

UDC 621.391:530.145; 004.1; 004.4, 530.145.

SCOPUS CODE 1701

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2026-2-37-47>

კვანტური სიგნალების ანალიზი კრიოგენულ და არაკრიოგენულ გარემოში

მარიამ ჯანელიძე საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის დოქტორანტი, საქართველო
E-mail: mariamjanelidze100@gmail.com

რეცენზენტები:

ნ. აბზიანიძე, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი

E-mail: n.abzianidze@gtu.ge

გ. გოდერძიშვილი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის პროფესორი

E-mail: g.goderdzishvili@gtu.ge

ანოტაცია. კვანტური სიგნალების კვლევა ტელეკომუნიკაციისა და საინჟინრო მეცნიერებების ერთ-ერთ ფუნდამენტურ და სტრატეგიულ მიმართულებას წარმოადგენს, რადგან იგი უშუალოდ უკავშირდება მატერიისა და ენერჯის მიკროსკოპული დონის კანონზომიერებების სიღრმისეულ გაგებასა და სატელეკომუნიკაციო სისტემების ახალ ეტაპზე გადასვლას, ამასთანავე ინფორმაციის გადაცემისა და დამუშავების ახალი პრინციპების ჩამოყალიბებას და ტექნოლოგიური ინოვაციების განვითარებას. კვანტური სიგნალი, როგორც კვანტური მდგომარეობის მატარებელი ფიზიკური ობიექტი, იქნება ეს ფოტონი, ელექტრონი, ზეგამტარ კონტურში ლოკალიზებული კუბიტი თუ ატომური სპინის სისტემა, შეიცავს ინფორმაციას, რომელიც

კოდირებულია სუპერპოზიციისა და კვანტური ჩახლართულობის მეშვეობით. სწორედ ამ თვისებების წყალობით ხდება შესაძლებელი ისეთი ამოცანების შესრულება, რომლებიც კლასიკური ფიზიკის ჩარჩოებში ან პრაქტიკულად მიუწვდომელია, ან უკიდურესად რესურსგამოუყენებელი. მაგალითად, კვანტური მექანიკის პრინციპებზე დაფუძნებული გამოთვლითი მოდელები ქმნის საფუძველს კვანტური სისტემებისთვის, რომელიც პოტენციურად რადიკალურად ცვლის მონაცემთა დამუშავების სიჩქარესა და ეფექტიანობას, ხოლო კვანტური კომუნიკაცია უზრუნველყოფს ინფორმაციის გადაცემის ფუნდამენტურად უსაფრთხო არხებს, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია კიბერუსაფრთხოების თანამედროვე გამოწვევების ფონზე. კრიოგენულ და არაკრიოგენულ გარემოებში კვანტური

სიგნალების შედარებითი კვლევა მნიშვნელოვან თეორიულ შედეგებს იძლევა.

საკვანძო სიტყვები: არგონი; ბოზე-აინშტაინის განაწილება; დეკოჰერენცია; იონური ბმები; კოჰერენტულობა; კუბიტი; კვანტური მექანიკა; კვანტური სიგნალები; მასტერ-განტოლებები; ნეონი; სპინური სისტემა; ტელეკომუნიკაცია; ქიმიური ინერტულობა; შრედინგერის განტოლება; ჰამილტონი; ჰელიუმი.

შესავალი

თანამედროვე მეცნიერებისა და ტექნოლოგიის განვითარება ერთ-ერთ მთავარ მიზანს წარმოადგენს მთელი მსოფლიოსთვის, კვანტური სიგნალების კვლევა და განვითარება კი მოწინავე პრიორიტეტია სამეცნიერო წრეებისთვის, მისი პოტენციალიდან გამომდინარე. კვანტური სიგნალები, როგორც კვანტური მდგომარეობების მატარებელი ფიზიკური პროცესები, წარმოადგენს იმ ინფორმაციული ერთეულების ფიზიკურ რეალიზაციას, რომლებიც ეფუძნება სუპერპოზიციის, ჩახლართულობისა და კვანტური ინტერფერენციის პრინციპებს. ამგვარი სიგნალების კვლევა არ შემოიფარგლება მხოლოდ თეორიული ანალიზით; იგი მოიცავს მაღალი სიზუსტის ექსპერიმენტულ მეთოდებს, სენსორულ ტექნოლოგიებსა და რთულ საინჟინრო სისტემებს, რაც ერთობლიობაში ქმნის საფუძველს კვანტური ტექნოლოგიების ფორმირებისათვის. კვანტური მექანიკის განვითარებამ ცხადყო, რომ ინფორმაციის მატარებელი ობიექტები მიკროსკოპულ დონეზე

