კვანტური გადახლართულობა და ბელის უტოლობა

კვანტურ მექანიკაში არსებობს მოვლენა სახელწოდებით ,,კვანტური გადახლართულობა''. აღმოჩნდა, რომ ელემენტარული ნაწილაკები შეიძლება იყვნენ „გადახლართულები'', რაც გამოიხატება იმაში, რომ ერთ-ერთზე ჩატარებული გაზომვა მომენტალურად აღიბეჭდება მეორეზე და პირიქით.

განვიხილოთ მაგალითი: ვთქვათ ნაწილაკი რომლის იმპულსი იყო ნოლი დაიშალა 2 ნაწილაკად. იპმულსის შენახვის კანონიდან ცალსახად გამომდინარეობს, რომ დაშლის შემდეგ ნაწილაკებს გააჩნიათ სიდიდით ტოლი და მიმართულებით საწინააღმდეგო იმპულსები. მაშინ რაღაში მდგომარეობს მოვლენის განსაკუთრებულობა? საქმე იმაშია, რომ კლასიკურ მექანიკაში ეს მართლაც არ არის გასაკვირი, თუმცა კვანტურ მექანიკაში საქმე სხვაგვარადაა. კალსიკურისგან განსხვავებით ჩვენ არ შეგვიძლია დაბეჯითებით ვთვათ, რომ ნაწილაკს გააჩნია განსაზღვრული იმპულსი, რადგან ამაში ხელს გვიშლის ჰაიზენბერგის განუზღვრელობის პრინციპი. როდესაც მე ვზომავ ერთ-ერთი ნაწილაკის იმპულსს, წინასწარ არასოდეს ვიცი ზუსტად რა მნიშვნელობას მივიღებ. პარადოქსი კი მდგომარეობს შემდეგში - მიუხედავად ამ განუზღვრელობისა, პირველი ნაწილაკის იპულსის გაზომვის შემდეგ, მე ზუსტად შემიძლია ვიწინასწარმეტყველო მეორე (გადახლართული) ნაწილაკის იმპულსის მნიშვნელობა და მიმართულება. მოვლენის არსი არ იცვლება მაშინაც კი, როდესაც ნაწილაკები დაშორებულნი არიან ერთმანეთისგან რაგინდ დიდი მანძილით.

აღნიშნულმა ფაქტმა დიდად დააინტერესა აინშტაინი, რადგან გამოდიოდა თითქოს ინფორმაცია ვრცელდებოდა სინათლის სიჩქარეზე სწრაფად, მეტიც - მყისიერად. 1935 წელს აინშტაინმა, პადოლსკიმ და როზენმა გამოაქვეყნეს სტატია, რომელშიც მიუთითებდნენ მაქს ბორნის კვანტური მექანიკის „კოპენჰაგენის ინტერპრეტაციის'' ნაკლზე. სტატიაში არგუმენტად მოყვანილი იყო თეორიული ექსპერიმენტი, რომელიც სწორედ გადახლართულობის მოვლენას უკავშირდებოდა. ექსპერიმენტი აზრობრივად მდგომარეობდა შემდეგში: ვთქვათ, ნაწილაკი საწყისი ნულოვანი იმპულსით დაიშალა 2 ნაწილაკად. ერთ-ერთის იმპულსის გაზომვის შემდეგ მე უკვე ვიცი მეორე ნაწილაკის იმპულსი. ახლა, გავზომოთ მეორე ნაწილაკის კოორდინატი. გამოდის, რომ მე შემიძლია ერთდროულად განვსაზღვრო ნაწილაკის ორი ფიზიკური მახასიათებელი, იმპულსი და კოორდინატი, რაც ეწინააღმდეგებოდა ჰაიზენბერგის განუზღვრელობის პრონციპს. ამ წინააღმდეგობაზე დაყრდნობით ისინი ამტკიცებდნენ, რომ რეალობის ახსნა კოპენჰაგენის ინტერპრეტაციით იყო არასრული და ნაკლოვანი. გამოსავალი კი იყო შემდეგი: ,,ფარული (დამატებითი) პარამეტრების'' არსებობა, რომელთა გათვალისწინებითაც რეალობის ასახსნელად შეიქმნებოდა უკვე დეტერმინიზებული მოდელი.

