

UDC 004

კვანტური კომპიუტინგის დარგის მიღწევები გურამ კაშმაძე

კომპიუტერულ მეცნიერებათა დეპარტამენტი. ივ. ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო
უნივერსიტეტი. თბილისი. უნივერსიტეტის ქ. 13. gkashmadze@yahoo.com

რეზიუმე

სტატიაში განხილულია კვანტური პროცესორის აგების მეთოდები, ბოლოდროინდელი მიღწევები კვანტური კომპიუტინგის დარგში და მისი განვითარების პერსპექტივები.

საკვანძო სიტყვები: ქუბიტი, სუპერპოზიცია, დახლართულობა, კვანტური პროცესორი.

Abstract

In this paper we consider various methods to build a quantum processor, recent achievements of quantum computing and developmental perspectives on this field.

Keywords: Qubit, superposition, entanglement, quantum processor

შესავალი

კვანტური კომპიუტინგი თანამედროვე მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების განვითარების აქტუალური მიმართულებაა. მრავალი მსხვილი კორპორაცია აინვესტირებს კვლევას ამ მიმართულებით, მათ შორის - გუგლი, ჰიულეტ-პაკარდი, IBM, ინტელი, ლოკჰიდ-მარტინი, მაიკროსოფტი, მიცუბიში, ნოკია, ტოშიბა. კვანტური კომპიუტერი საშუალებას გვაძლევს გამოთვლითი ტექნოლოგიების სიმძლავრე ექსპონენტურად გავზარდოთ თანამედროვე სისტემებთან შედარებით. დღეისთვის დანიშნულების მიხედვით ორი სახეობის კვანტური კომპიუტერის განვითარებაზე მუშაობენ. ერთია უნივერსალური კვანტური კომპიუტერი, რომელსაც ნებისმიერი გამოთვლითი ოპერაციის ჩატარება შეეძლება; მეორე კი - სპეციფიკური ოპტიმიზაციური პრობლემების გადაჭრისთვის არის გამიზნული.

სრულმასშტაბიანი, ზოგადი დანიშნულების კვანტური კომპიუტერი ჯერ კიდევ მომდევნო წლების პერსპექტივაა, მაგრამ სპეციალური კვანტური სისტემები, რომლებიც მრავალ კვანტურ ბიტს აერთიანებენ, უკვე გამოიყენება ონლაინ რეჟიმში.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ კვანტური კომპიუტერი არ უნდა განვიხილოთ როგორც კლასიკური კომპიუტერის ჩამნაცვლებელი საშუალება. კვანტური კომპიუტერის გამოყენება გათვალისწინებულია ისეთი პრობლემების გადასაჭრელად, რომლებსაც კლასიკური კომპიუტერი ვერ გასწვდება.

I. სამი პერიოდი კვანტური ლოგიკის განვითარებაში

კლასიკური ლოგიკა, რომლის მოდელს ბულის ალგებრა წარმოადგენს, ვერ აღწერს კვანტური სამყაროს მოვლენებს. ვერნერ ჰაიზენბერგის განუზღვრელობის პრინციპის თანახმად ნაწილაკის კოორდინატისა და იმპულსის ერთდროულად ზუსტი განსაზღვრა შეუძლებელია. მათი გაზომვის ცდომილებათა ნამრავლი პლანკის მუდმივის დაყვანილი მნიშვნელობის ნახევარზე ნაკლები არაა (პლანკის მუდმივა - ქმედების კვანტი, დაახლოებით $6,626 \cdot 10^{-34}$ ჯოული·წმ). შესაძლებელია კოორდინატისა და

იმპულსის მნიშვნელობების შესახებ a, b, c წინადადებების ისე ჩამოყალიბება, რომ $a \& (b \vee c)$ წინადადება ჭეშმარიტი იქნება, $a \& b \vee a \& c$ კი არა (იხ. ვიკიპედიის სტატია - Quantum logic). ამრიგად, კვანტურ სამყაროში კონიუნქცია არ არის განრიგებადი დიზიუნქციის მიმართ.

მკვლევარები განიხილავენ კვანტური ლოგიკის განვითარების სამ ეტაპს.

I.1 გარეტ ბირკჰოფისა და ჯონ ფონ ნეიმანის მიდგომა.

კვანტური ლოგიკის სათავეა ბირკჰოფისა და ნეიმანის ცნობილი ნაშრომი [1]. აქ გამოთქმული მოსაზრებების თანახმად, კვანტური დაკვირვებადი სიდიდის (ანუ ზომადი დინამიკური ცვლადის) ფორმალური მათემატიკური ანალოგი არის ჰილბერტის სივრცის ჩაკეტილი ქვესივრცე და იგი აღიწერება ლოგიკური წინადადებით.

$L_c(H)$ იყოს ჰილბერტის H სივრცის ჩაკეტილ ქვესიმრავლეთა მესერი. S_p და S_q სიმბოლოებით აღვნიშნოთ დაკვირვებადი სიდიდეების შესახებ p და q წინადადებების შესაბამისი ქვესივრცეები. $S_p, S_q \in L_c(H)$.

$p \& q$ კონიუნქციას შეესაბამება S_p და S_q სიმრავლეების თანაკვეთა.

$S_p \vee S_q$ $p \vee q$ დიზიუნქციას შეესაბამება S_p და S_q სიმრავლეების გაერთიანების წრფივი გარის ტოპოლოგიური ჩაკეტვა.

$\neg p$ უარყოფას შეესაბამება S_p ქვესივრცის ყველა ელემენტის ორთოგონალურ ელემენტთა ქვესივრცე. კეტ-ვექტორების ორთოგონალურობა ეკვივალენტურია მათი სკალარული ნამრავლის ნულთან ტოლობისა.

$p \Rightarrow q$ იმპლიკაცია ნიშნავს, რომ S_p ქვესივრცე S_q ქვესივრცის ქვესიმრავლეა.

ამრიგად, ზემოაღნიშნული ნაშრომის მიხედვით კვანტური ლოგიკის ალგებრული მოდელი ჰილბერტის სივრცის ჩაკეტილ ქვესივრცეთა ორთომოდულარული მესერია. ორთომოდულარული მესერი და კვანტური ლოგიკა თითქმის სინონიმებად იქცა.

I.2 კვანტური ლოგიკის რენესანსი.

ბირკჰოფისა და ფონ ნეიმანის ნაშრომის გამოქვეყნებიდან ოცი წლის შემდეგ ჯორჯ მაკის წიგნის [2] გამოსვლამ გამოიწვია კვანტური ლოგიკის ხელახალი გააზრება არაკლასიკური, კერძოდ ინტუიციონისტური აქსიომატური ლოგიკური სისტემების თვალსაზრისით.

1975 წელს ალან დეიმ აღმოაჩინა თვისება, რომელიც გამოარჩევს ჰილბერტის მესერს საზოგადოდ ორთომოდულარული მესერისგან (იხ. [3], [4]). აღნიშნული თვისება განზოგადოებულ იქნა ნორმან მეგილის და მლადენ პავიჩიჩის მიერ [5].

I.3 კვანტური გამოთვლებით განპირობებული ლოგიკა

დასავლური რენესანსის უკანასკნელმა „უნივერსალურმა გენიოსმა“ გოტფრიდ ლაიბნიცმა მნიშვნელოვანი ნაბიჯები გადადგა მექანიკური კომპიუტინგის, ბინარული რიცხვითი სისტემის დამუშავების, ლოგიკისა და გამოთვლების დაკავშირების მიმართულებით.

