვლება, სიხშირის ცვლილება გრავიტაციულ ველში დროის შენელებას გამოხატავს, რაც დროის *გაზომვის პროცედურით* ვლინდება. ეს კარგად ჩანს, თუ მოვლენას სხვადასხვა ათვლის სისტემაში

განვიხილავთ. გრავიტაციული ველი არა გვაქვს $\mathbf{a} = -\mathbf{g}$ აჩქარებით მოძრავ არაინერციულ სისტემაში; არც „აინშტაინის ლიფტში", რომელიც $\mathbf{g}$ აჩქარებით ვარდება გრავიტაციულ ველში, ეს უკანასკნელი არ არსებობს. ნათელია, რომ ამ სისტემებში აზრი არა აქვს ვილაპარაკოთ მუშაობაზე გრავიტაციულ ველში – გრავიტაციული წითელი წანაცვლება დოპლერის ეფექტით აიხსნება ლაბორატორიულ სისტემაში, რომელშიც გრავიტაციული ველი გვაქვს, ატომების – იგივე საათების – ენერგეტიკულ დონეთა სხვაობა იცვლება: იზრდება დედამიწის ზედაპირიდან აწევისას. ეს ნიშნავს, რომ სინამდვილეში ატომი „ლურჯდება", ხოლოს ფოტონი „წითელი" მის მიმართ ხდება.

* * *

ამოცანა **18.5.** გავარკვიოთ, რა გავლენას ახდენს გრავიტაციული ველი სინათლის გავრცელებაზე?

ა მ ო ხ ს ნ ა. დრო-სივრცის გამრუდება მნიშვნელოვანია, შესამჩნევია მძლავრი გრავიტაციული ველებისათვის. გამრუდებულ დრო-სივრცეში სინათლე (და სხეულები) გეოდეზიურ წირზე მოძრაობს, რომელიც არ არის ევკლიდეს სივრცის წრფე. ამიტომ, როდესაც სინათლე ვარსკვლავს ახლოს ჩაუვლის, სინათლის ტრაექტორია გამრუდდება. (ფარდობითობის ზოგად თეორიაში გრავიტაციული მასა, ემთხვევა რა ინერტულ მასას, არ არის გრავიტაციული მიზიდვის ზომა – ასეთ ზომას ენერგია-იმპულსის ტენზორი წარმოადგენს). ეფექტის შეფასებისათვის ამოცანას რეალური კონკრეტული სახე მივცეთ. განვიხილოთ ვარსკვლავიდან წამოსული სინათლის სხივი, რომელიც მზის ზედაპირის (დისკოს) მახლობლად გადის. მზის გრავიტაციული ველის მოქმედებით სხივი გადაიხრება და დამკვირვებელს მოეჩვენება, რომ ვარსკვლავის ხილული მდებარეობა შეიცვალა, მზის კიდეს დაშორდა (ნახ. 18.1). ბუნებრივია, ასეთი დაკვირვების ჩატარება მხოლოდ მზის დაბნელებისას შეიძლება.



ნახ. 18.1.

შევაფასოთ სხივის გადახრის ϑ კუთხე. ϑ რადიანებით იზომება, განყენებულია. სინათლისა და გრავიტაციული ველის ურთიერთქმედების მახასიათებელი განყენებული პარამეტრი ზემოთ დავადგინეთ – იხ. (18.7). განზომილებათა მოსაზრებების საფუძველზე შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\vartheta \approx \frac{GM}{Rc^2}. \qquad (18.9)$$

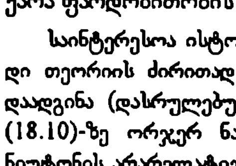
1916 წელს აინშტაინმა გამოიყვანა ფორმულა

$$\vartheta = \frac{4GM}{Rc^2}. \qquad (18.10)$$

ვხედავთ, რომ პროპორციულობის კოეფიციენტი 4-ის ტოლია. რიცხვითი მნიშვნელობების ჩასმა $\vartheta=1{,}75''$ მცირე სიდიდეს გვაძლევს. გრავიტაციულ ველში სინათლის სხივის გადახრა სამიდან (გრავიტაციულ წითელ წანაცვლებასა და მერკურის პერიჰელიუმის ბრუნვასთან ერთად – იხ. ქვემოთ) ერთ-ერთი ახალი რელატივისტური ეფექტი იყო, რომელიც აინშტაინმა გამოიყვანა ფარდობითობის ზოგადი თეორიიდან. 1919 წლის მზის დაბნელებისას სპეციალურად მოწყობილმა პირველსავე ექსპედიციამა დაადასტურა სხივის გადახრა (~10%-ის სიზუსტით), რამაც დააჩქარა ფარდობითობის ზოგადი თეორიის აღიარება.

საინტერესოა ისტორიული სინამდვილის გახსენება. ფარდობითობის ზოგადი თეორიის ძირითადი რელატივისტური ეფექტები აინშტაინმა 1911 წელს დაადგინა (დასრულებული სახე თეორიას 1916 წელს მისცა), მაგრამ მაშინ (18.10)-ზე ორჯერ ნაკლები მნიშვნელობა მიიღო (იგივე გამომდინარეობს ნიუტონის არარელატივისტური თეორიიდანაც, თუ დავუშვებთ, რომ სინათლის კორპუსკულას მასა გააჩნია). ამ გახსენებით იმის ილუსტრაცია გვინდა, რომ მკაცრი გამოთვლები ხშირად იმდენად რთულია, ელემენტარული გამოყვანა არ ხერხდება. ეს კიდევ ერთხელ უსვამს ხაზს მარტივი შეფასების მნიშვნელობას განზომილებათა მოსაზრებების საფუძველზე.