ექვემდებარება ფუნდამენტურად განსხვავებულ კანონებს, ვიდრე კლასიკური სისტემები, რაც თავის მხრივ ხსნის ახალ შესაძლებლობებს ინფორმაციის დამუშავების, გადაცემისა და დაცვის მიმართულებით. კვანტური სიგნალების მნიშვნელობა განსაკუთრებულად გამოიკვეთა სფეროებში, როგორცაა კვანტური კომპიუტერები და კვანტური კომუნიკაცია, სადაც ინფორმაციის კვანტური კოდირება და მანიპულაცია საშუალებას იძლევა განხორციელდეს ისეთი ამოცანები, რომლებიც კლასიკური ალგორითმებისთვის პრაქტიკულად მიუწვდომელია. ამ კონტექსტში კვანტური სიგნალის სტაბილურობა, კოჰერენტულობის დრო და გარემოსთან ურთიერთქმედების ხარისხი განსაზღვრავს სისტემის ეფექტიანობასა და სანდობას. ნებისმიერი გარე ზემოქმედება, მათ შორის თერმული ფლუქტუაციები, ელექტრომაგნიტური ხმაური და მატერიალური დეფექტები, იწვევს დეკოჰერენციას, რაც კვანტური ინფორმაციის დაკარგვის ძირითადი მიზეზია. შესაბამისად, კვანტური სიგნალების კვლევა მოითხოვს გარემოს პირობების მკაცრ კონტროლს და იმ მექანიზმების გააზრებას, რომლებიც განსაზღვრავს კვანტური მდგომარეობების ევოლუციას. განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება კვანტური სიგნალების ანალიზის სხვადასხვა ტემპერატურულ რეჟიმში, კერძოდ კრიოგენულ და არაკრიოგენულ გარემოებში. ტემპერატურა წარმოადგენს ერთ-ერთ ძირითად ფიზიკურ პარამეტრს, რომელიც გავლენას ახდენს სისტემის ენერგეტიკულ სპექტრზე, ხმაურის დონესა და კვანტური კოჰერენტულობის შენარჩუნებაზე. კრიოგენულ პირობებში, სადაც ტემპერატურა უახლოვდება აბსოლუტურ ნულს,

თერმული აგზნებები მინიმუმამდე მცირდება, რაც ხელს უწყობს კვანტური ეფექტების სტაბილიზაციას და ზუსტი გაზომვების განხორციელებას. ამგვარი გარემო ფართოდ გამოიყენება ზეგამტარ სისტემებსა და თანამედროვე კვლევით ინფრასტრუქტურაში, სადაც მიზანია კვანტური მოწყობილობების ოპტიმიზაცია და სკალირება. ამის საპირისპიროდ, არაკრიოგენულ პირობებში კვანტური სიგნალების კვლევა აწყდება მაღალი თერმული ფონით განპირობებულ სირთულეებს, თუმცა სწორედ ამ მიმართულებას აქვს მნიშვნელოვანი პრაქტიკული პოტენციალი, რადგან იგი ქმნის წინა პირობას კვანტური ტექნოლოგიების ფართომასშტაბიანი ინტეგრაციისათვის ყოველდღიურ საინჟინრო სისტემებში. ამრიგად, კვანტური სიგნალების კვლევა არის როგორც ფუნდამენტური, ისე გამოყენებითი მეცნიერების ცენტრალური ამოცანა, რომლის შესწავლა სხვადასხვა გარემო პირობებში იძლევა საფუძველს კვანტური ტექნოლოგიების მდგრადი და ეფექტური განვითარებისათვის. კვანტური სიგნალები, როგორც კვანტური მდგომარეობების მატარებელი ფორმალიზებული ობიექტები, წარმოადგენს იმ ინფორმაციული ერთეულების აბსტრაქტულ აღწერას, რომლებიც ეფუძნება სუპერპოზიციის, ჩახლართულობისა და კვანტური ინტერფერენციის პრინციპებს. ამგვარი სიგნალების კვლევა თეორიულ კრილში ეყრდნობა მათემატიკურ აპარატს, რიცხვით ანალიზს და კომპიუტერულ სიმულაციებს, რაც შესაძლებელს ხდის რთული კვანტური სისტემების ქცევის პროგნოზირებას სხვადასხვა ფიზიკურ პირობებში. კვანტური მექანიკის ფარგლებში ჩამოყალიბებული ფორმალიზმი, რომელიც ეფუძნება ჰილბერტის სივრცეებს, ოპერატორულ

აღებებსა და შრედინგერის განტოლებას, ქმნის საფუძველს კვანტური სიგნალების დინამიკის აღწერისათვის. თეორიული სიმულაციები განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია იმ გარემოებების შესასწავლად, სადაც ექსპერიმენტული რეალიზაცია ტექნიკურად რთული ან რესურსმოხმარებადია, რის გამოც კომპიუტერული მოდელირება იქცევა კვლევის მთავარ ინსტრუმენტად.