მეოცე საუკუნის ერთერთი უდიდესი ლოგიკოსის, სტეფენ კლეინის კლასიკურ წიგნში [6] რამდენიმე თავი ეძღვნება რიცხვთა თეორიასა და რეკურსიულ

ფუნქციებს.

ოცდამეერთე საუკუნეში განსაკუთრებით გაძლიერდა კვანტურ ბიტებთან, კვანტურ რეგისტრებთან და ზოგადად კვანტურ კომპიუტინგთან დაკავშირებული ალგებრულ-ლოგიკური სისტემების კვლევა, რითაც ახასიათებენ კვანტური ლოგიკის განვითარების მესამე ეტაპს [7]. უკანასკნელ ათწლეულებში კვანტური ლოგიკისა და კვანტური სტრუქტურების დარგში მრავალი ნაშრომი გამოქვეყნდა (მათ შორის [8], [9], [10], [11]).

II. კვანტური კომპიუტერი.

კვანტური კომპიუტერი არის მოწყობილობა, რომელიც ტრადიციული, ფონ ნეიმანის ტიპის კომპიუტერისაგან განსხვავებით მუშაობს კვანტური მექანიკის კანონებზე დაფუძნებული გამოთვლების მოდელის მიხედვით. კვანტური კომპიუტერის ექსპერიმენტული ვარიანტები ინფორმაციის წარმოდგენისა და დამუშავებისთვის მიკროსამყაროში - ატომების და ელემენტარული ნაწილაკების დონეზე ($\sim 10^{-10}$ მ მანძილზე) მიმდინარე პროცესებით სარგებლობენ.

კვანტური კომპიუტერის თეორიის საწყისები დაკავშირებულია პ. ბენიოფის [12], რ. ფეინმანის [13] და დ.დოიტშის [14] ნაშრომებთან.

ბევრი თვლის, რომ კვანტური კომპიუტერი არის ერთადერთი საშუალება გორდონ მურის ემპირიული კანონის გადალახვისა, რომლის თანახმად ინტეგრალურ სქემაში ჩადგმული ტრანზისტორების რაოდენობა ყოველ 18-24 თვეში ორმაგდება. გასათვალისწინებელია აგრეთვე მეცნიერების ვარაუდი, რომ უახლოეს წლებში კომპონენტების დამზადების ტექნოლოგია მიაღწევს ფიზიკით განპირობებულ მკაცრ ზღვრებს, რაც გამოიწვევს მურის კანონზომიერების დარღვევას (გამოითქვა კიდევ „მურის კანონის კანონი“: იმ მეცნიერთა რაოდენობა, რომლებიც თვლიან რომ უახლოეს წლებში მურის კანონი ძალას დაკარგავს, ყოველ ორ წელიწადში ორმაგდება). გამოთვლების სისწრაფის მნიშვნელოვანი ზრდა მხოლოდ კვანტური ტექნოლოგიების გამოყენებით იქნება შესაძლებელი.

1994 წელს ამერიკელი მეცნიერის პეტერ შორის მიერ რიცხვის მარტივ მამრავლებად დაშლის კვანტური ალგორითმის გამოქვეყნებამ [15] და იმის გაცნობიერებამ, რომ კვანტურ რეჟიმში შეცდომების კორექციის პროცესი რთული (ხანგრძლივი) ალგორითმების გამოყენების შესაძლებლობას იძლევა, განსაკუთრებით გააძლიერა კვანტური კომპიუტინგის თემატიკით დაინტერესება.

ინფორმაციის კლასიკური ერთეულის, ბიტის როლს კვანტურ ინფორმატიკაში თამაშობს ქუბიტი - კვანტური ბიტი. ფორმალურად იგი აღიწერება ორგანზომილებიანი ჰილბერტის სივრცის ერთეულოვანი ვექტორით, რომელიც ასე შეიძლება ჩაიწეროს: $a(1,0)^t + b(0,1)^t$. a, b კომპლექსური რიცხვები (ალბათობის ამპლიტუდები) აკმაყოფილებენ პირობას

$$|a|^2 + |b|^2 = 1$$

ორთონორმალურ საბაზისო მდგომარეობებად ჩვეულებრივ ირჩევენ $(1,0)^t$ ვექტორს „0“-ის როლში და $(0,1)^t$ ვექტორს „1“-ის როლში. არსებითი განსხვავება კლასიკურ და კვანტურ ბიტებს შორის ისაა, რომ კლასიკური ბიტის მნიშვნელობა შეიძლება იყოს ან 0 (მცდარი), ან 1 (ჭეშმარიტი) და სხვა მნიშვნელობა გამორიცხებულია (გამორიცხული მესამის კანონი), კვანტური ბიტის მნიშვნელობა კი შეიძლება იყოს საბაზისო მდგომარეობათა სუპერპოზიციის ტოლი. ეს ფაქტი ფუნდამენტურია კვანტური კომპიუტინგისთვის.

კვანტური სისტემის მდგომარეობა, რომელიც საბაზისო მდგომარეობათა სუპერპოზიციას წარმოადგენს, შეესაბამება ტალღური ფუნქციების ფაზებსა და ამპლიტუდებს შორის გარკვეულ მიმართებას. ამ მიმართებას კვანტური კოჰერენტობა ეწოდება. კვანტურ კომპიუტერში ალგორითმის შესრულება გულისხმობს ქუბიტებზე უნიტარული ოპერაციების ჩატარებას. აღნიშნული ოპერაციების შესრულების პროცესში შეძლებისდაგვარად უნდა იქნას შენარჩუნებული ქუბიტების კოჰერენტობა, რასაც ხელს უშლის ქუბიტების წარმომდგენ ფიზიკურ სისტემაზე გარემოს ზემოქმედება. იგი იწვევს დეკოჰერენციის შეუქცევად პროცესს, რომელიც ინფორმაციის დაკარგვად შეგვიძლია ჩავთვალოთ. დეკოჰერენციის პროცესის შესასუსტებლად ზოგიერთ შემთხვევაში ქუბიტების არეს აცივებენ 15 - 20 მილიკელვინ ტემპერატურამდე. ალგორითმი უნდა შესრულდეს დეკოჰერენციის დროსთან შედარებით ბევრად უფრო სწრაფად. ქუბიტებზე შესასრულებელი ოპერაციებისათვის აუცილებელი დროის შეფარდება დეკოჰერენციის დროსთან განსაზღვრავს შეცდომის კოეფიციენტს. თუ ეს კოეფიციენტი საკმაოდ მცირეა, შესაძლებელი ხდება დეკოჰერენციით გამოწვეული შეცდომის კორექტირება. ჩვეულებრივ, ითვლება, რომ შეცდომის კოეფიციენტი 10^{-4} -ზე ნაკლები უნდა იყოს.

ორკომპონენტთან კვანტურ სისტემასთან დაკავშირებული ჰილბერტის H სივრცე არის კომპონენტების შესაბამისი სივრცეების ტენზორული ნამრავლი

$$H = H_1 \times H_2.$$

H სივრცის ბაზისი აიგება კომპონენტების საბაზისო ვექტორების ტენზორულ ნამრავლთა სახით. ორი კვანტური ბიტის სისტემის ზოგადი მდგომარეობა არის წრფივი კომბინაცია

$$a_0 (1,0,0,0)^t + a_1 (0,1,0,0)^t + a_2 (0,0,1,0)^t + a_3 (0,0,0,1)^t$$

$$a_0, \dots, a_3 \text{ კომპლექსური რიცხვებია, } a_0^2 + \dots + a_3^2 = 1.$$

კვანტურ მდგომარეობას დახლართული (entangled) ეწოდება, თუ იგი არ შეიძლება წარმოდგენილ იქნას კომპონენტების ტენზორული ნამრავლის სახით, საწინააღმდეგო შემთხვევაში მას სეპარაბელური მდგომარეობა ეწოდება. თუ ორი ობიექტი დახლართულ მდგომარეობაში იმოფება, მაშინ ერთერთის მდგომარეობის გაზომვას იგი გადაყავს ცნობილ მდგომარეობაში, რაც მყისიერად ახდენს გავლენას მეორის მდგომარეობაზე, რაც არ უნდა შორს იმყოფებოდეს მეორე. ამ მოვლენას ალბერტ აინშტაინი უწოდებდა „უცნაურ ქმედებას შორ მანძილზე“ – spooky action at a distance (იხ. [16]).

