თავი V

სივრცულ-დროითი კონტინუუმი. მინკოვსკის ოთხგანზომილებიანი სივრცე. ათვლის ინერციული სისტემები. კონვენციონალიზმი ნიუტონის მექანიკის შესახებ. არაინერციული სისტემები და ფარდობითობის ზოგადი თეორია. ეკვივალენტობის პრინციპი. სივრცის პრობლემა ფარდობითობის ზოგად თეორიაში. გეომეტრია და ცდა. სივრცის გამრუდება. პუანკარე და აინშტაინი

ყოველი ფიზიკური მოვლენის აღწერის დროს უპირველეს ყოვლისა საჭიროა ვიცოდეთ, თუ სად და როდის მოხდა ეს მოვლენა; წინააღმდეგ შემთხვევაში უბრალოდ შეუძლებელი იქნება ამ მოვლენის რაოდენობრივი მხარის ზუსტი დახასიათება. ადგილის მიხედვით სხეულის მდებარეობა შეიძლება დავახასიათოთ სხვადასხვანაირად; ასე მაგალითად, თუ სხეული მოძრაობს სწორი ხაზის გასწვრივ, მაშინ მის მდებარეობას განსაზღვრავს მხოლოდ ერთი კოორდინატი, თუ მოძრაობას ადგილი ექნება სიბრტყეზე, მაშინ კითხვაზე „სად?“ პასუხი გაიცემა ორი კოორდინატის საშუალებით; მოძრაობა სივრცეში კი ხასიათდება სამი კოორდინატით, ანუ როგორც ამბობენ ჩვენი სივრცე არის სამგანზომილებიანი კონტინუუმი. იმისათვის, რომ დავახასიათოთ მოძრაობა, საკმარისი არ არის მხოლოდ სივრცული კოორდინატების ცოდნა, საჭიროა აგრეთვე ორიენტირება დროშიც; უნდა ვიცოდეთ როდის დაიწყო და როდის დამთავრდა მოვლენა, როგორი იყო მისი ხანგრძლივობა და სხვ. ამასთან დაკავშირებით ყოველი მოძრაობა შეიძლება წარმოვიდგინოთ დინამიკური ან სტატიკური სურათის სახით. პირველი სურათის მიხედვით, სხეულის მდგომარეობა იცვლება დროში, მეორეში კი ეს მდგომარეობები მოცემულია ერთიანად სივრცულ-დროით კონტინუუმში; კლასიკური ფიზიკის მიხედვით, დინამიკურ და სტატიკურ სურათებს შორის არავითარი პრინციპული განსხვავება არ არსებობს; მოძრაობა შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს როგორც ერთი, ისე მეორე სურათის საშუალებით, ვითარება იცვლება მხოლოდ ფარდობითობის თეორიასთან მიმართებაში.

ფარდობითობის თეორია ამ ორი აღწერიდან უპირატესობას ანიჭებს სტატიკურ სურათს და ანსხვავებს მას დინამიკური სურათისაგან. ბუნებრივია ისმება კითხვა: რა წარმოადგენს ამ განსხვავების საფუძველს? რატომ არ არსებობდა იგი კლასიკური მექანიკისათვის და რატომ შეიმჩნა ეს ფარდობითობის თეორიაში? საქმე შემდეგშია: კლასიკური ფიზიკის მიხედვით, სხვადასხვა ინერციულ სისტემაში ერთი და იმავე ფიზიკური პროცესის დასახასიათებლად გვაქვს სხვადასხვა სივრცული კოორდინატები (რომელთა შორის კავშირი მოიცემა გალილეის გარდაქმნის

ფორმულების მიხედვით) და დრო, რომელიც აბსოლუტურია, ანუ ერთნაირად მიედინება სხვადასხვა სისტემაში მყოფ დამკვირვებელთათვის. ასეთ პირობებში არავითარ სიძნელეს არ წარმოადგენს სტატიკური სურათიდან დინამიკურზე გადასვლა და, პირიქით; ამიტომ აღწერის ეს სურათები კლასიკური მექანიკის თვალსაზრისით ეკვივალენტურია. აინშტაინის თეორიის მიხედვით კი მოვლენათა ერთდროულობა ფარდობით ხასიათს ატარებს; ამიტომ ათვლის სხვადასხვა ინერციულ სისტემაში სხვადასხვა იქნება როგორც დროითი, ასევე სივრცული კოორდინატი და ეს განსხვავება მით მეტი იქნება, რაც დიდი იქნება ათვლის ერთი ინერციული სისტემის მეორის მიმართ მოძრაობის სიჩქარე. აქედან გამომდინარე, დრო და სივრცე აღარ შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს უკვე ორი დამოუკიდებელი კონტინუუმის სახით. მოძრაობა უნდა დახასიათდეს სივრცულ-დროით კონტინუუმში, რომელსაც ექნება ოთხი განზომილება: სამი სივრცული და ერთი დრო. ასეთი ოთხგანზომილებიანი კონტინუუმი შეგვიძილა გამოვიყენოთ არა მხოლოდ ფარდობითობის თეორიაში, არამედ კლასიკურ ფიზიკაშიც. განსხვავება მათ შორის თავს იჩენს მხოლოდ მაშინ, როდესაც საქმე გვექნება ერთმანეთის მიმართ დიდი სიჩქარით მოძრავ ინერციულ სისტემებთან.

ამრიგად, დინამიკური სურათით სარგებლობის დროს უნდა გვახსოვდეს, რომ დრო და სივრცის დაყოფა ცალ-ცალკე კონტინუუმებად პირობით ხასიათს ატარებს და რომ სინამდვილეში ისინი სრულიადაც არ წარმოადგენენ დამოუკიდებელ კონტინუუმებს.

კლასიკურ მექანიკაში მოვლენის მიმდინარეობის დასახასიათებლად საჭირო იყო სივრცული კოორდინატები x, y, z და დრო t. ნებისმიერი პროცესის განხილვის დროს სივრცული მდებარეობა წარმოიდგინებოდა, როგორც დროის ფუნქცია. ასე რომ, სამგანზომილებიან სივრცეში საგნის ყოველ მდებარეობას (x, y, z) შეესაბამებოდა დროის გარკვეული მომენტი (t). ანუ: $x = x(t)$

$$y = y(t)$$
$$z = z(t)$$

ეს განტოლებები, რომელნიც იძლევიან მოვლენის დინამიკურ სურათს სამგანზომილებიან სივრცეში, შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ გარკვეული სტატიკური მრუდის სახით ოთხ – x, y, z, t -განზომილებიან სივრცეში. ეს აზრი ფარდობითობის თეორიის ჩამოყალიბების შემდეგ წამოაყენა გერმან მინკოვსკიმ; მან პირველმა შენიშნა, თუ რაოდენ მოსახერხებელი იყო აინშტაინის თეორიის ფორმულირება ოთხგანზომილებიანი სივრცის საშუალებით. მართლაც, განვიხილოთ მაგალითად ორი: A და B მოვლენა, შესაბამისი x_1, y_1, z_1, t_1 და x_2, y_2, z_2, t_2 კოორდინატებით, სადაც

x, y, z სივრცული კოორდინატებია, t კი – დროის კოორდინატი. თუ ცნობილია ოთხივე კოორდინატი, შეგვიძლია ვთქვათ, სად და როდის მოხდა მოვლენა. ე. ი. A მოვლენა მოხდა სივრცის x_1, y_1, z_1 წერტილსა და t_1 მომენტში, B მოვლენა კი – x_2, y_2, z_2 წერტილსა და t_2 მომენტში. შესაძლოა A და B მოვლენებს შორის არსებობდეს რაიმე კავშირი, მაგრამ შესაძლოა ისიც, რომ მათ შორის არავითარი კავშირი არ იყოს. სივრცული ინტერვალი ამ ორ მოვლენას შორის იქნება ასეთი:

$$\Delta r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

დროითი ინტერვალი კი: $\Delta t = t_2 - t_1$

კლასიკური ფიზიკის მიხედვით ძირითადი (K) ინერციული სისტემიდან მეორე (K^1) ინერციულ სისტემაზე გადასვლის დროს Δs და Δt არ იცვლება. მართლაც, კავშირი ინერციულ სისტემებს შორის ამ შემთხვევაში მოიცემა გალილეის გარდაქმნის ფორმულების მიხედვით:

$$t = t^1 \quad \text{და} \quad x = x^1 + vt;$$

ანუ

$$t_1 = t_2' \qquad x_1 = x_1' + vt;$$

$$t_2 = t_2' \quad \text{და} \quad x_2 = x_2' + vt;$$

საიდანაც:

$$\Delta t = \Delta t' \quad \text{და} \quad \Delta x = \Delta x';$$

ანალოგიურად:

$$\Delta y = \Delta y' \quad \text{და} \quad \Delta z = \Delta z'$$

ე.ი. $\Delta r = \Delta r'$ და $\Delta t = \Delta t'$; სივრცული ინტერვალი Δr და დროითი ინტერვალი Δt არ იცვლებიან ერთი ინერციული სისტემიდან მეორეზე გადასვლის დროს. მაგრამ ადვილია ჩვენება იმისა, რომ ყოველივე ეს ძალაში რჩება მხოლოდ დაბალი სიჩქარეების შემთხვევაში. მაღალი სიჩქარეების დროს, ფარდობითობის სპეციალური თეორია გალილეის გარდაქმნის ფორმულების ნაცვლად იყენებს ლორენცის გარდაქმნის ფორმულებს. ამის გამო

$$\Delta r \neq \Delta r' \quad \text{და} \quad \Delta t \neq \Delta t'$$

მართლაც, ლორენცის გარდაქმნათა ფორმულების მიხედვით:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} \quad \text{და} \quad t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