ძირითადი ნაწილი

კრიოგენული გარემო წარმოადგენს ფიზიკურ მდგომარეობას, რომელშიც სისტემა იმყოფება უკიდურესად დაბალ ტემპერატურულ რეჟიმში, როგორც წესი, რამდენიმე კელვინის ან მილიკელვინის დიაპაზონში, სადაც თერმული აგზნებები მნიშვნელოვნადაა ჩახშობილი და მატერიის მიკროსკოპული დინამიკა უახლოვდება ძირითადი ენერგეტიკული მდგომარეობის დომინირებას. თეორიულ ფიზიკაში ასეთი რეჟიმი განსაკუთრებულ ინტერესს იწვევს, რადგან დაბალი ტემპერატურა ამცირებს თერმული განაწილების სიგანეს, ზღუდავს ფონურ ფლუქტუაციებს და აძლიერებს კვანტური ეფექტების გამოვლენას მაკროსკოპულ მასშტაბებზეც კი. კრიოგენული პირობების მიღწევა შესაძლებელია სხვადასხვა ტექნოლოგიური და ფიზიკურ-ქიმიური მეთოდით, რომელთა შორის მნიშვნელოვანია გაზების თხევად ფაზაში გადაყვანა და შემდგომი აორთქლებითი გაგრილება, ადიაბატური დემაგნიტიზაცია, ასევე დახვეწილი თერმოდინამიკური ციკლები, როგორცაა განზავების რეფრიჟერაცია. მაგალითად, ჰელიუმის იზოტოპების ნარევის ფაზური განცალკევების თერმოდინამიკური ეფექტი იძლევა მილიკელვინის ტემპერატურების

მიღწევის შესაძლებლობას, რადგან სისტემის ენტროპიის ცვლილება სითბოს შთანთქმით მიმდინარეობს და გარემოს დამატებით აგრილებს. ქიმიური მეთოდების კონტექსტში შეიძლება განიხილებოდეს ენდოთერმული რეაქციები და ფაზური გადაქმნები, რომლებიც შთანთქავენ სითბოს და ლოკალურად ამცირებენ ტემპერატურას, თუმცა პრაქტიკაში ღრმა კრიოგენული რეჟიმის მისაღწევად ისინი ძირითადად დამხმარე როლს ასრულებენ და ინტეგრირებულია კომპლექსურ თერმოდინამიკურ სისტემებში. კრიოგენული გარემოს ფუნდამენტური მნიშვნელობა კვანტური სიგნალების კვლევისათვის განპირობებულია იმით, რომ ტემპერატურა უშუალოდ განსაზღვრავს გარემოსეული მოდების ოკუპაციის რიცხვს ბოზე-აინშტაინის ან ფერმი-დირაკის განაწილების მიხედვით. როდესაც მნიშვნელობა გაცილებით მცირეა სისტემის ენერგეტიკულ სპექტრში არსებულ შუალედებთან შედარებით, თერმულად ინდუცირებული გადასვლები მინიმუმამდე მცირდება და კვანტური მდგომარეობები ინარჩუნებს სისუფთავს. ღია კვანტური სისტემების თეორიაში გარემოსთან ურთიერთქმედება აღწერილია მასტერ-განტოლებების ფორმალიზმით, სადაც დეკოჰერენციისა და დეფაზირების ტერმინები პროპორციულია გარემოს სპექტრული სიმკვრივისა და თერმული აგზნებების ინტენსივობისა. კრიოგენულ პირობებში აღნიშნული პარამეტრები მნიშვნელოვნად მცირდება, რის შედეგადაც იზრდება კოჰერენტულობის დრო და მცირდება ფაზური დისპერსია. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ზეგამტარ სისტემებში, სადაც დაბალი ტემპერატურა უზრუნველყოფს ელექტრული წინა-

ლობის ნულოვან მნიშვნელობას და კუპერის წყვილების სტაბილურ არსებობას, რაც აუცილებელია კვანტური ლოგიკური ელემენტების ფუნქციონირებისათვის. თეორიული სიმულაციების თვალსაზრისით, კრიოგენული გარემოს მოდელირება გულისხმობს დაბალი ტემპერატურის ლიმიტში მოქმედი ჰამილტონიანის სპექტრულ ანალიზს, გარემოს სპექტრული ფუნქციის კორექტირებას და თერმული აბაზანის ეფექტის რაოდენობრივ შეფასებას. ასეთ პირობებში შემთხვევითი ფლუქტუაციები ხშირად აღწერილია თეთრი ან ფერადი ხმაურის მოდელებით, რომელთა ამპლიტუდა ტემპერატურის კლებასთან ერთად მცირდება. შედეგად, კვანტური სიგნალების ამპლიტუდური და ფაზური სტაბილურობა იზრდება, რაც ზრდის გაზომვათა სიზუსტესა და ინფორმაციის გადაცემის სანდობობას. ამასთანავე, კრიოგენული რეჟიმი ამცირებს მრავალფოტონურ და მრავალწილაკურ არასუსურველ პროცესებს, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მრავალკუბიტანი არქიტექტურების მასშტაბირებისას. მეცნიერული თვალსაზრისით, კრიოგენული გარემო წარმოადგენს არა მხოლოდ ტექნიკურ საშუალებას, არამედ კვლევის მეთოდოლოგიურ ჩარჩოს, რომლის ფარგლებშიც შესაძლებელი ხდება კვანტური სისტემების ფუნდამენტური თვისებების იზოლირებული შესწავლა. დაბალი ტემპერატურის პირობებში სისტემის ენერგეტიკული რელაქსაციის დრო იზრდება, ხოლო თერმული ბარიერების შემცირება იძლევა საშუალებას დეტალურად გაანალიზდეს კვანტური გადასვლების მექანიზმები. საბოლოო ჯამში, კრიოგენული გარემოს მიღწევა და მისი თეორიული მოდელირე-