კვანტური თეორიის პარადოქსული ეფექტების - კვანტური სუპერპოზიციისა და დახლართულობის გამოყენებით კვანტური კომპიუტერები გადაჭრიან პრობლემებს, რომელთა ამოხსნა დღემდე შეუძლებლად ითვლებოდა.

გამოიკვეთა კვანტური კომპიუტერის დამუშავების რამდენიმე მიმართულება საბაზისო ელემენტის - კვანტური ბიტის ფიზიკური რეალიზაციის მეთოდების მიხედვით. თვითოეულ მათგანს თავისი დადებითი მახასიათებლები გააჩნია, მაგრამ ძნელი სათქმელია, რომელია საუკეთესო. ამ მეთოდების შედარების დროს გასათვალისწინებელია ქუბიტის მდგომარეობის მართვის სიადვილე, სისწრაფე და მისი კოჰერენტობის დრო (დროის შუალედი, რომლის განმავლობაშიც კვანტური ბიტი ინარჩუნებს თავისი პარამეტრების მნიშვნელობებს). პირობები, რომლებსაც

უნდა აკმაყოფილებდეს კვანტური ბიტის ფიზიკური განხორციელება, დაწვრილებით არის განხილული დ. დივინჩენცოს სტატიაში [17].

II.1 სპინური კვანტური ბიტი

კლასიკურ ფიზიკაში მბრუნავ სხეულს გააჩნია მოძრაობის რაოდენობის მომენტი ანუ კუთხური მომენტი - ინერციის ერთერთი ფორმა. კუთხური მომენტი არის რადიუს-ვექტორის და იმპულსის ვექტორული ნამრავლი. მიკრონაწილაკებს აგრეთვე გააჩნიათ შესაბამისი თვისება, რომელსაც სპინს უწოდებენ. სპინი აქვთ ელექტრონს, პროტონს, ნეიტრონს, მთლიანად ბირთვის. მათ ხშირად მბრუნავი ბურთის სახით წარმოადგენენ, რაც არ არის მართებული. ნაწილაკები არ ბრუნავენ „თავისი ღერძის“ გარშემო. სპინი, ისევე როგორც მასა, ნაწილაკის შინაგანი, ფუნდამენტური თვისებაა და არ წარმოიშობა სხვა უფრო ძირითადი მექანიზმებით. კუთხური მომენტი ურთიერთმოქმედებს გრავიტაციულ ველთან, სპინი კი ურთიერთმოქმედებს ელექტრომაგნიტურ ველთან. სპინი იკვანტება - იღებს დისკრეტულ მნიშვნელობებს სასრული სიმრავლიდან.

პროტონის, ნეიტრონის და ელექტრონის სპინი $S = 1/2$.

ბირთვის სპინი I იცვლება 0-დან 8-მდე $1/2$ ნაბიჯით. ბირთვის აგებულების სირთულის გამო ძნელია მისი სპინის გამოთვლა პროტონებისა და ნეიტრონების რაოდენობის მიხედვით, მაგრამ ცნობილია ასეთი ფაქტები:

- თუ პროტონებისა და ნეიტრონების რაოდენობები ბირთვში ლუწი რიცხვებია, მაშინ ბირთვის სპინი ნულის ტოლია.
- თუკი ეს რაოდენობები კენტი რიცხვებია, მაშინ ბირთვის სპინი დადებითი მთელი რიცხვია.
- ყველა სხვა შემთხვევაში ბირთვის სპინი შერეული რიცხვია.

მხოლოდ დადებითი სპინის მქონე ბირთვები შთანთქავენ და გამოასხივებენ ელექტრომაგნიტურ ტალღებს და ექვემდებარებიან „რეზონანსს“ მაგნიტურ ველში.

ელექტრონის სპინის გამოყენება ხელსაყრელია კვანტურ პროცესორში, რადგან ელექტრონის სპინით მანიპულირება და მისი დაწყვილება სხვა ელექტრონულ სპინთან შესაძლებელია დროის უფრო მცირე შუალედის განმავლობაში ბირთვულ სპინთან შედარებით. კვანტური ბიტის როლში ბირთვული სპინის გამოყენება მიზანშეწონილია კვანტური მეხსიერების უჯრედებად, რადგან ბირთვულ სპინს გააჩნია კოჰერენტობის ბევრად მეტი დრო ელექტრონულ სპინთან შედარებით.

გარე მაგნიტურ ველში მოთავსებული ელექტრონის სპინი იღებს ან ველის თანმხვედრ, ან მის საპირისპირო მიმართულებას. ამ მიმართულებების მქონე სპინების იდენტიფიცირებით „0“-თან და „1“-თან (შესაბამისად), მივიღებთ ლოგიკური ელემენტის - ქუბიტის მოდელს. სპინზე დაფუძნებულ კვანტურ კომპიუტერს საბაზისო მდგომარეობებთან ერთად უნდა შეეძლოს მათი კოჰერენტული სუპერპოზიციის მართვაც. საჭიროა ამპლიტუდისა და ფაზის განმსაზღვრელი პარამეტრების მაღალი სიზუსტით კონტროლი. უფრო რთული პრობლემაა კვანტური გამოთვლების პროცესში დახლართული ქუბიტების შექმნა და მათი მართვა. მცირე რაოდენობის ქუბიტების პირობებში ამ პრობლემების გადაჭრა დღეისთვის შესაძლებელია (იხ. [18]).

აღმასი არის მეტად პერსპექტიული მასალა სპინზე დაფუძნებული ქუბიტის

აგებისათვის. ალმასში ნახშირბადის ყოველი ატომი კოვალენტურად არის დაკავშირებული ოთხ მეზობელთან. როდესაც ერთერთი ატომი ჩანაცვლებულია აზოტის ატომით, ნახშირბად-აზოტის კავშირი უფრო სუსტია ნახშირბად-ნახშირბადის გარემომცველ კავშირებთან შედარებით. აზოტის ერთერთი მეზობელი ნახშირბადის ატომის ამოგდებით ალმასის კრისტალური სტრუქტურიდან და ვაკანსიის დაფიქსირებით მიიღება ზედმეტი ელექტრონის მქონე წყვილი, რომელსაც აზოტ-ვაკანსიის დეფექტი ან ცენტრი (nitrogen-vacancy defect, NV-defect, NV-center) ეწოდება. ასეთი სახის ნარევეს გააჩნია სპინის თვისება. შესაძლებელია ელექტრომაგნიტური ველის, მიკროტალღური რადიაციის ან სინათლის გამოყენებით მისი ინიციალიზება, წაკითხვა და მართვა ოთახის ტემპერატურაზე სხვა სახის ქუბიტებისგან განსხვავებით, რომელთაც დაბალი ტემპერატურა ჭირდებათ ([19]).