სხივის გადახრის აღმოჩენისთანავე გამოითქვა მოსაზრება, რომ ვარსკვლავი (გალაქტიკა) შეიძლება გრავიტაციულ ლინზად განვიხილოთ, რომელიც აფოკუსირებს უფრო შორეული წყაროს სინათლეს. გრავიტაციული ლინზირების იდეის გაგება ნახ. 18.2-დან შეიძლება: M მასიური ვარსკვლავის ველში S წყაროს სინათლე გადაიხრება და A დამკვირვებელი S' და S'' ორ გამოსახულებას დაინახავს. თავდაპირველად გრავიტაციული ლინზის აღმოჩენა პრაქტიკულად შეუძლებელი ჩანდა, მაგრამ 1979 წელს რადიოტალღების გამომსხივარი ორი „ტყუპი“ კვაზარი დააფიქსირეს. სადღეისოდ გრავიტაციული ლინზირება საკმაოდ გავრცელებული ასტრონომიული მეთოდია.



ნახ. 18.2.

ფარდობითობის ზოგადი თეორიის ჩამოყალიბებისას აინშტაინმა სამ ახალ ეფექტზე მიუთითა, რომელთა საშუალებითაც შეიძლებოდა თეორიის ექსპერიმენტული შემოწმება (ინერტული და გრავიტაციული მასების ტოლობასთან ერთად). ორი მათგანი – სინათლის გადახრა გრავიტა-

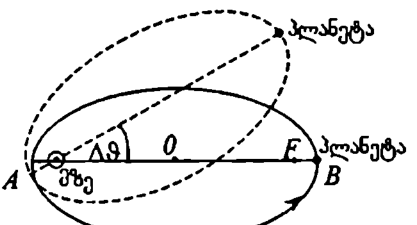
ციულ ველში და გრავიტაციული წითელი წანაცვლება – გავარჩიეთ. მესამეა პლანეტების პერიჰელიუმის მოძრაობა.

პლანეტის ელიფსური ორბიტის მზესთან უახლოეს წერტილს პერიჰელიუმი ეწოდება. პლანეტის მოძრაობაზე სხვა პლანეტების შემაშფოთებელი მოქმედების გამო პერიჰელიუმი მზის მიმართ უძრავი არ არის, ნელა ბრუნავს პლანეტის მოძრაობის მხარეს. ფარდობითობის ზოგადი თეორიიდან გამომდინარე, აინშტაინმა მიიღო, რომ პერიჰელიუმის ბრუნვის სიჩქარე მეტია ნიუტონის თეორიიდან გამომდინარე შედეგთან შედარებით. ეფექტი ყველაზე მნიშვნელოვანია მზის უახლოესი პლანეტის – მერკურისათვის: ნამატი დაახლოებით 8%-ს შეადგენს. ეს არის 43″-ით მობრუნება საუკუნეში. ამ დროისათვის უკვე დადგენილი იყო ასეთი აუხსნელი განსხვავება (გაზომვის ცდომილების ფარგლებში) ასტრონომიული დაკვირვებებით მიღებულ მონაცემებსა და ნიუტონის გრავიტაციის თეორიდან გამომდინარე შედეგს შორის.

იმის საჩვენებლად, თუ რამდენად მძლავრია განზომილებათა მოსაზრებები, შევაფასოთ პლანეტის პერიჰელიუმის მოძრაობის სიჩქარის გაზრდის ეფექტი, რომელსაც იძლევა ფარდობითობის ზოგადი თეორიის საკმაოდ რთული განტოლების ამოხსნა გრავიტაციულ ველში პლანეტის მოძრაობისათვის. რასაკვირველია, განზომილებათა ანალიზი ფიზიკურ მოსაზრებებსა და ინტუიციასთან ერთიანობაში უნდა გამოვიყენოთ.

ამოცანა 18.6. შევაფასეთ პლანეტის პერიჰელიუმის ბრუნვის სიჩქარის ნამატი, რასაც იძლევა ფარდობითობის ზოგადი თეორია ნიუტონის გრავიტაციის თეორიასთან შედარებით.

ა მ ო ხ ს ნ ა. ეფექტი დავახასიათოთ ელიფსის დიდი ღერძის შემობრუნების $\Delta\vartheta$ კუთხით პერიოდის (ერთი ბრუნვის) განმავლობაში (იხ. ნახ.



ნახ. 18.3.

18.3). ამოცანის მახასიათებელი პარამეტრებია: G გრავიტაციული მუდმივა, $M_\odot$ მზის მასა, c სინათლის სიჩქარე და A პერიჰელიუმის r დაშო-

რება მზიდან. ნახ. 18.2-დან $r=0B-0F=a-d=a(1-e)$, სადაც a რის ელიფსის დიდი ნახევარღერძი, d– ფოკუსებს შორის ნახევარმანძილი (ერთ-ერთ ფოკუსში მზეა), $e=d/a$ – ელიფსის ექსცენტრისიტეტი. რადიანით გამოსახული კუთხის შეფასებისათვის განყენებული პარამეტრი ამოცანა 18.5-ში შევადგინეთ – იხ. 18.9. გარდა ამისა, გავითვალისწინოთ პერიოდული პროცესების – კუთხის მნიშვნელობას ერთი პერიოდისათვის ვაფასებთ და შემდეგ იგი მეორდება – შესწავლის გამოცდილება (ინტუიცია გამოცდილების კვალობაზე იხვეწება): ფორმულები, როგორც წესი, 2π-ს შეიცავს. ასე რომ, შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\Delta\vartheta_1 = k2\pi\frac{GM_\odot}{c^2a(1-e)}. \tag{18.11}$$

k~1ერთის რიგის განყენებულ კოეფიციენტს განზომილებათა მოსაზრებებიდან ვერ დავადგენთ. ძნელი არ არის მივხვდეთ, რომ (18.11) შეფასება შესწორებას საჭიროებს. მართლაც, მზიდან უშორესი B წერტილი – აფელიუმი – რომ აგვეღო, მანძილი იქნებოდა $a(1+e)$ და დიდი ღერძის შემობრუნების კუთხისათვის მივიღებდით:

