ავთანდილ შურღაია

ფიზიკა ამოცანებში

ფარდობითობის სპეციალური თეორია

მეცხრამეტე საუკუნის ბოლო და მეოცე საუკუნის დასაწყისი აღინიშნა გარკვეული სირთულეებით, რომლებიც დაკავშირებული იყო ახალი ექსპერიმენტული მონაცემების ახსნასთან. კლასიკური თეორია ვერ ხსნიდა გარკვეულ მოვლენებს. ამან საბოლოო ჯამში ფიზიკოსები მიიყვანა ახალი კონცეფციების, ახალი თეორიის შექმნამდე. ამ დროს შეიქმნა ორი ახალი თეორია, რომელმაც შეცვალა ჩვენი წარმოდგენები სამყაროს შესახებ. ესენია ფარდობითობის თეორია და კვანტური თეორია. წინამდებარე წერილში განვიხილავთ ამოცანებს ფარდობითობის სპეციალური თეორიის ფარგლებში.

ფარდობითობის სპეციალური თეორია ფიზიკურ მოველენებს და კანონებს განიხილავს ინერციული ათვლის სისტემების თვალსაზრისით. ეს თეორია დაფუძნებულია ორ ძირითად პოსტულატზე: ა) ფიზიკის კანონები ერთნაირია და არ იცვლება ნებისმიერ ინერციული ათვლის სისტემაში და ბ) სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში ერთნაირია ნებისმიერი ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ, მიუხედავად მათი მოძრაობის სიჩქარისა.

აღმოჩნდა, რომ მანძილი, გაზომილი უძრავი და თანაბრად მოძრავი დამკვირვებლის მიერ, ერთმანეთისგან განსხვავებულია. განსხვავებულია აგრეთვე, ამ დამკვირვებლების მიერ გაზომილი ფიზიკური მოვლენის ხანგრძლივობის დრო. კერძოდ, უძრავი დამკვირვებლის მიერ გაზომილი l მანძილი v სიჩქარით მოძრავ ათვლის სისტემაში ნაკლებია დამკვირვებლის მიერ უძრავის ათვლის სისტემაში გაზომილ l_0 მანძილზე:

$$l = l_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\,, \tag{1}$$

სადაც c არის სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში. როგორც ვხედავთ, სიგრძე მცირდება. ასევე განსხვავებულია უძრავი დამკვირვებლის მიერ გაზომილი მოძრავ ათვლის სისტემაში მიმდინარე პროცესის დრო t:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}, \tag{2}$$

სადაც t_0 არის უძრავი ათვლის სისტემაში გაზომილი დრო. ეს ფორმულა გვიჩვენებს, რომ მოძრავ ათვლის სისტემაში ფიზიკური პროცესი მიმდინარეობის დრო t მ ეტია უძრავ ათვლის სისტემაში გაზომილ t_0 დროზე. ორივე დებულება შემოწმებულია და დადასტურებულია ცდებით. აქვე აღვნიშნავთ, რომ დროის ფარდობითობის პრინციპი

ეწინააღმდეგება კლასიკურ მექანიკას, რომლის თანახმად ფიზიკური პროცესების მიმდინარეობის დრო აბსოლუტურია ნებისმიერ ინერციული ათვლის სისტემაში. (ამასთან ერთად მათემატიკურად დრო ფარდობითობის თეორიაში არის ერთ-ერთი საკოორდინატო ღერძი 4-განზომილებიან სივრცეში, რომელსაც მინკოვსკის სივრცე ეწოდება). შესაბამისად ფარდობითობის სპეციალურ თეორიაში განსხვავებულია სიჩქარეთა შეკრების კანონი. წარმოვიდგინოთ, რომ დედამიწიდან გაუშვეს რაკეტა, რომლის სიჩქარე დედამიწის მიმართ არის v. რაკეტიდან გაშვებულ იქნა მეორე რაკეტა v' სიჩქარით პირველი რაკეტის მიმართ. მაშინ მეორე რაკეტის სიჩქარე u დედამიწის მიმართ გამოითვლება ფორმულით:

$$u = \frac{v + v'}{1 + \frac{vv'}{c^2}}, \tag{3}$$

რომელიც განსხვავდება კლასიკური მექანიკის სიჩქარეთა შეკრების კანონისგან. თუ ჩავთლით, რომ სიჩქარეები v და v' ბევრად მცირეა სინათლის სიჩქარეზე, (3) ფორმულიდან მიიღება სიჩქარეთა შეკრების წესი კლასიკურ მექანიკაში: $u = v + v'$.