ბოლო დროს მზარდ ინტერესს იწვევს აგრეთვე სილიკონ-ვაკანსიის (SiV) ცენტრის შესწავლა. ასეთი ცენტრს გვაძლევს ალმასის მესერში სილიკონის ერთი ატომით ნახშირბადის ორი მეზობელი ატომის ჩანაცვლება. იგი წარმოადგენს უარყოფითად დამუხტულ სპინ-1/2 სისტემას, რომელიც იმართება მიკროტალღოვანი ველით. მისი კოჰერენტობის დროა 13 მილიწამი, ხოლო რელაქსაციის დრო - 1 წამი 100 მილიკელვინი ტემპერატურის პირობებში. ითვლება, რომ ეს სისტემა კვანტურ ქსელებში გამოყენებისათვის პერსპექტიული კანდიდატია [20], [21].

II.2 ზეგამტარი წრედები

ნებისმიერი ზეგამტარი კვანტური წრედის მთავარი ელემენტი არის ძლიერ თხელი იზოლატორით განცალკევებული ორი ზეგამტარი ფირფიტის ერთობლიობა. ასეთ მოწყობილობაში ელექტრული დენის არსებობა და აგრეთვე დენსა და ძაბვას შორის მიმართების ზუსტი ფორმა 1962 წელს იჩინასწარმეტყველა 22 წლის უელსელმა ფიზიკოსმა ბრაიან ჯოზეფსონმა [22], რის გამოც ზემოხსენებულ სისტემას ჯოზეფსონის ნაერთი (Josephson Junction) უწოდეს. კვანტური წრედების სქემებში იგი ასე გამოისახება: $\text{---}\times\text{---}$. 1973 წელს ბ. ჯოზეფსონს ნობელის პრემია მიენიჭა მისი მოსაზრებების ექსპერიმენტულად დადასტურების შემდეგ.

ჯოზეფსონის ნაერთი წარმოადგენს არაწრფივ ინდუქტორს, რომელიც ენერჯიის სუსტი გაფანტვით ხასიათდება. ეს თვისებები კვანტური ბიტის როლში მისი გამოყენების საშუალებას იძლევა. ზეგამტარობისა და ჯოზეფსონის ეფექტის თეორია აღწერილია ბოლო წლებში გამოცემულ რამდენიმე მონოგრაფიაში (მაგ. [23], [24]).

II.3 იონური კვანტური ბიტი.

გასული საუკუნის ორმოცდაათიან წლებში გერმანელმა ფიზიკოსმა ვოლფგანგ პაულმა განავითარა კვადრუპოლური ელექტრული ველით დაჭერილი დამუხტული ნაწილაკების მას-სპექტრომეტრის ტექნიკა (1989 წელს პაულმა ნობელის პრემია მიიღო). ეს ტექნიკა საფუძვლად დაედო იონური კვანტური ბიტის შექმნას. ჩაჭერილი იონების მეთოდზე დაფუძნებული კვანტური კომპიუტერის მთავარი კომპონენტებია იონების ელექტრომაგნიტური დამჭერი (“ხაფანგი”, რომელიც შედგენილია ოთხი ელექტროდისაგან), ლაზერები და ფოტოდეტექტორები. ელექტროდების სეგმენტთა ნაწილებს შორის ელექტრული ძაბვა ისეა შერჩეული

რომ ელექტრულ ველში მოთავსებული მცირე რაოდენობის იონები წრფივად განლაგდნენ ელექტროდების გასწვრივ. აპარატურა მოთავსებულია ძლიერ ვაკუუმში (დაახლ. 10^{-8} Pa). იონური კვანტური ბიტების მდგომარეობის წაკითხვა და მათზე ოპერირება წარმოებს მოდულირებული ლაზერული სინათლით (იხ. [25]). 2018 წლის მარტში გამოქვეყნდა ოქსფორდის უნივერსიტეტის ფიზიკის დეპარტამენტის თანამშრომელთა სტატია, რომელშიც აღწერილია ზემოაღნიშნული მეთოდით აგებული ლოგიკური ელემენტის მუშაობის მაღალი მახასიათებლები. კერძოდ, შექმნილია 1.6 მიკროწამის ხანგრძლივობის ლოგიკური ელემენტი 99.8% სიზუსტით (იხ. [26]).

ამავე მეთოდს ემყარება მეცნიერთა ჯგუფის მიერ შექმნილი ექსპერიმენტული აპარატი მსხვილმასშტაბიანი სპინური მოდელის სიმულაციისთვის. წრფივი ჯაჭვის სახით განლაგებული ასზე მეტი იონი დაჭერილი იყო თითქმის ერთი საათის განმავლობაში [27].

II.4 ფოტონური წრედები

ფოტონს - მასის არმქონე სპინ_1 ნაწილაკს გააჩნია სპინის მხოლოდ ორი საკუთრივი მნიშვნელობა მისი გავრცელების მიმართულების (ტალღური ვექტორის) გასწვრივ. ეს მნიშვნელობები შეესაბამება ურთიერთსაწინააღმდეგო ორიენტაციის წრიულ პოლარიზაციას, რაც შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას კვანტური ბიტის საბაზისო მდგომარეობებად. ფოტონური ქუბიტი კარგად ფუნქციონირებს როგორც კრიოგენურ, ისე ოთახის ტემპერატურაზე, მედეგია დეკოჰერენციის მიმართ, ადვილად იმართება მარტივი ოპტიკური მოწყობილობებით (ტალღური(ფაზური) ფირფიტა, ინტერფერომეტრი). ქუბიტს შეუძლია გადაადგილდეს სხვა ქუბიტებს შორის სინათლის სიჩქარით ისე, რომ არ შეიცვალოს არც ერთის მდგომარეობა. ყველა ეს თვისება განაპირობებს კვანტურ წრედებში ამ სახის ქუბიტების გამოყენების ეფექტურობას [28], [29].

[30], [31], [32] სტატიებში განხილულია კატის მდგომარეობა ფოტონური ქუბიტისთვის. სახელწოდება მომდინარეობს ერვინ შრიოდინგერის წარმოსახვითი ექსპერიმენტიდან, რომელიც გულისხმობს დახშულ კოლოფში რადიაქტიურ ნივთიერებასთან და საწამლავთან ერთად მოთავსებულ კატას. რადიაქტიური ნივთიერების დაშლამ შესაძლებელია გამოიწვიოს საწამლავიანი ჭურჭლის დამსხვრევა და კატის სიკვდილი. გარკვეული დროის განმავლობაში კატის მდგომარეობა არის „ცოცხალი“ და „მკვდარი“ მდგომარეობების სუპერპოზიცია.

III. ზოგიერთი ბოლოდროინდელი მიღწევა კვანტური კომპიუტინგის დარგში

III.1 სილიკონური კვანტური ჩიპი.

ნიდერლანდების ქ. დელფტის ტექნოლოგიური უნივერსიტეტი მსოფლიოს ტექნოლოგიური უნივერსიტეტების პირველ ოცეულში შედის. 2015 წ. სექტემბერში Intel-მა უნივერსიტეტის კვანტური ტექნოლოგიების ცენტრთან და ნიდერლანდების გამოყენებითი კვლევების ორგანიზაციასთან დასდო კვანტური ტექნოლოგიების დარგში ათწლიანი თანამშრომლობის ხელშეკრულება. Intel-მა იკისრა 50 მილიონი დოლარის ინვესტირება, ექსპერტებით, ინჟინრებით და დაბალი ტემპერატურების ელექტრონიკით დახმარება.

2018 წ. 25 იანვარს გამოქვეყნდა ცნობა რომ მეცნიერთა ჯგუფმა პროფ. ლ.