ბა ქმნის აუცილებელ საფუძველს კვანტური სიგნალების სტაბილურობის, კოჰერენტულობისა და ინფორმაციული სიმძლავრის სიღრმისეული გააზრებისათვის, რაც განსაზღვრავს კვანტური ტექნოლოგიების შემდგომ განვითარებას. კრიოგენული გარემოს ფორმირება და სტაბილიზაცია არსებითად ეყრდნობა ქიმიურ ფაქტორებს, განსაკუთრებით ინერტული (დექტიური) აირების უნიკალურ ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებს, რომლებიც უზრუნველყოფს როგორც ღრმა გაგრილების შესაძლებლობას, ისე კვანტური სისტემების ქიმიურ ინერტულობასა და სისუფთავეს. ინერტული აირები, მათ შორის ჰელიუმი, ნეონი და არგონი, ხასიათდება დახურული ელექტრონული შრით, რაც განაპირობებს მათ დაბალ ქიმიურ რეაქტიულობას და მინიმალურ ქიმიურ ინტერაქციას გარემოსთან. სწორედ ეს თვისება კრიტიკულად მნიშვნელოვანია კრიოგენულ სისტემებში, სადაც ნებისმიერი ქიმიური რეაქცია ან ზედაპირული ადსორბცია შეიძლება გახდეს ენერგეტიკული დისიპაციისა და დეკოჰერენციის დამატებითი წყარო. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანი როლი ენიჭება ჰელიუმს, რომლის დაბალი დუდილის ტემპერატურა და სუსტი ვან-დერ-ვაალსის ურთიერთქმედებები შესაძლებელს ხდის უკიდურესად დაბალი ტემპერატურების მიღწევას და შენარჩუნებას. ჰელიუმის ქიმიური ინერტულობა განპირობებულია მისი $1s^2$ ელექტრონული კონფიგურაციით, რაც მას პრაქტიკულად გამორიხავს კოვალენტურ ან იონურ ბმებში ჩართვისგან სტანდარტულ პირობებში. ამ თვისებასთან ერთად, მისი მცირე ატომური რადიუსი და დაბალი პოლარიზებადობა იწვევს ძალიან სუსტ ინტერმოლეკულურ მიზიდულობას, რის გამოც ჰელიუმი თხევად ფაზაში გადადის მხოლოდ უკიდურესად დაბალ

ტემპერატურაზე. თხევადი ჰელიუმის მიღება და შემდგომი აორთქლებითი გაგრილება ეფუძნება ენდოთერმულ ფაზურ გარდაქმნას, რომლის დროსაც სისტემიდან სითბო შთანთქმულია და გარემო დამატებით ცივდება. კიდევ უფრო ღრმა კრიოგენული რეჟიმის მისაღწევად გამოიყენება ჰელიუმის ნარევი, სადაც ქიმიური შედგენილობა და იზოტოპური განსხვავება განაპირობებს ფაზურ სეპარაციას დაბალ ტემპერატურაზე. აღნიშნული პროცესი თერმოდინამიკურად განპირობებულია ენტროპიის სხვაობით კონცენტრირებულ და განზავებულ ფაზებს შორის; ^3He ატომების გადასვლა კონცენტრირებული ფაზიდან განზავებულში შთანთქავს სითბოს, რაც უზრუნველყოფს მილიკელვინის დიპაზონის ტემპერატურებს. აქ ქიმიური იდენტობა და იზოტოპური ბუნება არა მხოლოდ მასის, არამედ კვანტური სტატისტიკის განსხვავებასაც განსაზღვრავს, ვინაიდან ^3He ფერმიონულია, ხოლო ^4He ბოზონური ბუნების მატარებელია, რაც გავლენას ახდენს მათ კოლექტიურ თვისებებზე. ინერტული აირების გამოყენება კრიოგენულ სისტემებში ასევე მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ქიმიური სისუფთავისა და ზედაპირის პასიურობის უზრუნველყოფაში. კრიოგენულ ტემპერატურაზე ზედაპირებზე მოლეკულური ადსორბცია შეიძლება გახდეს არასასურველი ელექტრული ხმაურის წყარო, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც საქმე ეხება ზეგამტარ ან ნანოსტრუქტურულ ელემენტებს. ინერტული აირების ატმოსფეროში წარმოებული პროცესები ამცირებს ჟანგის, ჰიდროლიზის ან სხვა რეაქციების ალბათობას, რაც უზრუნველყოფს მასალის სტრუქტურული და ელექტრონული თვისებების სტაბილურობას. არგონი და ნეონი ხშირად გამოიყენება როგორც დამცავი გარემო კრიოგენულ სისტემებში,