ფარდობითობის თეორიის უმნიშვნელოვანესი ფორმულა არის კავშირი უძრავი სხეულის m_0 მასასა და სინათლის სიჩქარეს შორის:

$$E = m_0\, c^2 \tag{4}$$

მნიშვნელოვანია აგრეთვე კავშირი სხეულის იმპულსსა და ენერგიას შორის:

$$E = \sqrt{\vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4}, \tag{5}$$

$\vec{p}$ არის $\vec{v}$ სიჩქარით მოძრავი სხეულის იმპულსი

$$\vec{p} = \frac{m_0\, \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \tag{6}$$

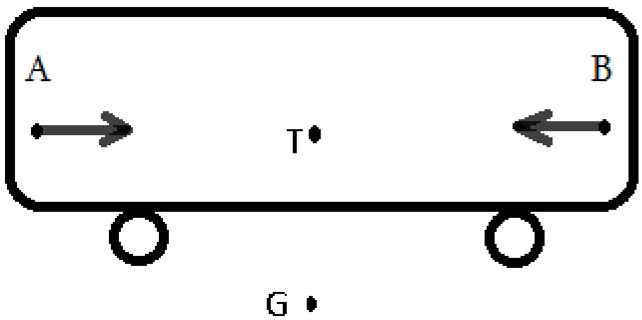
ნიუტონის მეორე კანონი ფარდობითობის სპეციალურ თეორიაში ჩაიწერება იმპულსის მეშვეობით, როგორც მისი წარმოებული დროით:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}. \tag{7}$$

ფარდობითობის თეორია აგრეთვე აკმაყოფილებს შესაბამისობის პრინციპს, რაც გულისხმობს იმას, რომ სინათლის სიჩქარეზე ბევრად მცირე სიჩქარეებისთვის ფორმულები გადადის კლასიკური მექანიკის ფორმულებში.

უძრავი და მოძრავი დამკვირვებელი: ავტობუსის შუა წერტილში იმყოფება დამკვირვებელი T, რომელიც მოძრაობს ავტობუსთან ერთად მისივე მუდმივი სიჩქარით

დედამიწის მიმართ. მოძრაობას დედამიწიდან აკვირდება დამკვირვებელი G. ავტობუსის ბოლოებიდან - A და B წერტილებიდან - T დამკვირვებლისთვის ერთდროულად გაშვებულია სინათლის სხივი ურთიერთსაპირისპირო მიმართულებით. ა) არის თუ არა სინათლის სხივი ერთდროულად გაშვებული G დამკვირვებლისთვის? ბ) მიიღებს თუ არა T დამკვირვებელი ორივე სხივს ერთდროულად G დამკვირვებლის თვალსაზრისით? რომელი სხივია გაშვებული უფრო ადრე G დამკვირვებლისთვის?



ა) რა თქმა უნდა, G დამკვირვებლისთვის სხივი ერთდროულად არ იქნება გაშვებული, რადგან ეს ორი მოვლენა ხდება ორ განსხვავებულ ადგილას.

ბ) G დამკვირვებლისთვის ორივე სხივს T დამკვირვებელი მიიღებს ერთდროულად, რადგან ეს ორი მოვლენს ხდება ერთი და იგივე ადგილზე - T დამკვირვებელთან. G დამკვირ-ვებლისთვის T დამკვირვებელი მოძრაობს მარცხნიდან მარჯვნივ და სინათლის სხივი გამოშვებულია G-თვის უფრო ადრე, ვიდრე B წერტილიდან, რადგან A წერტილიდან გაშვებული სხივი მოძრაობს მარცხნივ და გადის მეტ მანძილს. B წერტილიდან გაშვებული სხივი მოძრაობს მარჯვნივ იგივე სიჩქარით და გადის ნაკლებ მანძილს. ამიტომ ის G-თვის გაშვებულია უფორ გვიან, ვიდრე სხივი A წერტილიდან.

ლაზერის სიგნალი ორი დამკვირვებლის თვალსაზრისით: წარმოიდგინეთ $5.4 \cdot 10^6$ სიგრძის ვაგონი, რომელიც მოძრაობს მარცხნიდან მარჯვნივ $2.4 \cdot 10^8$მ/წმ სიჩქარით. მისი შუა წერტილიდან გაშვებულია ერთდროულად ლაზერის სხივი მოძრაობის მიმართულებით და მის საპირისპიროდ ვაგონის წინა და უკანა კარების გაღების მიზნით. ა) გაიღება კარები ერთდროულად თუ არა ვაგონის შუაში მყოფი დამკვირვებლის თვალსაზრისით და რა დროის შემდეგ? ბ) თუ უძრავი დამკვირვებელი იმყოფება მოძრავის დონეზე, გაიღება მისთვის კარები ერთდროულად?

ა) ვაგონის შუაში მყოფი დამკვირვებლისთვის ვაგონის ორივე კარი გაიღება

ერთდროულად $t = \frac{5.4 \cdot 10^6}{2 \cdot 2.4 \cdot 10^8}$ =9წმ.

ბ) უძრავი დამკვირვებლისთვის ვაგონის შუა წერტილი და ე.ი. ლაზერის სხივი მოძრაობს წინა კარის მიმართულებით (წინა კარი „გაურბის“ ლაზერის სხივს), ხოლო უკანა კარის

მიმართულებით გაშვებული სხივი მოძრაობს მოძრაობის საპირისპიროდ (უკანა კარი მოძრაობს ლაზერის სხივისკენ) . ე.ი. უკანა კარი გაიღება მისთვის უფრო ადრე.