ამიტომ

$$x_2 - x_1 = \frac{x_2' - x_1' + v(t_2' - t_1')}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

და

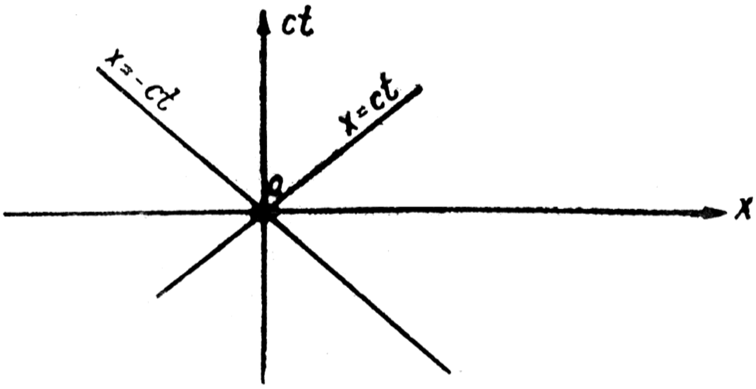
$$t_2 - t_1 = \frac{t_2' - t_1' + \frac{v}{c^2}(x_2' - x_1')}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}.$$

აღმოჩნდა, რომ თუმცა სივრცული და დროითი ინტერვალი ორ A და B მოვლენას შორის იცვლება, როდესაც ათვლის ერთი სისტემიდან გადავდივართ მეორე სისტემაზე, მაგრამ სამაგიეროდ ინახება ასეთი გამოსახულება:

$$c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2 = inv.$$

სიდიდეს $\Delta s = \sqrt{c^2 \Delta t^2 - \Delta r^2}$ ეწოდება მოვლენათა შორის ინტერვალი; იგი გვიჩვენებს, თუ როგორი თანაფარდობაა დროით და სივრცულ ინტერვალებს შორის. მოვლენათა შორის ინტერვალი Δs შეიძლება იყოს ნამდვილი, თუ $c\Delta t > \Delta x,$ წარმოსახვითი, თუ $c\Delta t < \Delta x$ და ნულოვანი, როდესაც $c\Delta t = \Delta x$.

შევეცადოთ ახლა გავარკვიოთ ΔS ინტერვალის ფიზიკური მნიშვნელობა (15.92–106); ამისათვის წარმოვიდგინოთ მოვლენა გრაფიკულად. სიმარტივისათვის

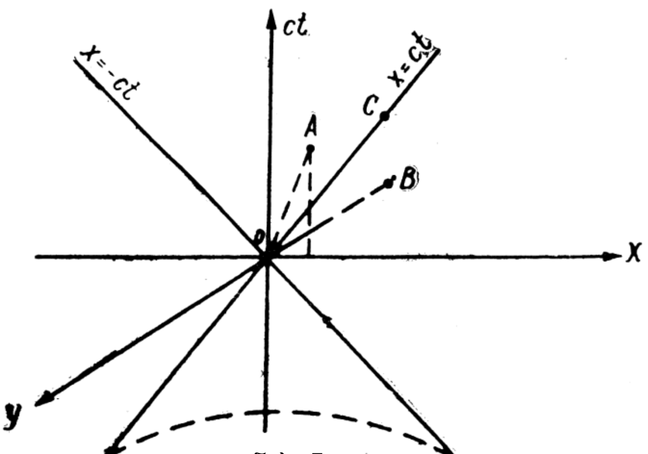


ავიღოთ ერთი სივრცული კოორდინატი და დრო t. მაშინ ნებისმიერი მოვლენის მოხდენის ადგილი და მომენტი გამოისახება $Oxct$ სიბრტყეზე: სადაც O წერტილი გამოსახავს მოვლენას, რომელიც მოხდა კოორდინატთა სათავეში საწყის მომენტში. ამ მოვლენისათვის $x=0$ და $t=0$. Ox ღერძზე იქნებიან მოვლენები, რომელნიც მოხდნენ ერთსა და იმავე დროს, კერძოდ, საწყის მომენტში, მაგრამ სხვადასხვა ადგილას. Ox ღერძს აწმყოს ღერძს უწოდებენ; ამ ღერძის ზემოთ მდებარე წერტილები, რომელთათვისაც $t>0$, გამოსახავენ მომავალში მოსახდენ მოვლენებს, ღერძს ქვემოთ

ნახ. 4

მდებარე წერტილები, რომელთათვისაც $t<0$ – წარსულში მომხდარ მოვლენებს. Oct ღერძზე იქნება მოვლენები, რომლებიც სხვადასხვა დროს მოხდნენ ერთსა და იმავე ადგილას, კოორდინატთა სათავეში.

ნებისმიერი მოძრაობა, რომლის დროსაც იცვლება როგორც სივრცული, ასევე დროითი კოორდინატი, გამოიხატება $Oxct$ სიბრტყეზე რაღაც წირით; სხეულის მოძრაობის გამომსახველ ასეთ წირს სამყაროული წირი ეწოდება. სამყაროული წირის ღერძების მიმართ მდებარეობის მიხედვით შეიძლება ვიმსჯელოთ სხეულის მოძრაობის ხასიათზე. მაგალითად, თუ სხეული მოძრაობს თანაბრად და წრფივად, მაშინ სათანადო სამყაროული წირი იქნება წრფე; თუ ნაწილაკი უძრავია, მაშინ მისი სამყაროული წირი იქნება Oct ღერძის პარალელური. ვინაიდან ფარდობითობის



ნახ. 5

თეორიაში მიღებულია, რომ არავითარი მოძრაობა სამყაროში არ შეიძლება მოხდეს სინათლის c სიჩქარეზე მეტი სიჩქარით, ამიტომ არც ერთ სამყაროულ წირს არ ექნება Oct ღერძის მიმართ 45º-ზე მეტი დახრა. წრფე, რომელიც იქნება Oct ღერძისადმი დახრილი 45º-ით, შეესაბამება მოძრაობას $v = c$ სიჩქარით.

თუ ერთი X სივრცული ღერძის ნაცვლად ავიღებთ მეორე y სივრცულ ღერძსაც, მაშინ სიბრტყის ნაცვლად მოძრაობა შეგვეძლება დავახასიათოთ სივრცეში და $x = ct$ და $x = -ct$ წრფეების ნაცვლად მივიღებთ კონუსს:

$$x^2 + y^2 - c^2t^2 = 0 .$$

ახლა განვიხილოთ ორი მოვლენის დამაკავშირებელი ინტერვალი. ერთ-ერთი მოვლენის კოორდინატები იყოს $x = 0$ და $t = 0,$ მაშინ კონუსზე მდებარე მოვლენებისათვის $c^2t^2 - (x^2 + y^2 + z^2) = 0;$ ინტერვალი ამ წერტილებს შორის ტოლია ნულის, $s^2 = 0$.