რადგან მათი ქიმიური პასიურობა ამცირებს რეაქტიული მინარევების წარმოქმნას და ხელს უშლის ზედაპირულ დეფექტთა ჩამოყალიბებას. ქიმიური თვალსაზრისით, კრიოგენული გარემოს ეფექტურობა განისაზღვრება არა მხოლოდ დაბალი ტემპერატურის მიღწევით, არამედ სისტემის კომპოზიციური სისუფთავითა და მინარევების კონცენტრაციის კონტროლით. მცირე რაოდენობის რეაქტიული გაზებიც კი, როგორცაა ჟანგბადი ან წყლის ორთქლი, კრიოგენულ პირობებში შეიძლება კონდენსირდეს და წარმოქმნას მყარი ფაზა, რომელიც გავლენას მოახდენს თერმულ გამტარობაზე და ელექტრულ მახასიათებლებზე. ამიტომ, ინერტული აირების გამოყენება დაკავშირებულია მაღალვაკუუმურ ტექნოლოგიებთან და გაზთა ქიმიური ანალიზის მეთოდებთან, რათა უზრუნველყოფილ იქნეს სისტემის სისუფთავე ატომურ დონეზე. დამატებით, კრიოგენულ ქიმიამი მნიშვნელოვანი ადგილი უჭირავს სორბციულ მასალებსა და ქიმიურ გეტერებს, რომლებიც შთანთქავენ აქტიურ მინარევებს და ამცირებენ მათ ნაწილობრივ წნევას დახურულ სისტემაში. კვანტურ სიგნალებზე ზემოქმედების თვალსაზრისით, ინერტული აირებით ფორმირებული კრიოგენული გარემო ამცირებს ფლუქტუაციურ ელექტრომაგნიტურ ველებს, თერმულად ინდუცირებულ ფონონურ პროცესებსა და ქიმიური ენერჯის შემცირება ამცირებს გარემოსეული მოდების ოკუპაციას, რის შედეგადაც მცირდება სპონტანური აგზნებების ალბათობა და იზრდება კვანტური მდგომარეობების კოჰერენტულობა. ამასთანავე, ქიმიურად სტაბილური გარემო ხელს უწყობს

მასალაში არსებული დეფექტური დონეების პასივაციას, რაც ამცირებს ორდონიანი ფლუქტუატორების რაოდენობას და ამით ამცირებს ფაზურ ხმაურს. შედეგად, ინერტული აირების საფუძველზე აგებული კრიოგენული ქიმიური ინფრასტრუქტურა წარმოადგენს კვანტური სისტემების სტაბილურობის ერთ-ერთ ფუნდამენტურ წინაპირობას. ამრიგად, კრიოგენული გარემოს ქიმიური ასპექტები ინერტული აირების ელექტრონული სტრუქტურა, იზოტოპური შედგენილობა, ფაზური გარდაქმნები და მინარევების კონტროლი, ქმნის ინტეგრირებულ მეცნიერულ ჩარჩოს, რომლის ფარგლებშიც შესაძლებელია უკიდურესად დაბალი ტემპერატურების მიღწევა და შენარჩუნება. ეს გარემო, ქიმიური ინერტულობისა და თერმოდინამიკური ეფექტების საფუძველზე, უზრუნველყოფს კვანტური სიგნალების მინიმალური დეკოჰერენციით არსებობას და იძლევა მათი სიღრმისეული თეორიული ანალიზის შესაძლებლობას. წარმოდგენილი სიმულაციური ექსპერიმენტი მიზნად ისახავს კვანტური სიგნალის ქცევის თეორიულ ანალიზს ტემპერატურულ ფუნქციად, განსაკუთრებით კრიოგენულ რეჟიმთან მიახლოებულ პირობებში და შედარებით უფრო მაღალ ტემპერატურაზე. კვლევა ეფუძნება ორდონიანი კვანტური სისტემის მოდელს, რომელიც ფართოდ გამოიყენება კუბიტის, ატომური ტრანზიციის ან სპინური სისტემების აღწერისათვის. ასეთ სისტემაში კვანტური სიგნალი შეიძლება გაიგივდეს კოჰერენტულ ამპლიტუდასთან, რომელიც დროში ევოლუციას განიცდის როგორც ერთეულოვანი დინამიკის, ისე გარემოსთან ურთიერთქმედების ზემოქმედებით. სიმულაციაში გამოყენებულია დეკოჰერენციის მოდელი, სადაც სიგნალის ამპლიტუდა