$$\Delta\vartheta_2 = k2\pi\frac{GM_\odot}{c^2a(1+e)}. \tag{18.12}$$

მაგრამ $\Delta\vartheta_1$ და $\Delta\vartheta_2$ ტოლი უნდა იყოს, როგორც ვერტიკალური კუთხეები, რასაც (18.11) და (18.12) არ აკმაყოფილებს. ყველაზე მარტივია, პასუხად ამ კუთხეების საშუალო არითმეტიკული ჩავთვალოთ და

$$\Delta\vartheta = k2\pi\frac{GM_\odot}{c^2a(1-e^2)}. \tag{18.13}$$

საინტერესოა, (18.13) შეფასება შევადაროთ აინშტაინის ამონახსენს, რომლის მიღება მაღალ კვალიფიკაციას მოითხოვს: საჭიროა ტენზორული ალრიცხვის გამოყენება და არაწრფივი განტოლებების მეორე მიახლოებაში ამოხსნა. ასეთი შედარება გვაძლევს, რომ k=3. ამდენი ძალისხმევაა საჭირო და მკაცრი ამონახსენი მხოლოდ 3-ჯერ განსხვავდება უბრალო შეფასებით მიღებული პასუხისაგან. თვალსაჩინო და დამაჯერებელი მაგალითია იმისა, თუ რამდენად აუცილებელია შეფასების ცოდნისა და უნარ-ჩვევების დაუფლება. ფიზიკის სწავლების მეთოდიკაში ეს სათანადოდ არ არის გათვითცნობიერებული.

ფარდობითობის ზოგადი თეორია სუსტი გრავიტაციული ველებისათვის საფუძვლიანადაა დადასტურებული ~0,01%-ის სიზუსტით. აქტუალურია მისი შემოწმება ძლიერი ველებისათვის, რამეთუ გრავიტაციის

სხვა რელატივისტურ თეორიებსაც აქვს გარკვეული პრეტენზიები.

სამყაროს აგებულებასა და ევოლუციას კოსმოლოგია სწავლობს. დიდ მასშტაბებში ფუნდამენტურ ურთიერთქმედებებიდან გრავიტაცია დომინირებს. ამიტომ კოსმოლოგიის შესწავლის ფიზიკური საფუძველი ფარდობითობის ზოგადი თეორიაა.

ამოცანა 18.7. რას წარმოადგენს გრავიტაციული ტალღა და რა სიჩქარით გავრცელდება იგი ვაკუუმში?

ა მ ო ხ ს ნ ა. ცნება გრავიტაციული ტალღისა, რომელიც ელექტრომაგნიტური ტალღის მსგავსად ვაკუუმში ვრცელდება, ფარდობითობის ზოგად თეორიასთან ერთად დაიბადა. გრავიტაციულ ტალღას ცვლადი აჩქარებით მოძრავი სხეულები გამოასხივებს. მათ მახლობლად დრო-სივრცის სიმრუდე იცვლება და ეს ცვლილება პერიოდული პროცესის – გრავიტაციული ტალღის – სახით ვრცელდება (თუ ბატუტის მაგალითს დავუბრუნდებით, წარმოიდგინეთ, რომ მძიმე ბირთვი ირხევა – ბატუტში ტალღა გაირბენს). გამომდინარე ფიზიკის ერთიანობიდან, გრავიტაციული ტალღა ვაკუუმში c სიჩქარით ვრცელდება.

რადგან გრავიტაციული ურთიერთქმედება სუსტია, გრავიტაციული ტალღების სიმძლავრე ძალზე მცირეა. მაგალითად, რამდენიმე მ^3 მოცულობის კვარცის ძელის საკუთარი რხევისას გამოსხივებული გრავიტაციული ტალღის სიმძლავრე მხოლოდ ~10^{-20} ვატს შეადგენს. ამიტომ შესაძლებელია რეგისტრირება მხოლოდ იმ გრავიტაციული ტალღებისა, რომლებსაც ასტრონომიული წყაროები ასხივებს: ორმაგი ვარსკვლავები, სწრაფად მბრუნავი ასიმეტრიული ნეიტრონული ვარსკვლავები (პულსარები), ზეახალი ვარსკვლავების აფეთქება... მაგრამ მათი გამოსხივების სიმძლავრეც მცირეა: ასე მაგალითად, ორმაგ ვარსკვლავთა ენერგიის დანაკარგი გრავიტაციულ გამოსხივებაზე წელიწადში მათი საერთო ენერგიის ~10^{-12} ნაწილს შეადგენს. გრავიტაციული ტალღები სხეულებზე მოქმედებისას იწვევს მათი ნაწილების უმნიშვნელო ფარდობით წანაცვლებას, დეფორმაციას. ამის საფუძველზე ცდილობენ გრავიტაციული ტალღების აღმოჩენას. სხვადასხვა ქვეყანაში შენდება გიგანტური დანადგარები, რომელთა ორი ანტენა რამდენიმე კილომეტრზეა დაშორებული და ლაზერული ინტერფერომეტრით შესაძლებელი იქნება მათი სარკეების წანაცვლების დაფიქსირება 10^{-16} სმ-ის სიზუსტით. მუშავდება სხვა ტიპის მიმღები ანტენაც: ~1–3 მეტრი სიგრძის რამდენიმე ტონიანი მასის ცილინდრში, რომელიც ~10^{-2} K ტემპერატურამდე უნდა გაცივდეს, გრავიტაციული ტალღების მიერ აღძრული დაბალი სიხშირის

რხევების რეგისტრირება. ასეთი ანტენებისათვის საჭიროა ~10^{-14} სმ-ის სიზუსტე. გრავიტაციული ტალღების *უშუალო* რეგისტრირება ფიზიკისა და ტექნიკის უმნიშვნელოვანესი მიღწევა იქნება.

გრავიტაციული ტალღების არსებობა დადასტურებულია არაპირდაპირი გზით მრავალწლიან, მოყოლებული გასული საუკუნის 70-იანი წლებიდან, დაკვირვებათა შედეგად. გამოიკვლიეს ერთ-ერთი ორმაგი ნეიტრონული ვარსკვლავის – პულსარის – საერთო მასათა ცენტრის გარშემო ბრუნვის პერიოდის შემცირება, რაც მათ დაახლოებას ნიშნავს (წელიწადში რამდენიმე მეტრით).