თუ განვიხილავთ კონუსის შიგნით მოთავსებულ A მოვლენას და იმავე $O(x = 0,\ t = 0)$ მოვლენას, მაშინ $c^2t^2 > x^2 + y^2 + z^2$ და ინტერვალი მათ შორის იქნება: $s^2 = c^2t^2 - (x^2 + y^2 + z^2) > 0.$ კონუსის გარეთ მდებარე რაიმე B მოვლენასა და O მოვლენას შორის ინტერვალი იქნება:

$$s^2 = c^2t^2 - (x^2 + y^2 + z^2) < 0.$$

იმისათვის, რომ O წერტილიდან მივაღწიოთ A წერტილს t დროში, უნდა გავიაროთ $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ მანძილი; ე. ი. ვიმოძრაოთ სიჩქარით

$$v = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{t}$$

ვინაიდან სინათლის კონუსის შიგნით მდებარე ყველა წერტილისათვის $s^2 > 0$, ამიტომ მათთვის $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} < ct$, ე. ი. $v < c,$ ეს ნიშნავს იმას, რომ 0 წერტილიდან A წერტილამდე t დროში მივაღწევთ c-ზე ნაკლები სიჩქარით; მაგრამ 0 წერტილიდან B წერტილამდე მისაღწევად საჭიროა c-ზე მეტი სიჩქარე, რადგანაც $x^2 + y^2 + z^2 > ct$ და ე. ი. $v > c.$ კონუსის ზედაპირზე მდებარე წერტილებამდე მისაღწევად (მაგალითად, C წერტილი) საჭიროა მოძრაობა c სიჩქარით; მართლაც, ამ დროს $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = ct$ ანუ $v = c.$

რადგანაც ფარდობითობის თეორია უშვებს მოძრაობას მხოლოდ c სიჩქარეზე ნაკლები სიჩქარით, ე. ი. ყოველგვარი ინფორმაციის გადაცემა სამყაროში შესაძლებელია მხოლოდ ასეთ პირობებში, ამიტომ ნებისმიერი ორი მოვლენა არ

შეიძლება იყოს ერთმანეთთან მიზეზობრივ კავშირში. მაგალითად, 0 მოვლენა ვერ იქნება B მოვლენის მიზეზი; ასევე ვერ იქნება იგი მიზეზი კონუსის გარეთ მდებარე ვერც ერთი მოვლენისა. მაგრამ შეიძლება იყოს მიზეზი კონუსის ზედაპირზე და კონუსის შიგნით მოთავსებული მოვლენების (C, A ტიპის მოვლენები). ეს ნიშნავს, რომ მიზეზობრივ კავშირში შეიძლება იყვნენ მხოლოდ ისეთი მოვლენები, რომელთა შორის მანძილი $\le ct$, თუ ეს მანძილი მეტია ct-ზე, მაშინ ასეთი მოვლენები მიზეზობრივ კავშირში ვერ იქნებიან, რადგანაც შეუძლებელი იქნება მათ შორის რაიმე მოქმედების გადაცემა.

დავუშვათ ახლა, რომ რაიმე A და B მოვლენა ერთდროულია ათვლის ერთი, რომელიმე K სისტემის მიმართ. ე. ი. $t_A = t_B$. ფარდობითობის თეორიის მიხედვით ისინი აღარ იქნებიან ერთდროულად მეორე K^1 სისტემაში, რომელიც იმოძრავებ K-ს მიმართ თანაბრად და სწორხაზოვნად ე. ი. $t'_A \ne t'_B$, რადგანაც

$$t_A = \frac{t'_A + \dfrac{v}{c^2} x'_A}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad t_B = \frac{t'_B + \dfrac{v}{c^2} x'_B}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \text{ და}$$

$$t_B - t_A = \frac{t'_B - t'_A + \dfrac{v}{c^2}\left(x'_B - x'_A\right)}{\sqrt{1 - v^2/c^2}};$$

ასეთ პირობებში ისმება კითხვა, ხომ არ შეიძლება, რომ მიზეზმა და შედეგმა შეიცვალოს ადგილები K სისტემიდან K^1 სისტემაში გადასვლის დროს. ე. ი. ხომ არ შეიძლება მოხდეს ისე, რომ A მოვლენა, რომელიც მიზეზი იყო B მოვლენისა და K სისტემაში ხდებოდა ყოველთვის B-ზე ადრე, K^1 სისტემაში მოხდეს B-ზე გვიან?!

როგორც ვხედავთ, $t_B - t_A$ სხვაობა დამოკიდებულია ასეთ გამოსახულებაზე

$$t'_B - t'_A + \frac{v}{c^2}(x'_B - x'_A).$$

გავამრავლოთ ეს გამოსახულება c-ზე, მივიღებთ:

$$c\Delta t' + \frac{v}{c}\Delta x'$$

აშკარაა, იმისათვის, რომ $t_B - t_A \ge t'_B - t'_A$, საჭიროა $c\Delta t' \ge \Delta x'$. როგორც ვიცით, ეს სწორედ ისეთი შემთხვევაა, როდესაც მოვლენებს შორის შეიძლება არსებობდეს მიზეზობრივი კავშირი. სხვა შემთხვევაში მიზეზობრივი კავშირი ვერ იარსებებს. მართლაც, როგორც ვნახეთ, $c^2\Delta t^2 - \Delta x^2 = inv$ ანუ $\Delta s = \sqrt{c^2\Delta t^2 - \Delta x^2}$. აქედან შესაძლებელია შემდეგი შემთხვევები:

როდესაც:

$$c\Delta t > \Delta x \qquad \Delta s \quad \text{ნამდვილია}$$
$$c\Delta t = \Delta x \qquad \Delta s = 0$$
$$c\Delta t < \Delta x \qquad \Delta s \; - \text{წარმოსახვითია}$$

ფარდობითობის თეორიის მიხედვით მიზეზობრივი კავშირი შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც $c\Delta t \geq \Delta x$, ანუ როდესაც $\Delta s \geq 0$. ეს კი სწორედ ის შემთხვევაა, როდესაც ერთი სისტემიდან მეორეზე გადასვლის დროს მიუხედავად დროის ფარდობითობისა მიზეზი და შედეგი დროში თანმიმდევრობას არ შეიცვლიან.

აინშტაინის თეორიამ კიდევ უფრო მეტად გაუსვა ხაზი ინერციული სისტემების როლს ფიზიკური მოვლენების აღწერის საქმეში; ფარდობითობის ახალმა პრინციპმა გააფართოვა გალილეის წარმოდგენები ბუნების კანონთა ინერტულობის შესახებ; გაირკვა, რომ არა მხოლოდ მექანიკური პროცესები, არამედ ყველა ფიზიკური პროცესი ერთნაირად მიმდინარეობს სხვადასხვა ინერციულ სისტემაში. ინვარიანტულობის ეს ფაქტი გამოიხატება ლორენცის გარდაქმნებით. ე. ი. თუ ფიზიკის ესა თუ ის კანონი სამართლიანია კოორდინატთა რაიმე K_0 სისტემისათვის, მაშინ იგი სამართლიანი იქნება K_0 სისტემის მიმართ თანაბრად და სწორხაზოვნად მოძრავ ყველა სისტემაში; მაგრამ ისმება კითხვა: როგორ უნდა ვიპოვოთ თვითონ K_0 სისტემა? ანუ როგორ განისაზღვრება ძირითადი ინერციული სისტემა? ითვლება, რომ ინერციულია სისტემა, სადაც სრულდება ინერციის პრინციპი და ძალაშია ნიუტონის კანონები. მაგალითად, ყოველდღიური დაკვირვებები გვიჩვენებენ, რომ ინერციის პრინციპი ხორციელდება დედამიწაზე სხეულთა მოძრაობის დროს; მაგრამ ხორციელდება არა აბსოლუტურად ზუსტად, არამედ მიახლოებით, რადგანაც დედამიწა განიცდის ბრუნვას თავისი ღერძის გარშემო, ხოლო მბრუნავ სისტემაში ფიზიკური პროცესები მიმდინარეობენ განსხვავებულად, ვიდრე უძრავ ან თანაბრად და სწორხაზოვნად მოძრავ სისტემაში. შედარებით უფრო ზუსტ ინერციულ სისტემას წარმოადგენს უძრავ ვარსკვლავთა სისტემა, მაგრამ მთლად ზუსტი არც ერთი სისტემაა, რადგანაც დროთა განმავლობაში ვარსკვლავთა კონფიგურაცია ცის თაღზე იცვლება და თანდათან კარგავს აზრს ის, თუ რას უნდა ნიშნავდეს მათ მიმართ სხეულთა სწორხაზოვანი მოძრაობა.

აბსოლუტურად ინერციული სისტემა ბუნებაში არ არსებობს. „ერთადერთი, რაც შეიძლება ამ შემთხვევაში ითქვას, არის ის, რომ ასეთი სისტემები არსებობენ ისევე, როგორც გეომეტრიაში მყარი სხეულები, რომელთა მიმართაც სამართლიანი არიან გეომეტრიის კანონები“ (25, 191). თქმა იმისა, რომ ნიუტონის კანონები წარმოადგენენ აბსოლუტურად ზუსტ კანონებს, ნიშნავს აბსოლუტური ინერციული

სისტემის არსებობის დაშვებას; ხოლო, თუ ასეთი სისტემა არ არსებობს, მაშინ ნიუტონის კანონებიც არ არიან აბსოლუტურად ზუსტი; მაგრამ ეს უზუსტობა არავითარ შემთხვევაში არ უარყოფს ამ კანონთა ობიექტურ ხასიათს. ეს კანონები ბუნებაში არსებული კანონებია; ისინი გამოხატავენ ობიექტურად მიმდინარე პროცესთა სპეციფიკას იმ მიახლოებით, რა მიახლოებითაც დასაშვებს ხდის ამას თვით ბუნება; კლასიკური მექანიკა ასახავს მაკროსკოპულ სხეულთა მოძრაობას დაბალი სიჩქარეების დროს.