დროში ქვეითდება ექსპონენციურად, ხოლო დეკო-
ჰერენციის სიჩქარე დამოკიდებულია თერმულ
ოკუპაციაზე, რომელიც გამოითვლება ბოზე-აინ-

შტაინის განაწილების ფორმულით. მოდელის ცენ-
ტრალური იდეა არის ის, რომ გარემოსეული მოდე-
ის თერმული ოკუპაცია განსაზღვრავს სისტემაზე

```

1  import numpy as np
2  import matplotlib.pyplot as plt
3  hbar = 1.0
4  kB = 1.0
5  omega = 1.0
6  t = np.linspace(0, 10, 1000)
7  def thermal_occupation(T):
8      if T == 0:
9          return 0.0
10     return 1.0 / (np.exp(hbar * omega / (kB * T)) - 1.0)
11  def decoherence_rate(T, gamma0=0.05):
12     nT = thermal_occupation(T)
13     return gamma0 * (1 + 2 * nT)
14  def quantum_signal(t, T):
15     gamma = decoherence_rate(T)
16     return np.exp(-gamma * t) * np.cos(omega * t)
17  T_cryogenic = 0.01
18  T_higher = 1.0
19  signal_cryogenic = quantum_signal(t, T_cryogenic)
20  signal_higher = quantum_signal(t, T_higher)
21  plt.figure(figsize=(8, 5))
22  plt.plot(t, signal_cryogenic, label=f"Cryogenic T = {T_cryogenic}")
23  plt.plot(t, signal_higher, label=f"Higher T = {T_higher}")
24  plt.xlabel("Time")
25  plt.ylabel("Quantum Signal Amplitude")
26  plt.title("Quantum Signal Decoherence vs Temperature")
27  plt.legend()
28  plt.grid(True)
29  plt.show()

```

მოქმედი ფლუქტუაციური პროცესების ინტენსივო-
ბას. როდესაც ტემპერატურა უახლოვდება ნულ
კელვინს, თერმული წევრი პრაქტიკულად ქრება, ამ
პირობებში გარემოს მიერ ინდუცირებული აგზნე-
ბების ალბათობა მინიმალურია და დეკოჰერენციის

სიჩქარე უახლოვდება თავის ფუნდამენტურ, ე.წ.
„ნულოვანი ტემპერატურის“ ლიმიტს. სიმულაციის
შედეგები ცხადყოფს, რომ კრიოგენულთან მიახ-
ლოებულ ტემპერატურაზე (მაგალითად, $T = 0.01$

ნორმირებული ერთეულებით) სიგნალი ინარჩუნებს ოსცილაციურ ხასიათს დიდი დროის განმავლობაში, ხოლო მისი ამპლიტუდის ჩახშობა ნელი და გლუვია. ეს მიუთითებს კოჰერენტულობის ხანგრძლივობაზე და ფაზური სტაბილურობის მაღალ დონეზე. შედარებით მაღალ ტემპერატურაზე კი, (მაგალითად, $T = 1.0$) ბოზე-აინშტაინის განაწილების წევრი მნიშვნელოვნად იზრდება, რაც იწვევს დეკოჰერენციის სიჩქარის ზრდას. სიმულაციურ გრაფიკზე ეს აისახება სიგნალის სწრაფ ექსპონენციურ ჩახშობაში. ოსცილაციები მოკლე დროში კარგავს ამპლიტუდას და სისტემა სწრაფად გადადის დინამიკური წონასწორობის მდგომარეობაში. აღნიშნული ქცევა ასახავს თერმულად ინდუცირებულ დეფაზირებასა და ენერგეტიკულ რელაქსაციას, რომლებიც ღია კვანტური სისტემების თეორიაში აღწერილია მასტერ-განტოლებების საშუალებით. შედეგები ხარისხობრივად შეესაბამება იმ თეორიულ მოლოდინს, რომლის მიხედვითაც დეკოჰერენციის დრო (T_2) უკუპროპორციულია გარემოს ხმაურის სპექტრული სიმკვრივისა და თერმული ოკუპაციის. ექსპერიმენტის ანალიზი აჩვენებს, რომ კრიოგენულ რეჟიმში სიგნალის ამპლიტუდა და ფაზა სტაბილურია, რაც ზრდის ინფორმაციის სანდო გადაცემისა და დამუშავების შესაძლებლობას. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია კვანტური გამოთვლითი არქიტექტურებისათვის, სადაც ლოგიკური ოპერაციების სიზუსტე კრიტიკულად არის დამოკიდებული კოჰერენტულობის ხანგრძლივობაზე. მაღალი ტემპერატურის შემთხვევაში კი სისტემის ქცევა თანდათან უახლოვდება