ნეიტრონული ვარსკვლავი ძირითადად ნეიტრონებისაგან შედგება. მისი რადიუსი ~10 კმ-ის, მასა მზის მასის რიგისაა და სწრაფად ბრუნავს (პერიოდი ~600 ბრ/წმ-ს აღწევს), რის გამოც ამავე სიხშირის რადიოიმპულსებს გამოასხივებს და პულსარი ეწოდება. მათი არსებობის წინასწარმეტყველება და აღმოჩენა თავისთავად უმნიშვნელოვანესი მეცნიერული მიღწევაა.

დადგინდა, რომ ენერგიის დანაკარგი სრულად ეთანხმება ფარდობითობის ზოგად თეორიას *გრავიტაციული გამოსხივების* (რომლის ინტენსივობა აინშტაინმა 1918 წელს გამოთვალა) გათვალისწინებით. ეს უეჭველი დადასტურებაა გრავიტაციული ტალღების არსებობისა. ამ გამოკვლევისათვის 1993 წელს ამერიკელ მეცნიერებს ჰალსსა და თეილორს ნობელის პრემია მიენიჭათ.

ამოცანა **18.8.** განვითარების ადრეულ ეპოქაში მეტაგალაქტიკა – სამყაროს დაკვირვებადი ნაწილი – აირისა და გამოსხივების ერთგვაროვან იზოტროპიულ ერთობლიობას წარმოადგენდა. ვარსკვლავები წარმოიშვა სიმკვრივის ფლუქტუაციის გამო, რაც ალაგ-ალაგ ნაწილაკების შემჭიდროებას, შედედებას იწვევს. გრავიტაციული მიზიდვის გამო ეს არეები აღარ იშლება, პირიქით – იკუმშება. შევაფასოთ მათი კრიტიკული ზომა.

ა მ ო ხ ს ნ ა. მახასიათებელი პარამეტრებია: G გრავიტაციული მუდმივა, მეტაგალაქტიკის ρ სიმკვრივე და სითბური მოძრაობის u სიჩქარე. მათი განზომილებებია: $[G]$=ნ·მ^2/კგ^2=მ^3/წმ^{2}კგ; $[\rho]$=კგ/მ^3; $[u]$=მ/წმ. შევადგინოთ სიგრძის განზომილების მქონე სიდიდე:

$$R_G = u/\sqrt{G\rho}\,. \tag{18.14}$$

R_G-ს ჯინსის სიგრძე ეწოდება. გრავიტაციული მიზიდავა $R>R_G$ ზომის შედედებული არისათვის აჭარბებს წნევის ძალებს, იგი იკუმშება და კონკრეტული პირობების მიხედვით შეკუმშვის შედეგად შეიძლება წარმოიშვას ან თეთრი ჯუჯა, ან ნეიტრონული ვარსკვლავი, ან შავი ხვრელი.

პასუხები, მითითებები, ამოხსნები

1.6. $t = \dfrac{t_1 t_2}{2t_2 - t_1} = 3$ წთ.

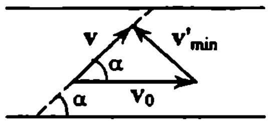
1.7. $t_1 = \dfrac{n_2 l_2}{v_1 + v_2}$, $t_2 = \dfrac{n_1 l_1}{v_1 + v_2}$.

1.8. ავსების სისწრაფე დამოკიდებულია წვიმის წვეთების სიჩქარის მხოლოდ ვერტიკალურ მდგენელზე, რომელსაც ქარი არ ცვლის (ჰორიზონტალურად უბერავს).

1.9. $2v$; 0; $v\sqrt{2}$.

1.10. $\mathbf{v}_{21} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1 = -\mathbf{v}_{12}$ ($\mathbf{v}_{21}$ არის მეორე ავტომობილის სიჩქარე პირველის მიმართ – დახაზეთ).

1.11. $v'_{min} = v_0 \sin\alpha$ ნახ. 1.1-ის მიხედვით $\mathbf{v}'$ ვექტორის მოდული უმცირესი იქნება, თუ იგი მართობია $\mathbf{v}$ ვექტორისა.



ნახ. 1.1.

1.12. $t = h/2v = 5$ წმ; 75 მ-ით დაბლა ქვედა სხეულის საწყისი მდებარეობიდან.

1.13. სფეროზე, რომლის რადიუსი დროის პროპორციულად იზრდება, ცენტრი კი ქვევით მოძრაობს თავისუფალი ვარდნის აჩქარებით.

1.14. (1.1)-დან $\Delta\mathbf{v} = \Delta\mathbf{v}' + \Delta\mathbf{v}_0$, $\Rightarrow$ მოძრაობის Δt დროზე გაყოფით (1.4)-ს მივიღებთ.

2.10. რა სიზუსტითაც თვით დედამიწა.

2.12. $3 \cdot 10^{-8}$ სმ/წმ^2 – ასეთი აჩქარების აღმოჩენა ჩვენს ხელსაწყოებს არ შეუძლია.

2.13. $\sim 10^{10}$ სმ/წმ$^2 \sim 10^7\, g$!

3.5. დაკვირვებებისა და ცდების შედეგების განზოგადებით.

3.6. არ არსებობს გამორჩეული ინერციული ათვლის სისტემა; უძრავ ვარსკვლავებთან დაკავშირებული.

4.2. ნიუტონის III კანონიც და მასის განსაზღვრებაც – იხ. პარ. 4.2.

4.7. თავისუფლად ვარდნილ სხეულთან დაკავშირებული ათვლის სისტემა არაინერციულია.