განსხვავებულ თვალსაზრისზე დგანან ლოგიკური პოზიტივიზმის წარმომადგენლები; ისინი თვლიან, რომ არსებობს ნიუტონის კანონთა ფიზიკური ინტერპრეტაცია, მაგრამ თვითონ სისტემა წარმოადგენს მხოლოდ წმინდა ლოგიკურ სტრუქტურას. ეს თვალსაზრისი შემოიტანა ანრი პუანკარემ და იგი იწოდება კონვენციონალიზმის დოქტრინად. მის მიხედვით ითვლება, რომ მექანიკის კანონები წარმოადგენენ ენობრივ შეთანხმებებს (25. 191). ასევე, ლიუდვიგ ვიტგენშტეინის აზრით, „არაფერს არ ამბობს სამყაროზე ის ფაქტი, რომ იგი აღიწერება ნიუტონის კანონებით... მაგრამ რაღაცას ამბობს სამყაროზე ის გარემოება, რომ იგი შეიძლება აღიწეროს ამ კანონების საშუალებით ისე, როგორც ამას აქვს ფაქტიურად ადგილი... ერთი მექანიკით სამყარო შეიძლება აღიწეროს უფრო მარტივად, ვიდრე მეორით... მექანიკა არის ცდა აიგოს ერთი გეგმის მიხედვით ყველა ის ჭეშმარიტი წინადადება, რომელიც გვჭირდება ჩვენ სამყაროს აღსაწერად" (16. 92). ვიტგენშტეინი ხაზს უსვამს აქ იმას, რომ მექანიკის კანონები ქმნიან ფორმალურ სისტემას და მხოლოდ ოპერაციონალური განსაზღვრებების შემდეგ წარმოადგენენ ისინი სამყაროს აღწერას. ნიუტონის მექანიკა, მისი აზრით, არის მექანიზმი, რომლის საშუალებითაც ხდება სამყაროს აღწერა. „სამყარო არის ფაქტების და არა საგანთა ერთობლიობა", „ფაქტები ლოგიკურ სივრცეში არის სამყაროს არსი", – წერს იგი (16. 31).

საერთოდ, როდესაც რაიმე სხეულის მოძრაობაზეა ლაპარაკი, პირველ რიგში უნდა გაირკვეს ის, თუ რის მიმართ განიხილება ეს მოძრაობა. ცალკე ერთი სხეულისათვის ვერავითარ მოძრაობას ვერ განვიხილავთ. კლასიკურ მექანიკაში სისტემას, რომელშიც ხორციელდება ინერციის პრინციპი, უწოდებენ ინერციულ სისტემას; ასევე ინერციულია ყველა ის სისტემა, რომელიც იმოძრავებს ძირითადი ინერციული სისტემის მიმართ თანაბრად და სწორხაზოვნად; ხოლო თუ ათვლის რაიმე სისტემაში არ ხორციელდება ინერციის პრინციპი, ეს ფაქტი მაჩვენებელია იმისა, რომ აღნიშნული სისტემა ასრულებს არათანაბარ მოძრაობას, ე. ი. იგი არ არის ინერციული სისტემა; ყველა სისტემა, სადაც ნიუტონის კანონები სრულდება, ეკვივალენტურია. არავითარი ცდით არ შეიძლება გავარჩიოთ ძირითადი ინერციული სისტემა არაძირითადისაგან; ანუ ემპირიულად დაუკვირვებადია ერთი სისტემის მეორის მიმართ თანაბარსწორხაზოვანი მოძრაობა; მაგრამ, თუ ათვლის ერთი სისტემა იმოძრავებს მეორის მიმართ არათანაბრად და სწორხაზოვნად, მაშინ

ასეთი სისტემები აღარ იქნებიან უკვე ეკვივალენტურნი. არათანაბრად მოძრავ სისტემებში მექანიკის კანონები არ სრულდებიან. ასეთ სისტემებს არაინერციული სისტემები ეწოდებათ. ე. ი. ინერციული და არაინერციული სისტემები თვისებრივად განსხვავდებიან ერთმანეთისგან. ცხადია, ეს განსხვავება ახსნას მოითხოვს.

ამასთან დაკავშირებით აინშტაინმა დასვა საკითხი ჩამოეყალიბებინა ფიზიკის კანონები ისე, რომ ისინი სამართლიანი ყოფილიყვნენ ათვლის ნებისმიერი სისტემისათვის. ეს იყო ფარდობითობის ზოგადი თეორიის პროგრამა, განსხვავებით ფარდობითობის სპეციალური თეორიისგან, რომელიც მხოლოდ ინერციულ სისტემებს განიხილავდა.

ამ პროგრამის განსახორციელებლად, პირველ რიგში, საჭირო იყო გარკვეულიყო ის, თუ რა თავისებურებებით ხასიათდებოდნენ ინერციული სისტემები?! რა წარმოადგენდა მათთვის ფარდობითობის პრინციპის სამართლიანობის საფუძველს და ხომ არ შეიძლებოდა, რომ ფარდობითობის პრინციპს ძალა ჰქონოდა არაინერციულ სისტემებშიც?

როგორც ვიცით, გალილეის ფარდობითობის პრინციპით გამოთქმულია აზრი სხვადასხვა ინერციულ სისტემაში მექანიკური პროცესების იგივური მიმდინარეობის შესახებ; ფარდობითობის სპეციალურ თეორიაში აინშტაინმა ეს პრინციპი გაავრცელა ყველა ფიზიკურ მოვლენაზე, ოღონდ ისევ მხოლოდ ინერციული სისტემებისათვის; ფარდობითობის პრინციპის შემდგომი განზოგადება მოითხოვდა ამ პრინციპის გავრცელებას არაინერციულ სისტემებზეც. აინშტაინმა აჩვენა, რომ მიუხედავად იმ განსხვავებისა, რომელიც ემპირიულად დაიკვირვებოდა ინერციულ და არაიენრციულ სისტემებს შორის, მაინც ყველა ფიზიკური პროცესი ერთნაირად მიმდინარეობდა ათვლის როგორც ინერციულ, ასევე არაინერციულ სისტემაში. მან მიაქცია ყურადღება გალილეის დროიდან კარგად ცნობილ ფაქტს, გრავიტაციული მიზიდულობის ძალით გამოწვეული აჩქარების (g) მუდმივობის შესახებ (რომელიც გრავიტაციული და ინერციული მასების ტოლობას გამოხატავს) და სწორედ ეს ფაქტი დაუდო საფუძვლად ფარდობითობის ზოგად თეორიას.

ერთი შეხედვით, ზემოთ თქმული სპობს ყოველგვარ შესაძლებლობას არაინერციული და ინერციული სისტემების ეკვივალენტობის შესახებ, თითქოს სრულიად შეუძლებელია ამის შემდეგ ფარდობითობის სპეციალური პრინციპის გავრცელება არაინერციულ სისტემებზე; მაგრამ აინშტაინმა ამ განსხვავების მიუხედავად გამოთქვა მაინც დებულება აღნიშნული ეკვივალენტობის შესახებ. მთავარი საფუძველი ამ აზრისა იყო ინერციული და გრავიტაციული მასების ტოლობა. მართლაც, იმის გამო, რომ ინერციის ძალა პროპორციულია ინერციული მასის, ხოლო გრავიტაციული მოქმედების შემთხვევაში ძალა პროპორციულია გრავიტაციული მასის და თანაც ეს მასები სიდიდით ტოლია, ამიტომ, თუ დავუშვებთ, რომ არსებობს სათანადო ხასიათის გრავიტაციული ველი, შეგვიძლია

ყოველი არაინერციული სისტემა ინერციულად ჩავთვალოთ, ე. ი. „თანაბრად აჩქარებულად მოძრავ არაინერციულ სისტემაში მექანიკური მოვლენები ისე მიმდინარეობენ, როგორც ინერციულ სისტემაში ერთგვაროვანი გრავიტაციული ველით, რომლის დაძაბულობა სიდიდით არაინერციული სისტემის აჩქარების ტოლია და მიმართულია საწინააღმდეგოდ“ (5.152) ამ პრინციპს ეკვივალენტობის პრინციპი ეწოდება; იგი ჩამოაყალიბა აინშტაინმა და მის საფუძველზე ააგო მან შემდგომ ფარდობითობის ზოგადი თეორია.