კლასიკურ დინამიკას, რადგან კვანტური სუპერპოზიციური ეფექტები სწრაფად იშლება გარემოსთან ინტენსიური ურთიერთქმედების გამო. აღსანიშნავია, რომ წარმოდგენილი მოდელი არის ფენომენოლოგიური მიახლოება და არ ითვალისწინებს ყველა შესაძლო მიკროსკოპულ მექანიზმს, როგორცაა ფერადი ხმაური, არამარკოვული პროცესები ან მრავალნაწილაკური ურთიერთქმედებები. მიუხედავად ამისა, იგი მკაფიოდ ასახავს ტემპერატურის გავლენის ძირითად ტენდენციას კვანტურ სიგნალზე. სიმულაციური შედეგები ადასტურებს, რომ ტემპერატურის შემცირება კვანტური კოჰერენტულობის შენარჩუნების ერთ-ერთი მთავარი სტრატეგიაა და კრიოგენულთან მიახლოებული პირობები არსებითად აუმჯობესებს სიგნალის დინამიკურ სტაბილურობას. ამრიგად, ჩატარებული სიმულაციური ექსპერიმენტი ქმნის თეორიულ საფუძველს ტემპერატურული რეჟიმების ოპტიმიზაციისათვის და იძლევა რაოდენობრივ წარმოდგენას იმაზე, თუ როგორ იცვლება კვანტური სიგნალის ამპლიტუდა და სიცოცხლის დრო კრიოგენული და არაკრიოგენული პირობების შედარებისას. დამატებით, მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ მოდელში გამოყენებული დეკოჰერენციის კოეფიციენტი მოიცავს როგორც სპონტანურ ემისიას, ისე თერმულად სტიმულირებულ პროცესებს, რაც საშუალებას იძლევა ტემპერატურის ზრდასთან ერთად გაიზარდოს როგორც ენერგეტიკული რელაქსაციის, ისე ფაზური დეფაზირების წვლილი. დაბალ ტემპერატურაზე დომინირებს ნულოვანი წერტილის ფლუქტუაციები, რომლებიც კვანტური ვაკუუმის თვისებას წარმოადგენს და სრულად ვერ ნულდება. შესაბამისად,

თუნდაც იდეალურ კრიოგენულ პირობებში, სიგნალის სრული კონსერვაცია შეუძლებელია, თუმცა მისი სიციფხლის დრო მნიშვნელოვნად იზრდება. უფრო მაღალ ტემპერატურაზე კი გარემოს სპექტრული სიმკვრივე ეფექტურად ფართოვდება, იზრდება ფონონური და ფოტონური მოდების აქტივობა, რაც ზრდის კუპლინგის ეფექტურობას სისტემასა და გარემოს შორის. სიმულაციური ანალიზი ასევე გვაძლევს საშუალებას შევაფასოთ კვანტური სიგნალის ხარისხობრივი მახასიათებლები, როგორცაა ფაზური კორელაცია და ენერგეტიკული სტაბილურობა. ასევე აღსანიშნავია, რომ დაბალ ტემპერატურაზე ოსცილაციების პერიოდულობა მკაფიოდ შენარჩუნებულია, რაც მიუთითებს ჰამილტონიანით განსაზღვრული ერთეულოვანი დინამიკის დომინირებაზე. მაღალი ტემპერატურის შემთხვევაში კი ამპლიტუდის სწრაფი ჩახშობა ამცირებს დაკვირვებადი ოსცილაციების რაოდენობას, რაც პრაქტიკულად ზღუდავს კვანტური ოპერაციების შესრულების ფანჯარას. ეს ფაქტორი განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია კვანტური ალგორითმების განხორციელებისას, სადაც ოპერაციების თანამიმდევრობა უნდა დასრულდეს დეკოჰერენციამდე. მოდელის გაფართოების პერსპექტივაში შესაძლებელია არამარკოვული ეფექტების ჩართვა, სადაც გარემოს მეხსიერება გავლენას ახდენს სისტემის დინამიკაზე და დეკოჰერენციის პროცესი აღარ არის წმინდა ექსპონენციური. ასეთ შემთხვევაში, დაბალ ტემპერატურაზე შეიძლება გამოვლინდეს კოჰერენტულობის ნაწილობრივი აღდგენა ან ოსცილაციური დეკოჰერენცია. წარმოდგენილი სიმულაციური ექსპერიმენტი ნათლად აჩვენებს ტემპერატურის გავლენის ფუნდამენტურ ტენდენციას

და ქმნის რაოდენობრივ ჩარჩოს, რომლის ფარგლებში შეიძლება შეფასდეს კვანტური სისტემის ოპტიმალური სამუშაო რეჟიმი.