ელექტრონის მოძრაობა ამაჩქარებელში: ამაჩქარებელში ელექტრონი მოძრაობს $v = 0.96c$ სიჩქარით და გადის l =3 000მ. ა) რა დროში გაივლის ელექტრონი ამ მანძილს ლაბორატორიაში მყოფი უძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით? ბ) რა დროში გაივლის იგივე მანძილს ელექტრონი მასთან ერთად მოძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით? გ) რა სიჩქარით იმოძრავებს ამაჩქარებელი ელექტრონთან ერთად მოძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით?

ა) უძრავი დამკვირვებლისთვის ელექტრონის მოძრაობის დრო იქნება:

$$t = \frac{l}{v} = \frac{3\ 000}{0.96 \cdot 3 \cdot 10^8} = 1.042 \cdot 10^{-5}\text{წმ.}$$

ბ) რადგან ელექტრონთან ერთად მოძრავი დამკვირვებელი მოძრაობას იწყებს და ამთავრებს მასთან ერთად, შეგვიძლია ვთქვათ, რომ მოძრაობის დასაწყისი და დამთავრება ხდება ერთი და იმავე ადგილას, ე.ი. საძიებელი დრო არის ელექტრონის მოძრაობის საკუთარი დრო t_0. ამიტომ მოძრავი დამკვირვებლის მიერ გამოთვლილი დრო გამოითვლება ფორმულით:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow\ t_0 = t\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 1.042 \cdot 10^{-5} \times \sqrt{1 - \frac{(0.96c)^2}{c^2}} = 2.92 \cdot 10^{-6}\text{წმ.}$$

გ) ცხადია, ამაჩქარებლის სიჩქარე იქნება $v = 0.96c$. მართლაც, ელექტრონთან ერთად მოძრავი დამკვირვებლისთვის ამაჩქარებელი მოძრაობს და მისი სიგრძე l_0 ნაკლებია 3000 მეტრზე. $l -$ ზე. ამიტომ

$$l_0 = l\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

შესაბამისად, ამ დამკვირვებლის თვალსაზრისით გაზომილი სიჩქარე იქნება:

$$v = \frac{l_0}{t_0} = l\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} : t\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0.96c.$$

რაკეტის მოძრაობა: დედამიწიდან გაუშვეს რაკეტა დედამიწის მიმართ 0.6c სიჩქარით. რაკეტაში მყოფი დამკვირვებლის თვალსაზრისით რაკეტამ ვარსკვლავს მიაღწია t_0 =4 წელიწადში. ამ დროს დედამიწაზე გაიგზავნა რადიოსიგნალი. როდის მიაღწევს ეს სიგნალი დედამიწას?

ა) დედამიწაზე მყოფი დამკვირვებლის თვალსაზრისით? ბ) რაკეტაში მყოფი დამკვირვებლის თვალსაზრისით? გ) დედამიწაზე მყოფი დამკვირვებლისთვის რა მანძილიდან არის გამოშვებული რადიოსიგნალი?

ა) რაკეტაში მყოფი დამკირვებლისთვის 4 წელიწადი არის საკუთარი დრო. ამიტომ დედამიწაზე მყოფი დამკვირვებლის თვალსაზრისით სიგნალი დედამიწაზე მოაღწევს t დროში, რომელიც ტოლია (რადიოსიგნალი მოძრაობს სინათლის სიჩქარით)

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

აქ l არის მანძილი დედამიწიდან სიგნალის გამოშვების ადგილამდე დედამიწაზე მყოფი დამკვირვებლის თვალსაზრისით. მანძილი ამ დამკვირვებლისთვის ტოლია

$$l = 0.6c \times \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 0.6c \times 5\text{წლ} = 3 \text{ სინათლის წელიწადს.}$$

ამიტომ დედამიწაზე მყოფი დამკვირვებელი რადიოსიგნალს მიიღებს 3 წელიწადში.

ბ) რაკეტაში მყოფი დამკვირვებლის თვალსაზრისით რაკეტამ გაიარა მანძილი $d = 0.6c \times 4\text{წლ} = 4$ სინათლის წელიწადს. იმ T დროში, რომელშიც რადიოსიგნალმა მიაღწია დედამიწას ამავე დამკვირვებლის თვალსაზრისით, რაკეტამ გაიარა მანძილი $0.6T$. მეორეს მხრივ, რადიოსიგნალამა გაიარა მანძილი cT. ამიტომ

$$cT = 0.6cT + 2.4\text{სინ. წელ.}$$

აქედან მივიღებთ:

$$T = \frac{2.4\text{სინ. წელ}}{0.4c} = 6\text{წელ.}$$

გ) მანძილი დედამიწიდან რაკეტამდე სიგნალის გამოშვების მომენტში დედამიწაზე მყოფი დამკვირვებლისთვის, როგორც გამოვთვალეთ, არის 3 სინათლის წელიწადი.