იმისათვის, რომ უფრო ნათელი იყოს ზემოთ თქმული დებულების აზრი, განვიხილოთ ასეთი მაგალითი: დავუშვათ, რომ დედამიწაზე, ძალზედ დიდი სიმაღლიდან, g აჩქარებით ვარდება ლიფტი და ამ ლიფტში დამკვირვებელი ატარებს ცდას: იღებს რაიმე საგნებს (ქვა, ფანქარი, წიგნი...) და უშვებს მათ ხელს; ამ დროს ყუთის გარეთ მყოფი დამკვირვებელი იტყვის, რომ ყველა საგანი ვარდება დედამიწაზე ერთ და იმავე g აჩქარებით, რომელიც არ არის დამოკიდებული სხეულის მასაზე. მაგრამ იგივე g აჩქარებით დედამიწაზე ვარდნას განიცდიან არა მხოლოდ ლიფტში მყოფი საგნები, არამედ თვით ლიფტიც, მისი კედლები, ჭერი და იატაკი. ამის გამო საგნები, რომელთაც გაუშვა ხელი ლიფტში მყოფმა დამკვირვებელმა, არ შეიცვლიან თავიანთ მდებარეობებს ლიფტის კედლების, იატაკისა და ჭერის მიმართ; ისინი გაჩერდებიან ჰაერში ისე, როგორც დატოვებს მათ დამკვირვებელი. ეს ნიშნავს, რომ აღნიშნულ საგნებზე არავითარი გრავიტაციული ძალა არ მოქმედებს, ანუ ლიფტში მყოფი დამკვირვებლისათვის არ დაიკვირვება გრავიტაციული მიზიდულობის ველი; თუ ამ საგნებზე არ ვიმოქმედებთ რაიმე ძალით, ეს საგნები დარჩებიან უძრავად, ხოლო თუ მოვახდენთ მათზე ზემოქმედებას, მაშინ ისინი დაიწყებენ მოძრაობას თანაბრად და სწორხაზოვნად, ე. ი. ლიფტის შიგნით გვაქვს ინერციული სისტემა და ძალაში არის ნიუტონის კანონები. მეორე მხრივ, ლიფტი განიცდის ვარდნას დედამიწაზე g აჩქარებით, ე. ი. იგი არის ინერციული სისტემა; მიუხედავად ამისა, ლიფტის ვარდნის პროცესში მოვლენები ლიფტის შიგნით მიმდინარეობენ ისე, როგორც ინერციულ სისტემაში; ვერავითარ შემთხვევაში ვერ განვასხვავებთ ერთმანეთისაგან თავისუფლად ვარდნილ ლიფტში მიმდინარე პროცესებს ინერციულ სისტემაში მიმდინარე პროცესებისგან.

ახლა ვნახოთ, რას იტყვის იმავე მოვლენაზე ლიფტის გარეთ მყოფი დამკვირვებელი, როგორ განიხილავს იგი ლიფტის შიგნით საგანთა ვარდნის მოვლენას? ეს დამკვირვებელი იტყვის, რომ საგნები განიცდიან ვარდნას დედამიწაზე g აჩქარებით გრავიტაციული მიზიდულობის გამო. ამ დამკვირვებლისათვის ლიფტის შიგნით მოთავსებული სისტემა არ იქნება ინერციული. მაგრამ არავითარი პრინციპული განსხვავება ამ აღწერასა და წინა აღწერას შორის არ იარსებებს. ლიფტში საგანთა ვარდნის მოვლენა ერთნაირად აღიწერება ორივე დამკვირვებლის მიერ, თუმც ლიფტის შიგნით მყოფი დამკვირვებელი ამ აღწერის დროს ისარგებლებს

არაინერციული სისტემით, ლიფტის გარეთ მყოფი დამკვირვებელი კი – ინერციულით. ამრიგად, არაინერციული სისტემა ეკვივალენტურია გრავიტაციულ ველში მოთავსებული ინერციული სისტემისა, თუ გრავიტაციული ველი შერჩეული იქნება არაინერციული სისტემის აჩქარების შესაბამისად.

ფარდობითობის ზოგადი თეორია საშუალებას გვაძლევს განვიხილოთ მოვლენათა მიმდინარეობის ხასიათი არაინერციულ სისტემებში. ეკვივალენტობის პრინციპი ამ დროს ეყრდნობა ინერციული და გრავიტაციული მასების ტოლობის ფაქტს. ორივე აღწერა, იქნება ის ჩატარებული ლიფტის შიგნით, თუ ლიფტის გარეთ მყოფი დამკვირვებლის მიერ, სწორია. ერთნაირი რწმენით შეგვიძლია მივიღოთ, როგორც აზრი იმის შესახებ, რომ ადგილი აქვს არათანაბარ მოძრაობას გრავიტაციული მიზიდულობის გამო (ლიფტის გარეთ მყოფი დამკვირვებელი), ასევე აზრი უძრაობის შესახებ, როდესაც გრავიტაციული მიზიდულობა არ დაიკვირვება (ლიფტის შიგნით მყოფი დამკვირვებელი).

აქამდე საუბარი გვქონდა არაინერციულ და გრავიტაციულ ველში მყოფი ინერციული სისტემების ეკვივალენტურობის შესახებ კლასიკური მექანიკის თვალსაზრისით. ყოველივე ეს შეიძლება გადავიტანოთ ფარდობითობის თეორიაშიც, ოღონდ აქ ლაპარაკი იქნება უკვე არა მხოლოდ მექანიკურ პროცესებზე, არამედ ყველა ფიზიკურ მოვლენაზე; ხოლო სივრცისა და დროის გაზომვა იწარმოებს ფარდობითობის სპეციალური თეორიის მიხედვით, ლორენცის გარდაქმნათა საფუძველზე.

განსაკუთრებით საინტერესოა ფარდობითობის ზოგადი თეორიის კავშირი გეომეტრიასთან; ჩვენ უკვე ვიცით, რომ მათემატიკაში არსებობენ სხვადასხვა გეომეტრიული სისტემები: ევკლიდური და არაევკლიდური, მაგრამ სივრცის გეომეტრიული სტრუქტურის პრობლემა ერთ-ერთი მთავარია ფიზიკაშიც, რადგანაც მას მივყავართ სივრცულ-დროითი კონტინუუმის საკითხთან. განვიხილოთ ეს საკითხი უფრო დეტალურად: დავუშვათ, რომ სამყარო, რომელშიც ჩვენ ვცხოვრობთ, არის ორგანზომილებიანი და დასახლებულია იგი ასევე ორგანზომილებიანი არსებებით; ე. ი. გეომეტრიულ სივრცეს მათთვის აქვს ორი განზომილება. მაშინ ეს არსებები ვერ წარმოიდგენენ თვალსაჩინოდ მესამე განზომილებას, ისევე, როგორც ჩვენთვის არის ძნელი მეოთხე განზომილების წარმოდგენა; მათ შეეძლებათ წარმოიდგინონ ხაზის გამრუდება, წრე. მაგრამ ვერ წარმოიდგენენ სფეროს, ისევე, როგორც ჩვენ შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ გამრუდებული ზედაპირი, ვიცით რა არის სფერო, მაგრამ ვერავითარ შემთხვევაში ვერ წარმოვიდგენთ სივრცის გამრუდებას. ამ არსებებმა უნდა ისარგებლონ ევკლიდეს ორგანზომილებიანი გეომეტრიით; მათთვის სამკუთხედის კუთხეების ჯამი ედრება 180 გრადუსს. მათ შეეძლებათ ააგონ ორი (დიდი და პატარა) წრე საერთო ცენტრით. ისინი ნახავენ, რომ ამ წრეების რკალების სიგრძეთა შეფარდება ტოლი იქნება მათი რადიუსების შეფარდების. თუ სიბრტყე,

სადაც ეს ორგანზომილებიანი არსებანია მოთავსებულნი, იქნება ძალიან დიდი და მისი რომელიმე წერტილიდან ეს არსებანი დაიწყებენ მოგზაურობას ამ სიბრტყეზე რაიმე მიმართულებით, მაშინ ისინი ვერასოდეს ვერ დაბრუნდებიან უკან იმავე წერტილში. ასეთი იქნება ვითარება ორგანზომილებიანი არსებებისათვის ორგანზომილებიან სიბრტყეზე.