ვანდერსიპენის ხელმძღვანელობით შეძლო სილიკონის ჩიპში კვანტური ინფორმაციის გადატანა ელექტრონის სპინიდან ფოტონზე. აღნიშნული ჯგუფის წევრია ნოდარ სამხარაძე. მისი თანაავტორობით გამოქვეყნებულ სტატიაში [33] აღწერილია ზემოხსენებული შედეგი. „შემდეგი ნაბიჯი ფოტონის მეშვეობით ჩიპში ერთმანეთისაგან დაშორებული ბიტების დაკავშირება იქნება“ - განაცხადა პროფესორმა ვანდერსიპენმა. (ცალკე აღებული ელექტრონის სპინი ურთიერთქმედებს მხოლოდ მის უშუალო გარემოცვასთან.)

სილიკონი ფართოდ გამოიყენება ტრანზისტორების წარმოებაში. გამოირკვა, რომ იგი პერსპექტიული მასალაა აგრეთვე კვანტურ ტექნოლოგიებშიც.

III.2 IBM Q სისტემა

Fortune 500 არის ყოველწლიური სია, რომელსაც ადგენს და აქვეყნებს ჟურნალი *Fortune*. სიაში შეაქვთ აშშ 500 უდიდესი კორპორაცია გასულ ფისკალურ წელს მიღებული შემოსავლის მიხედვით (ამ კორპორაციების შემოსავალი საზოგადოებისთვის ხელმისაწვდომია). Fortune 500 შექმნა ჟურნალის გამომცემელმა პ. სმიტმა და პირველად გამოაქვეყნა 1955 წ.

IBM Q ქსელი არის საერთაშორისო საზოგადოება Fortune 500 -ის წამყვანი კომპანიების, აკადემიური დაწესებულებების, ნაციონალური კვლევითი ლაბორატორიებისა, რომლებიც IBM-თან თანამშრომლობენ. მათ შორის არიან JPMorgan Chase, Barclays, Nagase, Oak Ridge National Lab, JSR კორპორაცია, სამსუნგი, ჰიტაჩი, ჰონდა, დაიმლერის სააქციო საზოგადოება, ოქსფორდის, კეიოს და მელბურნის უნივერსიტეტები. ამ ქსელის პარტნიორები იკვლევენ კვანტური კომპიუტინგის განვითარების გზებს, მის ინდუსტრიულ გამოყენებებს.

IBM Q ქსელის ჰაბი არის რეგიონული ცენტრი, რომელის მიზანია კვანტური სისტემების გამოყენებადობის ზრდა. ამ ქსელის წევრი ორგანიზაციების განკარგულებაშია 20 ქუბიტის კვანტური სისტემა, რომელშიც გამოყენებულია მიღწევები ზეგამტარი წრედების დიზაინის სფეროში. სისტემის კოჰერენტობის დრო საშუალოდ 90 მიკროწამია და კვანტური ოპერაციების მაღალი სიზუსტით ჩატარებას უზრუნველყოფს. IBM კორპორაციამ ახლახანს ააგო და გამოსცადა 50 ქუბიტის პროცესორის პროტოტიპი, რომელიც გამოყენებულ იქნება ახალი თაობის IBM Q სისტემებში.

III.3 53 ქუბიტის კვანტური სიმულატორი

2006 წელს მერილენდის უნივერსიტეტში დაარსებული გაერთიანებული კვანტური ინსტიტუტი თანამშრომლობს ამერიკის შეერთებული შტატების სტანდარტებისა და ტექნოლოგიების ნაციონალურ ინსტიტუტთან. როგორც მერილენდის უნივერსიტეტის პროფესორმა კრისტოფერ მონრომ განაცხადა, გაერთიანებული კვანტური ინსტიტუტი ფოკუსირებულია მეორე რევოლუციაზე კვანტურ მექანიკაში და მის გამოყენებაზე საზოგადოებასა და ტექნოლოგიაში. სხვა პროექტებთან ერთად მეცნიერები მუშაობენ პირველი თაობის კვანტური კომპიუტერის შექმნის უმნიშვნელოვანეს პროექტზე.

მეცნიერთა ჯგუფმა პროფ. მონროს ხელმძღვანელობით ააგო 53 ქუბიტის კვანტური სიმულატორი დაჭერილი იონების საფუძველზე. იგი გამოიყენება მრავალი ტანის მაგნიტური ურთიერთქმედების თვისებების სიმულაციისათვის.

ყოველ ქუბიტს გააჩნია ინდივიდუალური მართვა და იზომება თითქმის 100% სიზუსტით ერთჯერადი ექსპერიმენტული რეალიზაციით (single-shot measurement). სიმულატორი წარმოადგენს ვიწრო, შეზღუდული სახის კომპიუტერს, მაგრამ შესაძლებელია მისი განვითარება მმართველი ლაზერის მოდიფიკაციებით [34]. ჩვენ ორი ქუბიტით უფრო ახლოს ვართ სრულფასოვან კვანტურ კომპიუტერთანო - წერდა მარკ კიმი (DAILY NEWS, 29.XI.2017). ერთი შეხედვით ეს არც თუ ბევრია, მაგრამ გასათვალისწინებელია, რომ კვანტური კომპიუტინგის მიმართულებით კონკურენციაში რამდენიმე ჯგუფი ფეხდაფეხ მიყვება ერთმანეთს მიზნის მისაღწევად. მიზანი კი უნივერსალური კვანტური კომპიუტერის აგებაა. მ. კიმს მხედველობაში ქონდა ის ფაქტი, რომ 2017 წლის ივლისში ჰარვარდის უნივერსიტეტის პროფესორმა მიხეილ ლუკინმა გამოაცხადა მისი ჯგუფის მიერ 51 ქუბიტის სიმულატორის აგების შესახებ. მოგვიანებით გამოქვეყნდა სტატია ამ სიმულატორის დახასიათებით [35].

მ. ლუკინს მიაჩნია, რომ კვანტური გამომთვლელი მოწყობილობის ხარისხი უნდა შეფადეს სამი მახასიათებლით: ქუბიტების რაოდენობით, კოჰერენტობით და დაპროგრამების შესაძლებლობით. ქუბიტების მეტი რაოდენობა ნიშნავს გაცილებით მეტი მოცულობის გამოთვლების შესაძლებლობას, უკეთესი კოჰერენტობა განსაზღვრავს გამოთვლების შედეგის მეტ სიმეცობასა და სიზუსტეს, დაპროგრამებადობის უფრო მაღალი დონე აფართოებს მოწყობილობის გამოყენების არეს.

მეცნიერები თვლიან, რომ ზემოხსენებული ორივე სიმულატორის გაძლიერება შესაძლებელია 100 ქუბიტამდე მოცულობით.

III.4 კვანტური ექსპერიმენტი კოსმოსში - ჩინურმა თანამგზავრმა შექმნა დახლართული ფოტონები რეკორდულ მანძილზე.