დასკვნა

ჩატარებულმა სიმულაციურმა ექსპერიმენტმა ცხადად წარმოაჩინა ტემპერატურის ფუნდამენტური როლი კვანტური სიგნალის დინამიკაში და განსაკუთრებით მისი კოჰერენტულობის შენარჩუნების პროცესში. მოდელირების შედეგად დადასტურდა, რომ კრიოგენულთან მიხლოებულ პირობებში, როდესაც თერმული აგზნებების წვლილი პრაქტიკულად მინიმუმამდეა დაყვანილი, კვანტური სისტემა დიდხანს ინარჩუნებს ოსცილაციურ ხასიათს, ხოლო ამპლიტუდის ჩახშობა მიმდინარეობს შედარებით ნელი ტემპით. ეს მიუთითებს დეკოჰერენციის სიჩქარის შემცირებაზე და გარემოსთან სუსტი ეფექტური კუპლინგის არსებობაზე. შედეგად, კვანტური ინფორმაცია ნაკლებად ექვემდებარება დეგრადაციას, რაც კრიტიკულად მნიშვნელოვანია მაღალი სიზუსტის გამოთვლითი და საინფორმაციო პროცესებისათვის. სიმულაციის მეორე რეჟიმში, სადაც ტემპერატურა შედარებით მაღალია, ნათლად გამოჩნდა თერმული ოკუპაციის ზრდით განპირობებული ეფექტები. გარემოსეული მოდების აქტივაციის შედეგად იზრდება დეფაზირების და ენერგეტიკული რელაქსაციის ალბათობა, რაც ექსპონენციურად ამცირებს სიგნალის ამპლიტუდას დროში. ამ პირობებში კვანტური ოსცილაციები სწრაფად ქრება და სისტემა უახლოვდება კლასიკურ ქცევით რეჟიმს, სადაც კვანტური სუპერპოზიციის ეფექტები პრაქტიკულად აღარ არის დაკვირვებადი. აღნიშნული შედეგი თანხვედრაშია ღია

კვანტური სისტემების თეორიულ პროგნოზებთან ერთ-ერთ მთავარ მაკროსკოპულ პარამეტრს, რო-
და ადასტურებს, რომ ტემპერატურა წარმოადგენს მელიც განსაზღვრავს მიკროსკოპული კვანტური
პროცესების მდგრადობას.

ლიტერატურა

1. Zanardi, P., & Venuti, L. C. (2007). *Quantum computation: A new paradigm*. Cambridge University Press.
2. Sergienko, A. V. (2005). *Quantum communications and cryptography*. CRC Press.
3. Wiseman, H. M., & Milburn, G. J. (2009). *Quantum measurement and control*. Cambridge University Press.
4. Scully, M. O., & Zubairy, M. S. (1997). *Quantum optics*. Cambridge University Press.
5. Shankar, R. (1994). *Principles of quantum mechanics*. Springer.
6. Wilde, M. M. (2017). *Quantum information theory*. Cambridge University Press.
7. Berman, P. R., & Malinovsky, V. S. (2011). *Principles of laser spectroscopy and quantum optics*. Princeton University Press.

UDC 621.391:530.145; 004.1; 004.4, 530.145.

SCOPUS CODE 1701

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2026-2-37-47>

Analysis of Quantum Signals in Cryogenic and Non-cryogenic Environments

Mariam Janelidze Georgian Technical University, faculty of informatics and Management systems, academic candidate, Georgia
E-mail: mariamjanelidze100@gmail.com

Reviewers:

N. Abzianidze, Georgian Technical University, Faculty of Informatics and Control Systems, Associate Professor
E-mail: n.abzianidze@gtu.ge

G. Goderdzishvili, Georgian Technical University, Faculty of Informatics and Control Systems, Professor
E-mail: g.goderdzishvili@gtu.ge

Abstract. The study of quantum signals is one of the fundamental and strategic directions of telecommunications and engineering sciences, as it is directly related to the in-depth understanding of the laws of matter and energy at the microscopic level and the transition to a new stage of telecommunications systems, as well as the formation of new principles of information transmission and processing and the development of technological innovations. A quantum signal, as a physical object carrying a quantum state, be it a photon, an electron, a qubit localized in a superconducting circuit, or an atomic spin system, contains information encoded through superposition and quantum entanglement. It is thanks to these properties that it becomes possible to perform tasks that are either practically inaccessible or extremely resource-intensive within the framework of classical physics. For example, computational models based on the principles of quantum mechanics provide the basis for quantum systems, which potentially radically change the speed and efficiency of data processing, while quantum communication provides fundamentally secure channels for information transmission, which is especially important in light of modern cybersecurity challenges. Comparative studies of quantum signals in cryogenic and non-cryogenic environments provide important theoretical results.

Keywords: Argon; Bose-Einstein Distribution; Chemical Inertness; Coherence; Decoherence; Hamilton; Helium; Ionic Bonds; Master Equations; Neon; Qubit; Quantum Mechanics; Quantum Signals; Schrödinger Equation; Spin System; Telecommunications.

განხილვის თარიღი 25.02.2026

შემოსვლის თარიღი 27.02.2026

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 26.06.2026