დავუშვათ ახლა, რომ ეს ორგანზომილებიანი არსებანი სიბრტყიდან, სადაც ისინი იმყოფებიან, გადავიყვანეთ და მოვათავსეთ სამგანზომილებიან სივრცეში, დიდი რადიუსის მქონე სფეროს ზედაპირზე. თუ სფეროს რადიუსი ძალიან დიდი იქნება, ამ არსებათა ზომები კი შედარებით ძალიან მცირე, მაშინ ისინი ვერ იგრძნობენ ვერავითარ ცვლილებას. სივრცის გეომეტრიული სტრუქტურა მათთვის იგივე დარჩება და სფეროს ზედაპირი აღქმული იქნება მათ მიერ სიბრტყედ. ასე რომ, თუ განხილული იქნებიან მცირე ზომის სამკუთხედები, მათი კუთხეების ჯამი ტოლი იქნება ისევ 180 გრადუსისა, ასევე მცირე ზომის წრეების შემთხვევაში მათი რადიუსების შეფარდება ტოლი იქნება შესაბამისი რკალების სიგრძეთა შეფარდების და ა. შ. მაგრამ თუ ორგანზომილებიან არსებებს მიეცემათ საშუალება დიდ მასშტაბებში აღიქვან სფეროს ზედაპირი, მაშინ ნახავენ, რომ სივრცის გეომეტრიული სტრუქტურა შეცვლილია: ერთი წერტილიდან დაწყებული მოგზაურობა ბოლოს და ბოლოს დამთავრდება ისევ ამ წერტილში, კონცენტრული წრეების რკალების სიგრძეთა შეფარდება აღარ იქნება ტოლი რადიუსთა შეფარდებისა და სხვ. შემდგომი და შემდგომი დაკვირვებები თანდათან აიძულებენ ორგანზომილებიან არსებებს აღიარონ ახალი გეომეტრიული სტრუქტურა, მიუხედავად იმისა, რომ მათთვის ძნელი იქნება ამ ახალი სტრუქტურის გააზრება. ზუსტად ასევე, სამგანზომილებიან სივრცეში მცხოვრები სამგანზომილებიანი არსებებისათვის ძნელია ოთხგანზომილებიანი სივრცის წარმოდგენა.

ჩვენ ვცხოვრობთ სამგანზომილებიან სივრცეში, გაგვაჩნია სამი განზომილება და სივრცული სტრუქტურა, რომელსაც ჩვენ ყოველდღიურ ცხოვრებაში შევეჩვიეთ, ესაა ევკლიდეს გეომეტრია. ამრიგად, სივრცე ჩვენთვის არის ევკლიდური; მაგრამ ფარდობითობის თეორია, რომელსაც საქმე აქვს დიდ მასშტაბებთან და მაღალ სიჩქარეებთან, არ ემყარება სივრცის სტრუქტურის ევკლიდურ წარმოდგენებს. სივრცე ამ თეორიის მიხედვით არაევკლიდურია.

ჩვენ თავისუფლად შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ გამრუდებული ხაზი სიბრტყეზე ან გამრუდებული ზედაპირი სივრცეში, მაგრამ ძნელი წარმოსადგენია სამგანზომილებიანი სივრცის გამრუდება მეოთხე განზომილებაში. მიუხედავად ამისა, აშკარაა, რომ სივრცის არაევკლიდური სტრუქტურა სრულიად ობიექტურ ფაქტს წარმოადგენს; ასე რომ, არაინერციული სისტემების შემთხვევაში მთელი აუცილებლობით დგება ფიზიკაში არაევკლიდური გეომეტრიის შემოტანის საკითხი.

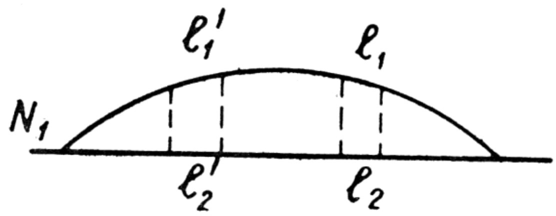
სივრცის გეომეტრიული სტრუქტურის საკითხთან დაკავშირებით არ შეიძლება არ ვახსენოთ ფრანგი მათემატიკოსის ანრი პუანკარეს სახელი. პუანკარე დიდ ყურადღებას აქცევდა აღნიშნულ საკითხს და ჩამოყალიბებული ჰქონდა მის შესახებ თავისი თვალსაზრისი. იგი თვლიდა, რომ იმ შემთხვევაში, თუ გამომჟღავნდებოდა რეალური სივრცის არაევკლიდური ხასიათი, მაშინ შესაძლებელი იქნებოდა ორი რამ: ან მიეღოთ არაევკლიდურობის ამსახველი ახალი გეომეტრიული სისტემა (არაევკლიდური გეომეტრია), ანდა დაეტოვებინათ ისევ ევკლიდეს თეორია, ოღონდ დამატებით შემოეღოთ ახალი კანონები, რომელნიც გამოხატავდნენ ევკლიდურობისაგან მყარი სხეულების გეომეტრიულ თვისებათა გადახრებს. ორივე აღწერა, პუანკარეს აზრით, იქმნებოდა სრულიად ეკვივალენტური ანუ არც ერთ მათგანს არავითარი უპირატესობა არ შეიძლებოდა მინიჭებოდა. საინტერესოა, რომ, მიუხედავად ამისა, პუანკარე თვლიდა, რომ იმ შემთხვევაში, თუ ფიზიკოსები ნამდვილად აღმოაჩენდნენ რეალური სივრცის არაევკლიდურ ხასიათს, დატოვებული იქნებოდა მაინც ევკლიდეს სისტემა, მისი სიმარტივისა და მოხერხებულობის გამო. მისი აზრით, გაცილებით უფრო ადვილი იქნებოდა ევკლიდეს მარტივი გეომეტრიული სისტემის დატოვება და მყარი სხეულების გეომეტრიულ თვისებათა ევკლიდურობისაგან გადახრის გამომხატველ კანონთა შემოღება, ვიდრე ახალი, არაევკლიდური გეომეტრიით სარგებლობა. ამის შემდეგ ბედის ირონია იყო ალბათ ის, რომ 1915 წელს, როდესაც აინშტაინმა დაამუშავა ფარდობითობის ზოგადი თეორია, მან არ შეინარჩუნა ძველი წარმოდგენები სივრცეზე და გამოიყენა სწორედ არაევკლიდური გეომეტრია (19.204). აინშტაინის არჩევანი განპირობებული იყო სრულიად გარკვეული ემპირიული საფუძვლით. პუანკარეს არ შეეძლო წარმოედგინა რეალური სივრცის ის რთული არაევკლიდური ბუნება, რომლის გამოც მიზანშეწონილი აღარ იქნებოდა ევკლიდესეული სისტემის დატოვება და რაიმე დამატებითი კანონების შემოღება. ფიზიკური სივრცე კი ისეთი აღმოჩნდა, რომ უფრო ადვილი გახდა არაევკლიდური გეომეტრიის საშუალებით მისი აღწერა, ვიდრე ევკლიდეს სისტემაში ამ სივრცის ბუნებაზე ლაპარაკი. ამიტომ აირჩია აინშტაინმაც პუანკარესაგან განსხვავებული გზა.

სივრცის გეომეტრიული სტრუქტურის საკითხის ანალიზი ემპირიული საფუძვლის მნიშვნელობას განსაკუთრებული ყურადღება მიაქცია ჯერ კიდევ გაუსმა. იგი ხაზგასმით აღნიშნავდა, რომ სივრცის გეომეტრიული სტრუქტურის პრობლემა, უპირველეს ყოვლისა, ემპირიულია (19.204). იმავე თვალსაზრისზე იდგა აინშტაინი. ვნახოთ ახლა, რა წარმოადგენდა მისთვის სივრცის პრობლემის განხილვის დროს ემპირიულ საფუძველს.

ჩვენ ადრე უკვე გვქონდა საუბარი იმის შესახებ, თუ რა მოხდებოდა, რომ ორგანზომილებიანი სივრცის მცხოვრებნი (ასევე ორგანზომილებიანი ბრტყელი არსებანი) გადაგვეყვანა დიდი რადიუსის მქონე სფეროს ზედაპირზე. პირველ

ხანებში ისინი, როგორც ვთქვით, ვერავითარ ცვლილებას ვერ შენიშნავენ და სფეროს ზედაპირს აღიქვამენ ისე, როგორც სიბრტყეს; მაგრამ შემდგომში, თანდათან დაგროვილი ემპირიული მასალის საფუძველზე, გამოუმუშავდებათ მათ აზრი სივრცის გამრუდების შესახებ. ისინი შენიშნავენ, მაგალითად, რომ სფეროს ზედაპირზე აღებულ სამკუთხედის შიდა კუთხეების ჯამი არ უდრის 180º; ხოლო იმის მიხედვით, თუ როგორი ხასიათის აღმოჩნდება ეს განსხვავება (ნაკლები 180º-ზე თუ მეტი) შესაძლებელი იქნება მათ მიერ სივრცის ყოველი წერტილისათვის გამრუდების ხასიათისა (დადებითი თუ უარყოფითი) და ხარისხის დადგენა. ანალოგიურად შეიძლება მსჯელობა სამგანზომილებიანი სივრცის გამრუდებაზე მეოთხე განზომილებაში.