4.8. არა. დავუკავშიროთ ათვლის სისტემა ნებისმიერად მოძრავ სხეულს. უსასრულოდ მცირე დროის განმავლობაში ყოველთვის შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ სხეული მუდმივი სიჩქარით მოძრაობს

და ათვლის სისტემა ინერციულია. ამიტომ ინვარიანტობა ინერციული ათვლის სისტემის არჩევის მიმართ ავტომატურად ნიშნავს სხეულის სიჩქარეზე დამოუკიდებლობას.

5.1. $\Delta\mathbf{p}/\Delta t = \mathbf{F}$ – ძალა არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც სხეულზე სხვა სხეულების მოქმედების ზომას წარმოადგენს და ტოლია იმპულსის ცვლილების სისწრაფისა.

5.2. არა; ფიზიკის უზოგადესი დებულება – ინერციის პრინციპი (III სტრუქტურული საფეხური, იხ. სქემა შესავალში) – ვერ იქნება იმპულსის მუდმივობის კანონის, რომელიც ფიზიკის II სტრუქტურულ საფეხურს განეკუთვნება, კერძო შემთხვევა. პირიქით, იმპულსის მუდმივობის კანონი არ შეიძლება ეწინააღმდეგებოდეს უზოგადეს დებულებას – შდრ. ამოც. 4.1.

5.3. კგ·მ^2/წმ^2=ჯ, კგ·მ/წმ $\Rightarrow$ ამ მუდმივების მნიშვნელობათა შედარება შეუძლებელია; არა.

5.4. ისევ იმპულსის მუდმივობის კანონს.

5.5. მუდმივია ჩაკეტილი სისტემის – სხეული+დედამიწა – ენერგია და იმპულსი.

6.4. ელექტრომაგნიტურს.

6.6. ელექტრული მუხტი არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც ელექტრომაგნიტურ ველთან დამუხტული სხეულის ურთიერთქმედების ზომას წარმოადგენს და ნიშნის სიზუსტით ტოლია ველის მოცემულ წერტილში რიგრიგობით უძრავად მოთავსებულ მუხტსა და ეტალონზე მოქმედი ძალების მოდულთა შეფარდებისა.

6.7. ორგვარობა, ადიტიურობა, მუდმივობა.

6.8. არა, მუხტის ნიშნის შერჩევა პირობითია.

6.9. $\Delta e/e = 10^{-21}$ – განსხვავება არ არის მძიმის შემდეგ 21-ე ნიშნამდე!

6.10. არა; დაბადების დროის მომენტთა სხვაობის განმავლობაში არ შესრულდებოდა მუხტის მუდმივობის კანონი.

6.11. $\sim 10^{-8} - 10^{-9}$ კ.

8.4. ურთიერთმართობ ელექტრულ და მაგნიტურ ველებს.

8.5. თანაბარწრფივად მოძრავი წერტილოვანი მუხტის ველი – გამოსახულია ნახ. 7.3-ზე.

8.6. არა; ინვარიანტობის გამო წერტილოვანი მუხტი არც ერთ ინერციულ ათვლის სისტემაში არ არის ნეიტრალური, ამიტომ მისი მოძრაობისას ვერ მივიღებთ „წმინდა“ მაგნიტურ ველს, მაგნიტურ ველთან ერთად ყოველთვის არსებობს ელექტრული ველიც. ნახ. 8.1-ის მიხედვით, თუ მოძრავ სისტემაში მხოლოდ „წმინდა“

ელექტრული ველი იარსებებდა, ელექტრული ძალა გაუწონასწორებელი დარჩებოდა და დაირღვეოდა ინერციის პრინციპი.

8.7. არა: 1. თუ რომელიმე ინერციულ ათვლის სისტემაში ელექტრული და მაგნიტური ველები ურთიერთმართობი არ არის, 2. თუ რომელიმე ინერციულ ათვლის სისტემაში ელექტრული და მაგნიტური ველები ურთიერთმართობია და $E = cB$. მაგალითად გამოდგება ბრტყელი ელექტრომაგნიტური ტალღა – იხ. ამოცანა 8.2.

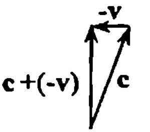
10.1. $v = \omega r = 3{,}8 \cdot 10^5$ კმ/წმ $> c$!

10.2. არა.

10.3. $v > c$.

10.4. დაინახავს; ადამიანთან დაკავშირებულ ინერციულ ათვლის სისტემაში, ისევე როგორც ნებისმიერში, სინათლე ერთნაირი სიჩქარით ვრცელდება (მაკროსკოპული სხეულებისათვის შესაძლებელია მხოლოდ $c < v$ სიჩქარით მოძრაობა).

10.5. $\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{v}_s$; c.



ნახ. 10.3.

10.8. $\Delta t = \dfrac{r}{c-v} - \dfrac{r}{c+v} \approx \dfrac{2r}{c} \cdot \dfrac{v}{c} \approx 3$ სთ $\left(\dfrac{v^2}{c^2} \approx 0\right)$.

10.9. 45^0

10.10. $\Delta t = t_{\parallel} - t_{\perp} \approx \dfrac{l}{c} \cdot \left(\dfrac{v}{c}\right)^2 \approx 4 \cdot 10^{-16}$ წმ – ეს გამოიწვევდა ინტერფერენციული ზოლების წანაცვლებას სიგანის 0,4 ნაწილით, შესაძლებელი იყო 0,01 ნაწილით წანაცვლების შემჩნევა.

$$t_{\parallel} = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} \approx \frac{2l}{c}\left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right),\ t_{\perp} = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}} \approx \frac{2l}{c}\left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right).$$

$\mathbf{v}$-ს მართობად გავრცელებისას სინათლის სიჩქარე ინტერფერომეტრის მიმართ $\sqrt{c^2 - v^2}$-ს ედრებოდა (იხ. ნახ. 10.3 – მსგავსად $-\mathbf{v}$ სიჩქარის დინების მართობად მცურავი ნავისა, თუ დინებას „ეთერის ქარი“ შექმნიდა).