QUESS – Quantum experiment at Space Scale – 100 მილიონი დოლარის ღირებულების ინტერნაციონალური კვლევითი პროექტია, რომელსაც ჩინეთი აფინანსებს. პროექტს მეთაურობს პან ჯიანვეი. პროექტის განხორციელებაში მონაწილეობენ აგრეთვე ვენის უნივერსიტეტი და ავსტრიის მეცნიერებათა აკადემია. ორწლიანი სამეცნიერო პროექტი სრულდება ჩინური თანამგზავრის ბაზაზე. თანამგზავრს უწოდეს მო-ცზი (Micius ან Mozi - ძვ. წ.ა. V საუკუნის ჩინელი ფილოსოფოსის სახელი). თანამგზავრი გაუშვეს 16.08.2016 გობის უდაბნოში მდებარე კოსმოდრომ ცზიუნციუანიდან (შიდა მონღოლეთი) 500 კმ სიმაღლის მზის სინქრონულ ორბიტაზე. დედამიწის გარშემოვლის პერიოდი - 90 წუთი. მასა - თითქმის 700 კგ. აღჭურვილია ფაქიზი ოპტიკური აპრატურითა და მზის ენერჯის პანელებით. ჩინეთში აგებულ იქნა ხუთი სადგური თანამგზავრთან კავშირისათვის. ორბიტაზე ოთხთვიანი ტესტირების წარმატებით დასრულების შემდეგ 2017 წლის 18 იანვარს თანამგზავრი გადავიდა მეცნიერთა განკარგულებაში და კვანტური ექსპერიმენტები ოფიციალურად დაიწყო. სამეცნიერო პროგრამის წარმატებით დასრულების შემთხვევაში ჩინეთი გეგმავს კიდევ 19 თანამგზავრის გაშვებას.

თავის პირველ ექსპერიმენტში პან ჯიანვეის გუნდმა ლაზერის სხივი გაგზავნა თანამგზავრზე განთავსებულ კრისტალში. იგი უშვებდა წამში 5.9 მილიონ წყვილს დახლართული ფოტონებისა, რომელთა სპინების პოლარიზაცია ურთიერთსაპირისპირო იყო. წყვილები იხლიჩებოდა და ცალკეული ფოტონები

იზავენბოდა დედამიწაზე ერთმანეთისაგან 1200 კილომეტრით დაშორებულ მიმდებარე სადგურებში (Delingha, Lijiang). ორივე სადგური მდებარეობს ტიბეტის მთებში, რაც ამცირებს სუსტი ფოტონების მიერ გასავლელ ატმოსფეროს ფენას. მეცნიერთა განცხადებით, მათ ერთდროულად გაზომეს ფოტონების 1000 წყვილზე მეტი და დაადგინეს, რომ საპირისპირო პოლარიზაცია ჰქონდა ბევრად მეტ წყვილს, ვიდრე ეს მოსალოდნელი იყო შემთხვევითი რეალიზაციით. ამრიგად “spooky action” განხორციელდა რეკორდულ მანძილზე [36].

ექსპერიმენტატორებმა დაძლიეს მრავალი სირთულე, კერძოდ, დაახლოებით 8 კმ/წმ სიჩქარით მოძრავი თანამგზავრიდან ფოტონების სხივების ფოკუსირება დედამიწაზე განლაგებულ მიმდებარე სადგურებზე.

ჩინური თანამგზავრისა და რეგიონალური კვანტური ქსელის შესაძლებლობათა გაერთიანებით ჩინელმა მეცნიერებმა განხორციელეს კრიპტოგრაფიული ინფორმაციის საიდუმლოდ გაცვლა ჩინეთსა და ავსტრიას შორის. გაიმართა აგრეთვე ვიდეოკონფერენცია ჩინეთისა და ავსტრიის მეცნიერებათა აკადემიებს შორის, რომელიც 75 წუთს გრძელდებოდა. გაცვლილ იქნა დაახლოებით ორი გიგაბაიტი მოცულობის ინფორმაცია [37].

ჰან ჯიანვეი - დაიბ. 1970 . ბაკალავრისა და მაგისტრის ხარისხი მიიღო მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების უნივერსიტეტში (ქ. Hefei - ჩინეთი). მუშაობდა ანტონ ცაილინგერის ჯგუფში ვენის უნივერსიტეტში, სადაც მიიღო ფილოსოფიის დოქტორის (PhD) ხარისხი. 2011 წ. აირჩიეს ჩინეთის მეცნიერებათა აკადემიაში (ყველაზე ახალგაზრდა); ცნობილია მისი შრომებით კვანტურ დახლართულობაში.

ანტონ ცაილინგერი - დაიბ. 1945 წ. - ვენის უნივერსიტეტის პროფესორი და ავსტრიის მეცნიერებათა აკადემიის კვანტური ოპტიკისა და კვანტური ინფორმაციის ინსტიტუტის (IQOQI) უფროსი მეცნიერ-თანამშრომელი. 2008 წ. გაერთიანებული სამეფოს ფიზიკის ინსტიტუტმა დააჯილდოვა ისააკ ნიუტონის მედლით (£ 1000 პრიზთან ერთად) „კვანტური ფიზიკის საფუძვლებში პიონერული კონცეპტუალური და ექსპერიმენტული წვლილისთვის, რომელიც კვანტური ინფორმაციის სწრაფად განვითარებადი დარგის ქვაკუთხედი გახდა“.

III.5 “ფლიპ-ფლოპ” კვანტური ბიტი

ავსტრალიის ახალი სამხრეთ უელსის უნივერსიტეტის (UNSW) თანამშრომელთა ჯგუფმა პროფესორ ანდრეა მორელოს ხელმძღვანელობით შექმნა კვანტური ბიტი ფოსფორის ატომბირთვისა და ელექტრონისაგან. მიღებულ იქნა დიპოლი, რომელშიც ელექტრონისა და ბირთვის სპინებს საპირისპირო მიმართულება აქვთ. ამრიგად, ბიტი წარმოდგენილია არა ცალკეული სპინების სახით, არამედ სპინების წყვილთა სახით. ბიტები იმართება არა მაგნიტური ველით, არამედ ელექტრული ველით, რაც უფრო ადვილია. დიპოლის ელექტრული ველის გავრცელების არეალი უფრო ფართოა, რაც ერთ ჩიპში ადრინდელზე ბევრად მეტი ბიტის ჩასმის საშუალებას იძლევა. ეს ტექნოლოგია უფრო იაფია [38].

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ UNSW-ს პროფესორი, კვანტური გამოთვლებისა და კომუნიკაციების ცენტრის დირექტორი, ქ-ნი მიშელ სიმონსი ავსტრალიაში დასახლებულია 2018 წლის პიროვნებად პიონერული ნაშრომებისა და მოღვაწეობისთვის კვანტური კომპიუტინგის დარგში. იგი არის 2017 წლის აგვისტოში სიდნეიში UNSW-სთან შექმნილი სილიკონური კვანტური

კომპიუტინგის კომპანიის ბორდის წევრი. კომპანიის მიზანია ამ დარგში უნივერსიტეტის მიღწევების კომერციალიზაცია. კომპანიას საწყის კაპიტალად სხვადასხვა წყაროებიდან გადაეცა 83 მილიონი დოლარი.

III.6 გუგლის 72 ქუბიტური ჩიპი

2018 წლის 5 მარტს ამერიკის ფიზიკოსთა საზოგადოების ყრილობაზე ლოს ანჯელესში ჯულიან კელიმ განაცხადა გუგლის მკვლევართა ჯგუფის მიერ შექმნილი 72 ქუბიტური კვანტური ჩიპის გამოცდის შესახებ, რაც წინადადებული დიდი ნაბიჯია წინამორბედ 9 ქუბიტური ჩიპთან შედარებით [39]. ახალ კომპიუტერს მეტსახელად Bristlcone (“ჯაგარა გირჩა”) უწოდეს ქუბიტების სპეციფიკური განლაგების გამო. ახალ მოწყობილობაში გამოიყენეს კავშირების, მართვის, მონაცემთა წაკითხვის ისეთივე სქემები, როგორც 9 ქუბიტური ჩიპში იყო. მაგრამ განსხვავებით ქუბიტების ადრინდელი წრფივი განლაგებისა, ახალში ქუბიტები ქმნიან ორგანოზომილებიან სტრუქტურას. შენარჩუნებულია შეცდომების ისეთივე დონე, რომელიც ძველ ჩიპს გააჩნდა. კერძოდ, 0.1% ერთ-ქუბიტური ლოგიკური ელემენტისთვის, 0.6% ორ-ქუბიტური ელემენტისთვის და 1% მონაცემთა წაკითხვისთვის. მიღებული შედეგები მკვლევარებს ოპტიმისტურად განაწყობენ უფრო მსხვილმასშტაბიანი კომპიუტერის აგებისათვის.