პუანკარეს აზრით, ორგანზომილებიან არსებებს, რომელნიც დიდი რადიუსის მქონე სფეროს ზედაპირზე იქნებიან მოთავსებულნი, სივრცის სტრუქტურის დახასიათების დროს შეუძლიათ მიმართონ ორ გზას: ან მიიღონ ის, რომ იმყოფებიან სფეროს ზედაპირზე, ანდა ჩათვალონ, რომ ზედაპირი, სადაც ისინი იმყოფებიან,



ნახ. 6

წარმოადგენს ისევ სიბრტყეს. ორივე ეს გზა, პუანკარეს აზრით, სრულიად ეკვივალენტურია და არავითარი მეთოდებით არ შეიძლება დადგენა იმისა, თუ რომელი მათგანია უფრო ზუსტი. მას მოჰყავს ასეთი მაგალითი: დავუშვათ, რომ აღნიშნული არსებებიდან ერთი (N_1) განიხილავს ზედაპირს, როგორც სფეროს ნაწილს, ხოლო მეორე (N_2) მას, როგორც სიბრტყეს. ჩავთვალოთ, რომ N_1 დამკვირვებელი განიხილავს ორგანზომილებიან მყარ სხეულებს, მაშინ რაიმე სიგრძე l_1 გადაადგილების შემდეგ არ შეიცვლის თავის ზომებს და ტოლი იქნება l_1'. ე. ი. $l_1 = l_1'$; მაგრამ, თუ l_1-ის პროექციას განვიხილავთ სიბრტყეზე, მაშინ აშკარაა, რომ ამ პროექციის სიბრტყეზე მოძრაობისას l_2 აღარ იქნება ტოლი l_2', არამედ $l_2 = l_2'$. ე. ი. N_2 დამკვირვებლისათვის, რომელიც ზედაპირს სიბრტყედ განიხილავს, მოძრაობის დროს ადგილი ექნება სიგრძეთა შეკუმშვა-გაფართოებას (იმისდა მიხედვით, თუ რა მიმართულებით იწარმოებს მოძრაობა). ორივე, N_1 და N_2 დამკვირვებელიც იქნება სწორი, ოღონდ N_1-სათვის არ ექნება ადგილი სიგრძის ცვალებადობას მოძრაობის პროცესში, ხოლო N_2-ისათვის ეს ცვალებადობა იარსებებს.

ორივე მეთოდი აღწერს ერთ და იმავე სამყაროს, სრულიად შესაძლებელია, რომ შემოღებული იქნენ აღწერის სხვა მეთოდებიც. პუანკარეს აზრით, ის, თუ მათგან რომელს მიენიჭება უპირატესობა, დამოკიდებულია მეცნიერთა შორის შეთანხმებაზე; რადგანაც არ არსებობს არავითარი გზა გაირკვეს ამ მეთოდებს შორის რომელია სწორი, ამიტომ არ შეგვიძლია ვილაპარაკოთ, რომ მათ გააჩნიათ სხვადასხვა მნიშვნელობა; მართალია, ემპირიულმა დაკვირვებებმა შესაძლებელია მოგვცეს სივრცის არაევკლიდურობის დამადასტურებელი მასალა, მაგრამ გარკვეული დაშვებების საფუძველზე შეიძლება მისი უგულვებელყოფა. მაგალითად, მცირე უბნებზე არაევკლიდური სივრცე შეიძლება განიხილოს როგორც ევკლიდური, რადგანაც არაევკლიდურობა, ასეთ შემთხვევაში, მჟღავნდება ნაკლები ხარისხით; ე. ი. რაც მცირეა სივრცული უბანი, მით უფრო შესაძლებელია განხილულ იქნეს მისი სტრუქტურა, როგორც ევკლიდური. უფრო მეტიც, იმ შემთხვევაშიც კი, როდესაც ემპირიულად დაკვირვებული იქნება სივრცის არაევკლიდური სტრუქტურა, შეგვიძლია გამოვიყენოთ ისევ ევკლიდური წარმოდგენები სივრცეზე, თუ შემოვიტანთ დამატებით კანონებს მყარი სხეულების მოძრაობის შესახებ (N_2 დამკვირვებელი).

პუანკარეს პოზიციის მთავარი არსი (რომელსაც იმეორებენ შემდგომ ლოგიკური პოზიტივიზმის წარმომადგენლები: ფრანკი, კარნაპი, ვიტგენშტეინი და სხვ.) მდგომარეობს იმაში, რომ არავითარი აზრი არა აქვს კითხვას: ევკლიდურია რეალური სივრცე თუ არაევკლიდური? „ორი თეორია“, – წერდა კარნაპი, – „წარმოადგენს ერთი და იმავე ფაქტების ორი სახის აღწერას. ჩვენ შეგვიძლია ვუწოდოთ მათ ეკვივალენტური აღწერები, რადგან ორივე თეორიაში შესაძლებელია დაკვირვებად მოვლენებზე ერთი და იგივე წინასწარმეტყველება. შესაძლოა უფრო ზუსტი იქნებოდა გამოთქმა: „ეკვივალენტურია დაკვირვების თვალსაზრისით“. თეორიები შეიძლება საგრძნობლად განსხვავდებოდნენ ერთმანეთისგან ლოგიკური სტრუქტურით, მაგრამ თუ მათ ფორმულებსა და კანონებს მივყავართ ერთ და იმავე დაკვირვებად მოვლენათა წინასწარმეტყველებამდე, მაშინ შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ისინი წარმოადგენენ ეკვივალენტურ თეორიებს“ (19.210).

პუანკარე გამოთქვამდა აზრს ევკლიდური და არაევკლიდური გეომეტრიული სისტემების ეკვივალენტურობის შესახებ, და თვლიდა მაინც, რომ ფიზიკოსები მომავალში კვლავაც შეინარჩუნებდნენ ევკლიდურ სისტემას მისი სიმარტივისა და მოხერხებულობის გამო. მაგრამ, როგორც აღვნიშნეთ, მოხდა საწინააღმდეგო და აინშტაინმა თავის თეორიაში გამოიყენა არაევკლიდური გეომეტრია. საქმე ისაა, რომ სწორედ ამ, ერთი შეხედვით რთული და მოუხერხებელი არაევკლიდური სისტემით სივრცის წარმოდგენამ განაპირობა ფარდობითობის თეორიის შემთხვევაში ფიზიკურ კანონთა მარტივი და მოხერხებული ხასიათი. გაირკვა, რომ ძალზედ რთული იქნებოდა ამ უკანასკნელთა ბუნება, რომ შენარჩუნებული ყოფილიყო ევკლიდური

გეომეტრია და შემოეღოთ მყარ სხეულთა შეკუმშვა-გაფართოების ამსახველი კანონები.

ჩვენი სამყაროს არაევკლიდური ხასიათის ობიექტურ საფუძველს, ფარდობითობის თეორიის მიხედვით, წარმოადგენს გრავიტაცია. გრავიტაციის პრობლემა აინშტაინმა ნიუტონისგან განსხვავებულად დააყენა. ნიუტონის ფიზიკაშიც მთავარ საყრდენს წარმოადგენდა მსოფლიო მიზიდულობის კანონი. ძალა, რომელიც ამ კანონის საფუძველზე იყო განსაზღვრული და დამოკიდებული იყო მანძილის კვადრატზე $\left(F = \gamma \frac{\mu_1 \mu_2}{r^2}\right)$ იძლეოდა ურთიერთქმედების შედეგად გამოწვეულ სხეულთა მოძრაობის დახასიათების საშუალებას. ფარდობითობის სპეციალურ თეორიაში კი მაქსველის განტოლებების საშუალებით წარმოდგენილია ბუნების კანონთა ახალი ტიპი, რომელნიც იძლევიან წარმოდგენას ელექტრომაგნიტური ველის სტრუქტურაზე. ანალოგიურად მაქსველის განტოლებებისა. სტრუქტურული კანონების სახე აქვთ გრავიტაციის განტოლებებსაც. მათი საშუალებით ფარდობითობის ზოგად თეორიაში შესაძლებელია უკვე გრავიტაციული ველის დახასიათება; და აი, სწორედ აქ მჟღავნდება ფიზიკური სივრცის გეომეტრიული სტრუქტურის მჭიდრო კავშირი გრავიტაციასთან; გაირკვა, რომ გრავიტაციული განტოლებები გამოხატავენ ჩვენი სამყაროს არაევკლიდური ხასიათის გეომეტრიულ სტრუქტურას. ფიზიკური სივრცის ბუნება დამოკიდებული აღმოჩნდა მასებსა და მათი მოძრაობის სიჩქარეებზე. დიდი მასების და მათი მოძრაობის დიდი სიჩქარეების შემთხვევაში ფიზიკური სივრცის არაევკლიდურობის ხასიათი იზრდება. ეს ემპირიულად დაკვირვებადი ფაქტია. მაგალითად, დაიკვირვება სინათლის სხივის გადახრა მიზიდულობის ველში; აღმოჩნდა, რომ სინათლის სხივი, თუ ის გაივლის რაიმე M დიდი მასის მქონე სხეულის მიერ შექმნილ გრავიტაციულ ველში, შეიცვლის გავრცელების სიჩქარეს. კერძოდ, სიჩქარე მით ნაკლები იქნება, რაც უფრო ახლოს გაივლის სხივი აღნიშნულ სხეულთან და, პირიქით. ამის გამო სინათლის სხივი დიდი მასების მახლობლობაში გავლის დროს განიცდის გამრუდებას. ემპირიული მონაცემების საფუძველზე შესაძლებელია გამოითვალოს ამ დროს სინათლის სხივის გადახრის კუთხე, რომელიც პირდაპირპროპორციულია გრავიტაციული ველის შემქმნელი სხეულის მასისა.