11.3. არა, დაირღვეოდა მიზეზობრივი კავშირი.

11.11. არსებობს ისეთი ათვლის სისტემა, რომელშიც B ადრე მოხდება A-ზე (მათ შორის შეუძლებელია მიზეზობრივი კავშირი), მაგრამ ერთსა და იმავე ადგილზე – არა.

12.3. თუ $v = c$, $\Delta t = \infty$ – ეს შეუძლებელია, ამიტომ: 1. მაკროსკოპული სხეულებისათვის ყოველთვის $v < c$; 2. სინათლისათვის არ არსებობს საკუთარის სისტემა და საკუთარი დრო.

$v>c$-თვის ფესქვეშა გამოსახულება უარყოფითია და ფორმულას ფიზიკური აზრი არა აქვს.

12.4. 1,25; 2.

12.5. $l = v\tau = v\gamma\tau_0 = 54$ მ; $l' = v\tau_0 = 7{,}4$ მ.

12.6. 1 წამს: ერთნაირი ლოკალური (გაიხსენეთ გალილეის ფარდახა-მოშვებული კაიუტა) ექსპერიმენტების შედეგები აუცილებლად ერთნაირია – ინერციული ათვლის სისტემები ეკვივალენტურია.

12.7. ფიზიკური შედეგები საათის მექანიზმზე არ არის დამოკიდებული, თუ არადა – ლოკალური ექსპერიმენტით სისტემის თანაბარწრფივ მოძრაობას აღმოვაჩენდით, რაც ფარდობითობის პრინციპს ეწინააღმდეგება.

12.10. უსასრულოდ მცირე დროის განმავლობაში ნებისმიერი მოძრაობა შეიძლება თანაბარწრფივად ჩავთვალოთ და გამოვიყენოთ (12.2) ფორმულა. სასრული დროის შუალედებზე გადასასვლელად საჭიროა ინტეგრირება.

13.2. თუ $v = c$, $l = 0$ – ეს შეუძლებელია, ამიტომ მაკროსკოპული სხეულებისათვის ყოველთვის $v < c$. $v > c$-თვის ფესქვეშა გამოსახულება უარყოფითია და ფორმულას ფიზიკური აზრი არა აქვს.

13.3. რაკეტაში სინათლის იმპულსი საწყის წერტილში ბრუნდება.

13.5. უეჭველად: კოსმონავტის თვალსაზრისით, ლაბორატორიის დამკვირვებელმა ერთდროულად არ აითვალა ღეროს კოორდინატები, წინა კიდის კოორდინატი უფრო ადრე აიღო და ამიტომაც სიგრძე ნაკლები გამოუვიდა (საათების სინქრონიზაციის ფარდობითობის გამო). ერთსა და იმავე მოვლენას მოძრავი და უძრავი დამკვირვებელი განსხვავებულად ხსნის (ფარდობითობის გამოვლენა), მაგრამ თითოეულის ახსნას *ყველა* ეთანხმება. ამით აისახება *ფიზიკის კანონების ობიექტურობა, ისინი არ არის დამოკიდებული დამკვირვებლის (ინერციული ათვლის სისტემის) არჩევაზე.*

13.6. $l' = l\sqrt{1 - v^2/c^2} = 700$ მ.

13.7. 1 მ – შდრ. ამოც. 12.6.

13.8. მსჯელობა ემყარება სიგრძის აბსოლუტურობის ცნებას. შეცდომა აშკარა გახდება, თუ სიგრძის ნაცვლად, ვთქვათ, სხეულის სიჩქარეს განვიხილავთ.

13.9. $V = V_0\sqrt{1 - v^2/c^2}$, სადაც $V_0 = l_0^3$ უძრავი კუბის მოცულობაა.

$$q = \rho_0 V_0 = \rho V = \text{inv}, \Rightarrow \ \rho_0 = \rho\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

15.2. $4c/5$.

15.3. c – ფოტონის „თვალსაზრისით“, $2c$ – ლაბორატორიული დამკვირვებლის თვალსაზრისით.

16.3. ორივეს – იხ. პარ. 4.2.

16.4. ორივეს – იხ. პარ. 4.2. ძალა არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც სხეულზე სხვა სხეულებისა თუ ველის მოქმედების ზომას წარმოადგენს და ტოლია იმპულსის ცვლილების სისწრაფისა.

16.5. $\dfrac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t} = m\dfrac{\Delta(\gamma \mathbf{v})}{\Delta t} = \gamma m\dfrac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} + m\mathbf{v}\dfrac{\Delta \gamma}{\Delta t} = \mathbf{F}.$

თუ $\mathbf{v}$ სიჩქარის მოდული მუდმივია, ე. ი. $\mathbf{F} \perp \mathbf{v}$, მაშინ $\gamma = \text{const}$, $\Delta\gamma = 0$ და $\gamma m\mathbf{a} = \mathbf{F}$ – აჩქარების მიმართულება ემთხვევა ძალის მიმართულებას, იხ. ნახ. 16.3; თუ არადა – $\gamma m\mathbf{a} + m\dfrac{\Delta\gamma}{\Delta t}\mathbf{v} = \mathbf{F}$ და $\mathbf{a}$ აჩქარების მიმართულება $\mathbf{F}$ ძალის მიმართულებას დაემთხვევა მხოლოდ წრფივი მოძრაობისას: $\mathbf{a} \uparrow\uparrow \mathbf{v} \uparrow\uparrow \mathbf{F}$.

16.6. $\mathbf{p} = m\mathbf{v} \to \infty$, $v \to \infty$; $\mathbf{p} \to \infty, v \to c$ – იხ.ნახ. 16.1.

17.11. $E/mc^2 \sim 10^5$; $E >> mc^2$; $E \approx pc$ $(E = pc)$.

17.12. $\sqrt{5}\,c/3$; $5{,}6 \cdot 10^{-19}$ კგ·მ/წმ.

17.13. $3 \cdot 10^{-10}$; $9 \cdot 10^{-4}$.