აინშტაინის განსაკუთრებული ყურადღება მიიქცია იმ ფაქტმა, რომ კვანტური გადახლართულობა არღვევდა ისეთ ფუნდამენტურ პრინციპს, როგორიც იყო ლოკალური რეალიზმი. მისი შინაარსის განსამარტავად მოვიყვან აინშტაინის ციტატას აღნიშნულ საკითხთან დაკავშირებით: ,,მთვარე არსებობს მაშინაც, როდესაც მე მას არ ვაკვირდები".

როგორც აღმოჩნდა, კვანტური მოვლენები ეწინააღმდეგებიან ლოკალურ რეალიზმს. ამის თვალსაჩინო არგუმენტია ბელის უტოლობები (1964). ლოკალური რეალიზმის შემოტანით აინშტაინი ცდილობდა აეხსნა ინფორმაციის გაცვლა ორ გადახლართულ ნაწილაკს შორის. რეალიზმისა და ფარული პარამეტრების არსებობის პრინციპის მიხედვით კი არანაირი ინფრომაცის გაცვლა არ ხდება.

რომ გავიაზროთ თუ რას გულისხმოდნენ ფარულ პარამეტრში მოვიყვანოთ ანალოგია: ,,თუ გაზს ვახასიათებთ ტემპერატურით, წნევით, მოცულობით, მაშინ ფარულ ცვლადებს წარმოადგენს მასში არსებული ატომების სიჩქარეები''.

საინტერესოა აღინიშნოს, რომ ლოკალური ფარული პარამეტრების შემოსაყვანად თავის დროზე შეიქმნა კვანტური მექანიკის დე-ბროლისა და ბომის ინტერპრეტაცია, რომლებიც ვარაუდობდნენ რომ სამყაროს ალბათური ბუნება სინამდვილეში დეტერმინისტური იყო რაღაც ცვლადების გათვალისწინებით.

1964 წელს ბელმა პასუხი გასცა აინშტაინის, პადოლსკისა და როზენის სტატიას. ბელის მიხედვით, თუ მე მოვინდომებ დამატებითი პარამეტრების მეშვეობით დავამტკიცო ნაწილაკების მდგომარეობის დამოუკიდებლობა გაზომვებთან და ამასთანავე ექსპერიმენტზე მიღებული შედეგები მივაწერო შემთხვევითობებს, დამთხვევებს, მაშინ ამ დამთხვევების ასახსნელად უნდა შემოვიტანო რაღაც მექანიზმი. ასეთ მექანიზმს კი უნდა ჰქონდეს თვისება; გარდაიქმნას მყისიერად ყოველი ცვლილებისას, რაც ეწინააღმდეგება ლორენც-სიმეტრიას.

ვერანაირი დამატებითი პარამეტრი ვერ ახსნის გაზომვებს შორის რეალურად დამზერილ კორელაციებს, რაც ახასიათებთ გადახლართულ ნაწილაკების მდგომარეობებს. ეს მოსაზრება ბელმა დაამტკიცა თავისი უტოლობის დარღვევით კვანტურ მექანიკაში.