ემპირიულად დაკვირვებადია აგრეთვე გრავიტაციის თეორიის საფუძველზე ნაწინასწარმეტყველები ზოგიერთი სხვა შედეგიც (მაგალითად, მერკურის პერიჰელიუმის მოძრაობა, სიხშირის გრავიტაციული წანაცვლება და სხვ.), რაც იმაზე მეტყველებს, რომ გრავიტაციული განტოლებებით წარმოდგენილი ველის სტრუქტურა რეალური ვითარების შესაბამისია. ე. ი. სივრცის არაევკლიდურ თეორიას გააჩნია სრულიად ობიექტური საფუძველი.

ამრიგად, შემთხვევითი არ იყო, რომ აინშტაინმა აირჩია პუანკარესაგან განსხვავებული გზა და ნაცვლად მარტივი და მოხერხებული ევკლიდური გეომეტრიული სისტემისა აღიარა ფიზიკური სივრცის არაევკლიდური სტრუქტურა. „საგნები, რომლებთანაც საქმე აქვს გეომეტრიას, არასოდეს არ წარმომიდგებოდნენ სხვა ბუნების მქონე საგნებად, ვიდრე არიან „ხედვადნი“ და „შეხებადნი“, ანუ გრძნობადი ორგანოების საშუალებით აღქმადი საგნები. ეს პრიმიტიული გაგება დაფუძნებული იყო, რა თქმა უნდა, იმაზე, რომ არაცნობიერად იგულისხმებოდა კავშირი გეომეტრიულ ცნებებსა და დაკვირვებად საგნებს შორის (სიგრძე, მყარი ღერო და ა. შ.)“, – წერდა აინშტაინი (26. 178). პუანკარესაგან განსხვავებით, მათემატიკაში იგი ხედავდა სამყაროს ობიექტურ სტრუქტურას და ამიტომ გეომეტრია მისთვის იყო რეალური საგნებისა და მათ შორის არსებულ მიმართებების ამსახველი მეცნიერება. აინშტაინი პრინციპულად დაუპირისპირდა კანტის აპრიორიზმსა და პუანკარეს კონვენციონალისტურ პოზიციას და სწორედ ასეთმა მსოფლმხედველობამ მისცა მას ესოდენ მნიშვნელოვანი მეცნიერული შედეგი.

აინშტაინის ფარდობითობის თეორიამ ახლებურ ასპექტში წარმოგვიდგინა სამყარო. ცნობილი გახდა, რომ ნიუტონის ძალის საფუძველზე ვერ იქნება ახსნილი ყველა ფიზიკური მოვლენა; ამით კი საბოლოო მარცხი განიცადა მექანიციზმმა. მქსველის განტოლებებით შესაძლებელი გახდა ელექტრომაგნიტური ველის სტრუქტურის აღწერა. ფარდობითობის სპეციალურ თეორიაში ელექტრომაგნიტური ველი წარმოგვიდგა რეალობის ახალ, ნივთიერებისგან განსხვავებულ ფორმად. ფარდობითობის ზოგად თეორიაში მოსახერხებელი გახდა გრავიტაციული ურთიერთქმედების გამოხატვა მაქსველის განტოლებების ტიპის მათემატიკური აპარატით, რაც, თავის მხრივ, მაჩვენებელია იმისა, რომ აინშტაინმა გრავიტაციის ნიუტონისეული წარმოდგენებისგან განსხვავებული თეორია შექმნა.

ამრიგად, რეალობის იმ ფორმის გარდა, როგორიც არის ნივთიერება, ცნობილი გახდა კიდევ რეალობის ერთი, ახალი ფორმა ველის სახით. ბუნებრივია ისმება კითხვა: რა განსხვავებაა მათ შორის? რით განსხვავდება კონკრეტულად რეალობის ნივთიერი ფორმა რეალობის ისეთი ფორმისგან, როგორიც არის ველი?! ფარდობითობის თეორიის ჩამოყალიბებამდე ფიქრობდნენ, რომ ნივთიერებას გააჩნია მასა, ხოლო ველს არა აქვს იგი; ველი წარმოიდგინებოდა ენერგიის სახით, მასის გარეშე; მაგრამ ფარადობითობის თეორიის ჩამოყალიბების შემდეგ აშკარა გახდა, რომ ველს გააჩნია მასა, ხოლო ნივთიერებას აქვს ენერგიის უდიდესი მარაგი; ამავე დროს ენერგია, რომელიც ნივთიერებაში ფარული სახითაა მოცემული, გაცილებით მეტია, ვიდრე ველის ენერგია; ეს სხვაობა იმდენად დიდია, რომ შეიძლება ითქვას: ნივთიერება გვაქვს იქ, სადაც არის ენერგიის დიდი კონცენტრაცია, ხოლო ველი იქ, სადაც ეს კონცენტრაცია ნაკლებია, ე.ი. გამოდის, რომ ნივთიერებასა და ველს შორის ადგილი აქვს არა თვისებრივ, არამედ მხოლოდ რაოდენობრივ

განსხვავებას. ამასთან დაკავშირებით, იბადება კითხვა: ხომ არ შეიძლება ისეთი ერთიანი ფიზიკური თეორიის აგება, რომელიც მოგვცემდა რეალობის, როგორც ერთ (ნივთიერი), ასევე მეორე (ველი) ფორმის ასახვის საშუალებას?!

აშკარაა, რომ მხოლოდ ნივთიერების ცნების საფუძველზე მთელი ფიზიკის აგება შეუძლებელია; სამაგიეროდ, უნდა ვიფიქროთ, რომ მოსახერხებელია მაქსველისა და გრავიტაციის განტოლებების შეცვლა ისე, რომ შესაძლებელი იქნეს მათი გამოყენება ელექტრული მუხტებისა და ნივთიერების შემთხვევაშიც. ასეთი შესაძლებლობის პირობებში ნივთიერება განიხილებოდა უკვე როგორც ძალზედ ძლიერი მოქმედების ველი და აისახებოდა იგი სტრუქტურული კანონების საშუალებით. „ჩვენი ძირითადი ამოცანა იქნებოდა ჩაგვეტარებინა ველის კანონთა ისეთი მოდიფიკაცია, რომ ისინი არ დარღვეულიყვნენ ისეთი არეებისათვის, სადაც ადგილი ექნებოდა ენერგიის კოლოსალურ კონცენტრაციას“ (26.511). აინშტაინის ეს პროგრამა დღემდე განუხორციელებელია, თუმცა ძალზედ დიდია ველის ერთიანი თეორიის აგების შესაძლებლობის დაშვების სურვილი; მაგრამ რადგანაც ეს თეორია დღემდე ვერ შეიქმნა, ამიტომ ჯერჯერობით უნდა ვიფიქროთ, რომ ველისა და ნივთიერების სახით საქმე გვაქვს რეალობის ორ, ურთიერთგანსხვავებულ ფორმასთან.

ველისა და ნივთიერების ურთიერთმიმართების საკითხის შესწავლამ წამოჭრა საკითხი ნივთიერების უფრო დეტალური შესწავლის შესახებ. ყოველი ნივთიერება შეიცავს ატომებს; ატომები, თავის მხრივ, შედგებიან ელემენტარული ნაწილაბისაგან, ხოლო ეს ელემენტარული ნაწილაკები ურთიერთქმედებენ ველთან. ბუნებრივია, დგება ამ ურთიერთქმედების კვლევის პრობლემა. საკითხები, რომელნიც დაკავშირებულნი არიან მიკრონაწილაკთა მოძრაობის შესწვლასთან, განიხილება ფიზიკის ახალ დარგში, კვანტურ მექანიკაში.