17.14. არა; $\Delta m/m = E/9c^2 \sim 10^{-10}$.

17.15. არა, ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, საწყისი ნაწილაკის მასა აღემატება მიღებულ ნაწილაკთა მასების ჯამს.

17.16. $v^2 = v_1^2 + v_2^2$, $\Rightarrow$ $\vartheta = 90^0$; კინეტიკური ენერგიების ჯამის მუდმივობა არ გვაძლევს პითაგორას თეორემას.

ლიტერატურა

1. Вигнер Е. Этюды о симметрии. Перев. с англ.– М., Мир, 1964.
2. Ньютон И. Математические начала натуральной философии. Перевод с латинского А. Н. Крылова. – М., Наука, 1989, с. 39.
3. Полиевктов-Николадзе Н. М. О принципах механического движения.– Труды ТГУ, Физика, т. 168, 1976, с. 63-72.
   Полиевктов-Николадзе Н. М. О Ньютоновской концепции механического движения. – Труды ТГУ, Физика, т.173, 1976, с. 95-108.
4. ხაზარაძე თ., შუკაკიძე ლ., მთიულიშვილი კ. ინერციის კანონის სწავლებისათვის, ფიზიკა და მათემატიკა სკოლაში, 1990, 4, გვ. 35-40.
   Хазарадзе Т. М., Ал-Шанти М. С. Физические и методические аспекты изучения принципа инерции.–Периодический научный журнал „Интеллект“, Фонд развития науки, 1(7), 2000, с. 222.
5. მირიანაშვილი მ. ზოგადი ფიზიკის კურსი, ნაწილი I, მექანიკა, თბ., თსუ, 1964.
6. კიკოინი ი., კიკოინი ა. ფიზიკა, მექანიკა, მე-7 გამოც./ თარგმ. რუსულიდან, თბ., განათლება, 1986.
7. Лауэ М. Статьи и речи. Перев. с немец.– М., Наука, 1969, с. 154.
8. Логунов А. А. К работам Анри Пуанкаре о динамике электрона.– М., ИЯИАН, 1984.
9. Эйнштейн А. К электродинамике движущихся тел.– Сборник научных трудов, т. I.– М., Наука, 1965, с. 7-35.
10. ხაზარაძე თ. ზოგადი ფიზიკის სწავლების მეთოდიკის საკითხები, ნაწ. I, თბ., ინტელექტი, 1996.
11. ბაქრაძე კ. ლოგიკა, თბ., სახელგამი, 1955.
12. Волковыский Р. Ю. Определение физических понятий и величин,М., Просвещение, 1976.
13. Бугаев А. И. Методика преподавания физики в средней школе, М., Просвещение, 1981.
14. Методика преподавания физики в 8-10 классах средней школы/ Под ред. В.П. Орехова и А. В.Усовой, М., Просвещение, 1979.
15. Тейлор Э., Уилер Дж. Физика пространства-времени. Перевод с англ.,– М., Мир, 1971.

16. ხაზარაძე თ. ფიზიკის ამოცანების ამოხსნის მეთოდიკა, თბ., თსუ, 2003.
17. ხაზარაძე თ. ზოგადი ფიზიკის კურსი. ელექტრობა, თბ., თსუ, 1991.
18. ხაზარაძე თ., ჭელიძე ზ. ელექტრომაგნიტურ ველში მუხტზე მოქმედი ძალის დემონსტრირება, ფიზიკა და მათემატიკა სკოლაში, 1988, 2, გვ. 55-58.
19. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, т. 5. Перевод с англ., М., Мир, 1965, с. 15.
20. Холтон Д. Эйнштейн, Майкельсон и„решающий“ эксперимент. Перевод с англ.– Эйнштейновский сборник 1972, М., Наука, 1974, с. 104-211.
21. მიაკიშევი გ., ბუხოვცევი ბ. ფიზიკა-11. მე-10 გამოც./ თარგმ. რუსულიდან, თბ., განათლება, 1988.
22. Okun L. B. Note on the meaning and terminology of Special Relativity.– Eur. J. Phys. 19, 4, 1998, p. 403-406.
Окунь Л. Б. Понятие массы. УФН, 158, 3, 1989, с. 511-533; 170, 12, 2000, с. 1366-1371.
23. მირიანაშვილი მ. ფარდობითობის თეორია, თბ., განათლება, 1967.
24. Киттель Ч., Найт У., Рудерман М. Механика. Перевод с англ., М., Наука, 1971.
25. Астахов А. В. Курс физики, т.I. Механика, М., ГРФМЛ, 1977.
26. Бонди Г. Относительность и здравый смысл. Перевод с англ.– М., Мир, 1967.
27. Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике, М., Наука, 1972.
28. Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. Перевод с англ., М., Наука, 1965, с. 225.
29. Орир Дж. Популярная физика. Перевод с англ., М., Мир, 1969.
30. ხაზარაძე თ., ალ-შანტი მ.ს. სწორად ვასწავლოთ ფარდობითობის თეორია, ფიზიკა და მათემატიკა სკოლაში, 115, 1998, გვ. 11-15.
31. Эйнштейн А. Сущность теории относительности.– Сборник научных трудов, т. 2, М., Наука, 1966, с. 5-82.
32. Гинзбург В. Л. О физике и астрофизике. М., Наука, 1974.

* * *

მასკულტურის იდეოლოგიაზე დამყნობილი განათლების სისტემის გლობალიზაციისა და ჩვენში ბრმად მიმდევართა მძლავრობის პირობებში დიდი ძალისხმევაა საჭირო, რათა ტრადიციულად მაღალი ხარისხი ფიზიკა-მათემატიკური განათლებისა არ დავკარგოთ და XXI საუკუნის მოთხოვნათა დონეზე ავიყვანოთ. მომრავლდნენ თუ მოამრავლეს განათლების „გამარტივების" მსურველნი, რომლებსაც „რად გვინდა ამდენი" პირზე აკერიათ და საქმითაც აკეთებენ ამას, „რეფორმას" ამოფარებულები. ეს ერის ინტელექტუალურ სიმდიდრეს კარგს არაფერს უქადის.