ავხსნათ რაში მდგომარეობს ბელის უტოლობები, რომელმაც უმნიშვნელოვანესი როლი იქონია კვანტური მექანიკის კლასიკური მექნიკისგან გამიჯვნაში. სანამ უშუალოდ უტოლობას გამოვიყვანდეთ, საჭიროა აღინიშნოს ნაწილაკების შედეგი თვისება: ვთქვათ, გვაქვს ელექტრონი, რომელსაც ვახასიათებთ სპინით. მისთვის შესაძლო პროექციებია +1/2 და -1/2, რომელთაც ვადგენთ პოლარიზატორის მეშვეობით. ჩავატაროთ ექსპერიმენტი: დავაფიქსიროთ ორი პოლარიზატორი პარალელურ მდგომარეობაში და ვნახოთ დაემთხვევა თუ არა მათი ჩვენებები. აღმოჩნდა, რომ ემთხვევა, რაც ადვილი მისახვედრი იყო. ახლა დავაყენოთ ისინი ერთმანეთის მიმართ მართობულად; სიტუაცია დიამეტრულად იცვლება: მე ვეღარ ვხედავ კავშირს პირველ გაზომვასა და მეორე გაზომვას შორის. ამ შემთხვევაში შეგვიძლია ვთვათ, რომ კორელაცია ქრება. ზოგადად, α კუთხით გადახრილი პოლარიზატორებისთვის არსებობს ფორმულა, რომელიც გვიჩვენებს ალბათობას იმისა, რომ გაზომვები ერთმანეთს დაემხვევა და ალბათბას იმისა, რომ ისინი განსხვავებულნი იქნებიან:

$$P_{დამ} = cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad P_{გან} = \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

კორელაციის კოეფიციენტი კი გამოითვლება, როგორც:

$$K = P_{დამ} - P_{გან}$$

ახლა დავუშვათ, რომ გვაქვს 2 გადახლართული ნაწილაკი, რომელთაც ვატარებთ პოლარიზატორებში. პოლარიზატორების შესაძლო მიმართულებებია, პირობითათ, a,b და c. მათგან თითოეული მოგვცემს შედეგს ან +1/2-ს, ან -1/2-ს. თუ დავთვლით დამთხვევებისა და განსხვავებების ალბათობებს კლასიკურად მივიღებთ ბელის უტოლობას:

$$P[a^+, c^+] + P[b^+, c^-] \geq P[a^+, b^+]$$

არსებობს ამ უტოლობის მრავალი სხვა ინტერპრეტაცია, თუმცა აზრობირივად ყველა ექვივალენტურია. ახლა კი გავითვალისწინოთ კვანტური მექანიკის შედეგები, მაშინ იმის ალბათობა, რომ ორივე პოლარიზატორი გვიჩვენებს +1/2-ს, და ამავე დროს მათი მიმართულებებია შესაბამისად a და b, არის:

$$P[a^+, b^+] = P\{a, b\} \times P\{a^+\} \times P_{დამ} = \frac{1}{9} \times \frac{1}{2} \times cos^2\left(\frac{\widehat{ab}}{2}\right) = \frac{1}{18} cos^2\left(\frac{\widehat{ab}}{2}\right)$$

აქ გავითვალისწინეთ, რომ a პოლარიზატირზე +1/2-ისა და -1/2-ის ჩვენება თანაბარალბათურია. ავირჩიოთ კუთხეები შემდეგნაირად: a-სა და b-ს შორის, 60^0, b-სა და c-ს შორის 60^0 და c-სა და b-ს შორის 120^0. მაშინ შესაბამისი ბელის უტოლობა რიცხვითი მნიშვნელობების გათვალისწინებით მოგვცემს:

$$0.5 \geq 0.75$$

როგორც, ვხედავთ ბელის უტოლობა დაირღვა. ე. ი. თუ დავუშვებთ, თითქოს ნაწილაკებს ჰქონდეთ ჩაწერილი პროგრამა ფარული პარამეტრების სახით, მაშინ ჩვენი თეორია ვერ ახსნის ექსპერიმენტის შედეგებს.

გადახლართულობის პრინციპის გამოყენება ინფორმაციის გავრცელებისთვის შეუძლებელია. მთავარი წინააღმდეგობას წარმოადგენს სწორედ ჰაიზენბერგის განუზღვრელობა, მე ვიცი ფიზიკური სიდიდის მნიშვნელობა უშუალოდ გაზომვის შემდეგ და ამიტომ მიღებული შედეგის მართვა ჩემი სურვილის მიხედვით არ შემიძლია.