III.7 D-ტალის სისტემა

კვანტური კომპიუტინგის კომპანია D-Wave Systems Inc. დაარსდა 1999 წელს კანადაში (დამაარსებლები - ჯორდი როუზი და ჰეიგ ფარისი). ამ სისტემის კომპიუტერები ვიწრო დანიშნულებისაა და ძირითადად გამოიყენება ოპტიმიზაციური პრობლემების ამოსახსნელად, მანქანური სწავლებისა და ფინანსური სიმულაციებისთვის. ესაა კვანტური კომპიუტინგის პირველი კომპანია, რომელმაც თავისი პროდუქტი კომერციული მიზნით გამოიყენა. D-ტალის სისტემის კომპიუტერით სარგებლობენ ლოს ალამოსის ნაციონალური ლაბორატორია, გუგლი, ლოკჰიდ-მარტინი, NASA.

D-ტალის სისტემის კომპიუტერის სამშენებლო ბლოკია ქუბიტი, რომელიც ძლიერ მცირე ზომის ზეგამტარ წრედს წარმოადგენს „ზევით“ ან „ქვევით“ მიმართული მაგნიტური ველით. ქუბიტის ეს მდგომარეობები აღინიშნება +1-ით და -1-ით. გამოთვლების საწარმოებლად გამოიყენება ე.წ. კვანტური გამოწვის პროცესი. კვანტური გამოწვა ზოგადი სახელია კვანტური სტოქასტური ოპტიმიზაციის ალგორითმისა. იგი ეფუძნება კვანტური ადიაბატური ევოლუციის პროცესს. მესერში გაერიანებული ქუბიტების მაგნიტური ველები ზემოქმედებენ ერთმანეთზე. ქუბიტებისთვის საწყისი მნიშვნელობების მინიჭების შემდეგ კვანტურმექანიკური ფლუქტუაციების შედეგად ისინი იცვლიან ორიენტაციას ისე, რომ ჯამური ენერჯის რაოდენობამ მიაღწიოს მინიმალურ მნიშვნელობას. ქუბიტების საბოლოო მდგომარეობების წაკითხვით მივიღებთ ოპტიმიზაციური ამოცანის ამონახსნს ([40], [41]).

კომპიუტერი მოთავსებულია რადიოსიხშირის გარე ელექტრომაგნიტური ველებისაგან დამცავ კოლოფში, მუშაობს 15 მილიკელვინ ტემპერატურაზე. მაცივრის როლში გამოიყენება თხევადი ჰელიუმი. პროცესორი იმყოფება მაღალ

ვაკუუმში. ინფორმაციის გაცვლა წარმოებს ციფრული ოპტიკური არხის საშუალებით.

D-ტალღური სისტემის ქუბიტები და მათ შორის კავშირები აღიწერება ე.წ. ქიმერა გრაფის გამოყენებით. $G(V,E)$ გრაფი ქიმერა გრაფს წარმოადგენს, თუ იგი გაიშვიათებულია (ხალვათია), ე.ი. $|E| \ll |V|^2$; ამასთან, წიბოები ქმნიან კარგად ორგანიზებულ სტრუქტურას ([42]). 2017 წელს კომპანიამ განაცხადა 2000 ქუბიტის ახალი კომპიუტერის D-Wave Q 2000 შექმნის შესახებ.

მეცნიერთა ნაწილს ჯერ კიდევ საექვოდ მიაჩნია, არის თუ არა D-ტალღის სისტემის მოწყობილობა ნადვილად კვანტური კომპიუტერი - აკმაყოფილებს თუ არა იგი ე.წ. კვანტური უპირატესობის (quantum supremacy) პირობას. ამ პირობის თანახმად კვანტური კომპიუტინგის მოწყობილობას უნდ შეეძლოს ისეთი პრობლემების გადაჭრა, რომლებსაც კლასიკური კომპიუტერი პრაქტიკულად ვერ გაუმკლავდება. ამ კონცეპტის შემოღება და მისი პოპულარიზაცია დაკავშირებულია იური მანინის, რიჩარდ ფეინმანის, ჯონ პრესკილის სახელებთან.

IV. კვანტური კომპიუტინგის მომავალი

კვანტური კომპიუტინგი მძლავრი ტექნოლოგიაა, რომელსაც საზოგადოებისთვის დიდი სარგებლის მოტანა შეუძლია. მეცნიერები მოელიან, რომ კვანტური კომუნიკაცია საფუძვლიანად შეცვლის კაცობრიობის განვითარებას ორ-სამ ათწლეულში; ჩანს კომუნიკაციის ახალი საშუალებების გამოყენების უზარმაზარი პერსპექტივა ისეთ დარგებში, როგორცაა მაგალითად არასანქცირებული შეღწევებისაგან დაცული გლობალური ქსელის შექმნა, თავდაცვა და ფინანსები.

კვანტური თანამგზავრის წარმატებული მისია საშუალებას აძლევს ჩინეთს შექმნას ეროვნული კვანტური ქსელი სამხედრო კომუნიკაციისა და ფინანსური საქმიანობისათვის. კვანტური საკომუნიკაციო სისტემა დაცულია ფარული მიყურადებისაგან, რადგან ფარული მოსმენის ნებისმიერი მცდელობა ცვლის დახლართულ კვანტურ მდგომარეობას და მყისიერად ხდება ცნობილი მომხმარებლებისთვის.

ქალაქ ჰეფეიში 37 ჰექტარ ფართობზე ჩინეთი აგებს 10 მილიარდი აშშ დოლარის ღირებულების კვანტური კვლევების ცენტრს. კვანტური ინფორმატიკის ნაციონალური ცენტრის გახსნა 2020 წლისთვის იგეგმება. მისი ძირითადი მიზნებია კვანტური მეტროლოგია, კვანტური კომპიუტერის აგება და სხვა ინოვაციები.

კვანტური მეტროლოგიის განვითარება ნიშნავს ჩვენი გარემოცვის ფიზიკური პარამეტრების უმნიშვნელო ცვლილებების გაზომვას. ეს ზედმიწევნით ზუსტი, დამოუკიდებელი ნავიგაციური სისტემების აგების საშუალებას იძლევა, რაც არსებითია ავტონომური სატრანსპორტო საშუალებების თუ წყალქვეშა ნავებისათვის. მოიხსნება დამოკიდებულება მათი ლოკაციის დადგენისათვის საჭირო გარეგან სანავიგაციო სიგნალებზე.

ამერიკის ერთერთმა უმსხვილესმა ბანკმა (JPMorgan chase) შექმნა ინჟინრებისა და მათემატიკოსების ჯგუფი, რომელიც შეისწავლის ფინანსური რისკების წინასწარმეტყველებასა და კომერციაში კვანტური კომპიუტერის გამოყენების საკითხებს.