ფუნდამენტური ფიზიკური განათლების განვითარება, თანამედროვე ორიგინალური სახელმძღვანელოების შექმნა შეუძლებელია ფიზიკური და დიდაქტიკური სამეცნიერო კვლევის გარეშე. მეტად მწირია ქართულ ენაზე სათანადო ლიტერატურა. ვიმედოვნებ, წინამდებარე წიგნი ნაწილობრივ მაინც შეუწყობს ხელს ამ ხარვეზის გამოსწორებას.

ვისაც ხელეწიფება, ყველამ უნდა დადოს თავისი აგური.

თამაზ ხაზარაძე

2002-2005

ავტორი არის ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ზოგადი ფიზიკის კათედრის პროფესორი, პედაგოგიკის მეცნიერებათა დოქტორი ფიზიკის სწავლების მეთოდიკის სპეციალობით (სადისერტაციო თემა: „ზოგადი ფიზიკის თანამედროვე კურსის აგებისა და სწავლების საკითხები"). გამოქვეყნებული აქვს 60-ზე მეტი ნაშრომი ქართულ, რუსულ და ინგლისურ ენებზე საქართველოსა და მის ფარგლებს გარეთ, მიძღვნილი ფიზიკის სწავლების პრობლემატიკისადმი, მათ შორის – რამდენიმე ორიგინალური სახელმძღვანელო და მონოგრაფია. განავითარა ტრადიციები ფიზიკის დიდაქტიკის ქართული სკოლისა, რომელსაც საფუძველი ჩაუყარა აკად. მათე მირიანაშვილმა. პროფ. თამაზ ხაზარაძის ხელმძღვანელობით დაცულია რამდენიმე საკანდიდატო დისერტაცია და სამაგისტრო ნაშრომი ფიზიკის სწავლების მეთოდიკის სპეციალობით, ერთი საკანდიდატო – უცხოელის (იორდანია) მიერ.

სარჩევი

მ ე ქ ა ნ ი კ ა

ე ლ ე ქ ტ რ ო მ ა გ ნ ე ტ ი ზ მ ი დ ა ო პ ტ ი კ ა

ფ ა რ დ ო ბ ი თ ო ბ ი ს თ ე ო რ ი ა

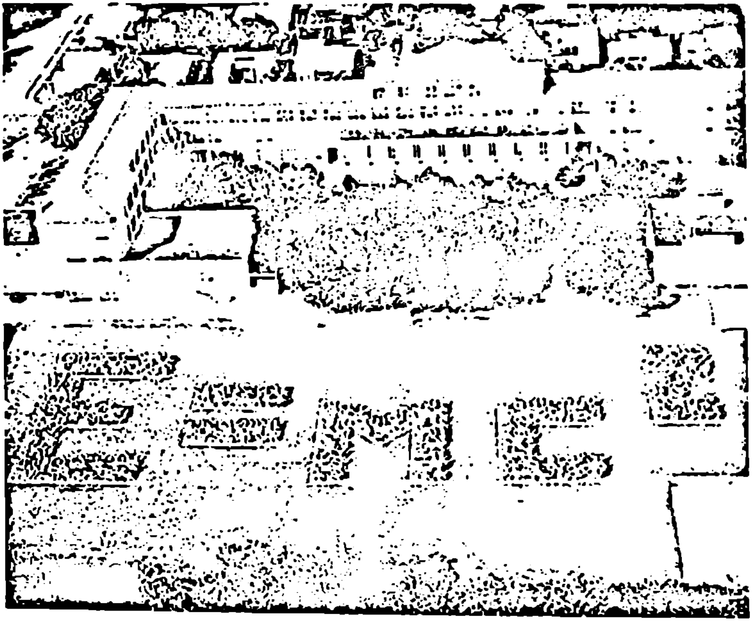
გამომცემლობის რედაქტორი ე. გონჯილაშვილი
კორექტორი მ. ქუმსიაშვილი

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 30.05.05
საბეჭდი ქაღალდი 60×90
პირ. ნაბეჭდი თაბახი 12,18
სააღრ.-საგამომცემლო თაბახი 9, 22
შეკვეთის № 23 ტირაჟი 300

თბილისის უნივერსიტეტის გამომცემლობა.
0128, თბილისი, ი. ჭავჭავაძის გამზ., 14.

გამომცემლობა „უნივერსალი"

თბილისი, 0128, ი. ჭავჭავაძის გამზ. 1
☎: 29 09 60, 8(99) 17 22 30
E-mail: universal@posta.ge



აინშტაინის დაბადებიდან 100 წლისთავის აღსანიშნავად, 1979 წელს, მაიამის (ფლორიდა) ერთ-ერთი სკოლის მოსწავლეებმა „ცოცხლად“ გამოსახეს XX საუკუნის მეცნიერების სიმბოლოდ გადაქცეული ფორმულა, რომელიც, მსგავსად ნიუტონის ვაშლისა, მასკულტურის ელემენტი გახდა.

ასეთი პოპულარიზაცია ხელს უშლის მეცნიერების სიღრმისეულ წვდომას, რამეთუ ემყარება რელატივისტური მასის – სიჩქარეზე დამოკიდებული მასის – ცნებას, რომელზედაც კარგა ხანია უარი თქვა მეცნიერებამ, მაგრამ სასწავლო ლიტერატურაში, მისი კონსერვატიული ხასიათის გამო, მყარად მოიკიდა ფეხი.

ნაწყვეტი აინშტაინის არქივში დაცული 1948 წლით დათარიღებული წერილიდან:

„სწორი არ არის ვილაპარაკოთ $M=m/(1-v^2/c^2)^{1/2}$ მოძრავი სხეულის მასაზე, რადგან შეუძლებელია მისი ნათელი განსაზღვრა. უმჯობესია m „უძრაობის მასით“ შემოვისაზღვროთ“.