დაიმლერი დაინტერესებულია კვანტური კომპიუტერების გამოყენებით

ტრანსპორტირების გაუმჯობესებაში, აგრეთვე ელექტრული ბატარეების ქიმიური სტრუქტურებისა და რეაქციების სიმულაციით. კვლევა მიზნად ისახავს ელექტრომობილების ხარისხის გაუმჯობესებას, იშვიათ მეტალ კობალტზე დამოკიდებულების შემცირებას (კობალტის გამოყენება დაკავშირებულია გარკვეულ პრობლემებთან).

ბაზრის მკვლევარები აცხადებენ, რომ კვანტური ტექნოლოგიებით მომსახურებამ 2017 წელს 2.7 მილიარდი დოლარის მოგება მოიტანა. იგეგმება, რომ 2025 წლისთვის მან 23 მილიარდს უნდა გადააჭარბოს.

ლიტერატურა

1. Birkhoff G., von Neumann J. "The Logic of Quantum Mechanics", *Annals of Mathematics*, 2nd Ser. 1936, 37(4): 823-843.
2. Mackey G., *Mathematical foundations of quantum theory*. New York: Benjamin, 1957.
3. Day A., "Splitting algebras and weak notion of projectivity", *Algebra Universalis*, 1975, 5 153-162.
4. Hermann C., "Alan Day's work on modular and Arguesian lattices", *Algebra Universalis*, 1995, 34, 35-60.
5. Megil N., Pavičić M., "Kochen-Specker Sets and Generalized Orthoarguesian Equations", *Annales Henri Poincare*, 2011, 12, 1417-1429.
6. Kleene S. C., *Introduction to Metamathematics*. Amsterdam: North-Holland, 1952, Ishi Press, 2009.
7. Dunn J. M., Moss L. S., Wang Z., "Editors' Introduction: The Third Life of Quantum Logic: Quantum Logic Inspired by Quantum Computing", *Journal of Philosophical Logic*, 2013, 42, 443-459.
8. Pavičić M., "Bibliography on quantum logics and related structures", *International Journal of Theoretical Physics*, 1992, 31(3), 373-455.
9. Dalla Chiara M., Guintini R., Greechie R., *Reasoning in Quantum Theory: Sharp and Unsharp Quantum Logics*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.
10. Engesser K., Gabbay D. M., Lehman D. (eds), *Handbook of Quantum Logic and Quantum Structures: Quantum Structures*, Elsevier Science, 2007.
11. Engesser K., Gabbay D. M., Lehman D. (eds), *Handbook of Quantum Logic and Quantum Structures: Quantum Logic*, Elsevier Science, 2008.
12. Benioff P., "The computer as a physical system", *Journal of Statistical Physics*, 1980, 22, 563-591.
13. Feynmann R., "Simulating physics with computers". *International Journal of Theoretical Physics*, 1982, 21, 467-488.
14. Deutsch D. "Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer", *Proceedings of the Royal Society A 400*, 1985, 97-117.
15. Shor P. W., "Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring", *Proc of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. IEEE Computer Society Press*, 1994. pp 20-22.
16. Bengtsson I., Życzkowski K., *Geometry of quantum states. An introduction to quantum entanglement*, 2017, Cambridge, Cambridge University Press, 2nd ed.
17. DiVincenzo D. P., "The Physical Implementation of Quantum Computation", *Fortschritte der Physik*, 2000, vol. 48, Issue 9-11, 771-783.
18. Awschalom D. D., Basset L. C., Dzurak A. S., Hu E. L., Petta J. R., "Quantum spintronics: engineering and manipulating atom-like spins in semiconductors", *Science*, 2013, Mar 8, 339(6124), 1174-9.

19. Praver S., Aharonovich P. (eds), *Quantum Information Processing with Diamond Principles and Applications*. Elsevier Science, 2014.
20. Sukachev D. D., Sipahigil A., Nguen C. T., Bhaskar M.K., Evans R. E., Jelezko F., Lukin M. D., “Silicon-Vacancy Spin Qubit in Diamond: A Quantum Memory Exceeding 10 ms with Single-Shot State Readout”. *Physical Review Letters*, 2017, 119, 223602.
21. Lemonde M.-A., Meesala S., Sipahigil A., Schuetz M. J. A., Lukin M. D., Loncar M., Rabi P., “Phonon networks with SiV centers in diamond waveguides”, 2018. *arXiv:1801.01904v1[quant-ph]*.
22. Josephson B. D., “Possible new effects in superconductive tunneling”, *Physics Letters*, 1962, 1(7), 251-253.
23. Fujita S., Ito K., Godoy S., *Quantum Theory of Conducting Matter – Superconductivity*. Springer, 2009.
24. Mangin P., Kahn R., *Superconductivity An Introduction*. Springer, 2017.
25. Nielsen M. A., Chuang I.L., *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge, Cambridge University Press. 10th Anniversary ed., 2010.
26. Schäfer V. M., Balance C. J., Thirumalai K., Stephenson L. J., Balance T. G., Steane A. M., Lucas D. M., “Fast quantum logic gates with trapped-ion qubits”. *Nature*, 2018, 555, 75-78.
27. Pagano G. *at al.*, “Cryogenic Trapped-Ion System for Large Scale Quantum Simulation”, 2018, *arXiv: 1802.03118v1[quant-ph]*.
28. Milburn G. J., “Photons as qubits”, *Physica Scripta*, 2009, T137.
29. Farrera P., Heinze G., de Riedmatten H. “Entanglement between a Photonic Time-Bin Qubit and Collective Atomic Spin Excitation”, *Physical Review Letters*, 2018, 120.
30. Puri S., Boutin S., Blais A., “Engineering the quantum states of light in a Kerr-nonlinear resonator by two-photon driving”, *npj Quantum Information*, 2017, 3, Article number 18.
31. Gao W. B. *at al.*, “Experimental demonstration of a hyper-entangled ten-qubit Schrödinger cat state”, *Nature Physics*, 2010, 6(5): 331-335.
32. Mirrahimi M., “Cat-qubits for Quantum computation”, *Elsevier Masson*, 2016, 17(7), pp. 778-787.
33. Samkharadze N. *et al.*, “Strong spi-photon coupling in silicon”, *Science*, 2018, 10.1126/science.aar4054.
34. Zhang J. *at al.*, “Observation of many-body dynamical phase transition with a 53-qubit quantum simulator”, *Nature*, 2017, 551, 601-604.
35. Bernien H. *at al.*, “Probing many-body dynamics on a 51-atom quantum simulator”, *Nature*, 2017, 551, 579-584.
36. Popkin G., “Spooky action achieved at record distance”, *Science*, 2017, vol 356, Issue 6343, pp.1110-1111.
37. Liao S.-K. *at al.* “Satellite-relayed intercontinental quantum network”, *Physical Review Letters*, 2018, 120, 030501.
38. Tosi G. *at al.*, “Silicon quantum processor with robust long-distance qubit couplings”, *Nature Communications*, 2017, 8, Article number: 450.
39. Kelli J., “A Preview of Bristlecone, Google’s New Quantum Processor”, *Google Research Blog*, 2018, 5 March.
40. Rieffel E. G. *at al.*, “A case study in programming a quantum annealer for hard operational planning problems”, 2014, *arXiv:1407.2887v1[quant-ph]*.
41. Bunyk P. I. *at al.*, “Architectural considerations in the design of a superconducting annealing processor”, 2014, *arXiv:1401.5504v1[quant-ph]*.
42. Ushijima-Mwesigwa H., Negre C. F. A., Mniszewsky S. M., “Graph Partitioning using Quantum Annealing on the D-Wave System”, 2017, *arXiv:1705.03082v1[quant-ph]*.

სტატია მიღებულია: 2018-05-04