

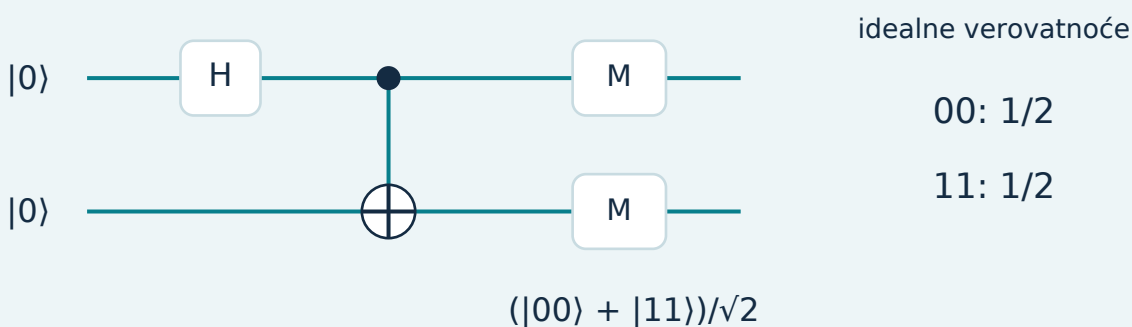
Kvantna tehnologija

Od fizičkih principa do procesora, mreža i senzora

Edukativno master izdanje

26.09.2026 | v1.0 | SR

Originalni, sistematični vodič za radoznale čitaoce, učenike, studente i tehnološke timove. Ovo je široka edukativna sinteza, a ne iscrpan popis svakog eksperimenta niti uputstvo za izgradnju laboratorije. Matematika se uvodi tamo gde objašnjava mehanizam. Nacrti su konceptualni i nisu u razmeri. Stanje istraživanja provereno je 26. septembra 2026; datumi pojedinačnih dokaza navedeni su u izvorima.



Sadržaj

01 Mapa kvantnih tehnologija	3
02 Vek ideja i eksperimenata	3
03 Stanja, amplitude i merenje	4
04 Superpozicija nije zbir gotovih odgovora	4
05 Sprezanje, korelacije i zabrana kloniranja	5
06 Kapije, kola i prvi eksperiment	5
07 Algoritmi i uslovi za ubrzanje	6
08 Kako hardver kodira kubit	6
09 Procesor je samo deo mašine	7
10 Kontrolna elektronika, optika i kriogenika	7
11 Šum i korekcija grešaka	8
12 Logički kubiti i otpornost na greške	8
13 Softverski slojevi	9
14 Benchmarkovi koji odgovaraju na prava pitanja	9
15 Komunikacije i kvantni internet	10
16 Senzori i precizna merenja	10
17 Postkvantna kriptografija i QKD	11
18 Dokazi na datum pregleda 2026.	11
19 Budući pravci: uslovni, ne neizbežni	12
20 Put učenja i zadaci	12
21 Odgovorno korišćenje biblioteke	13

[Bibliografija i dalje čitanje / 14+](#)

01 Mapa kvantnih tehnologija

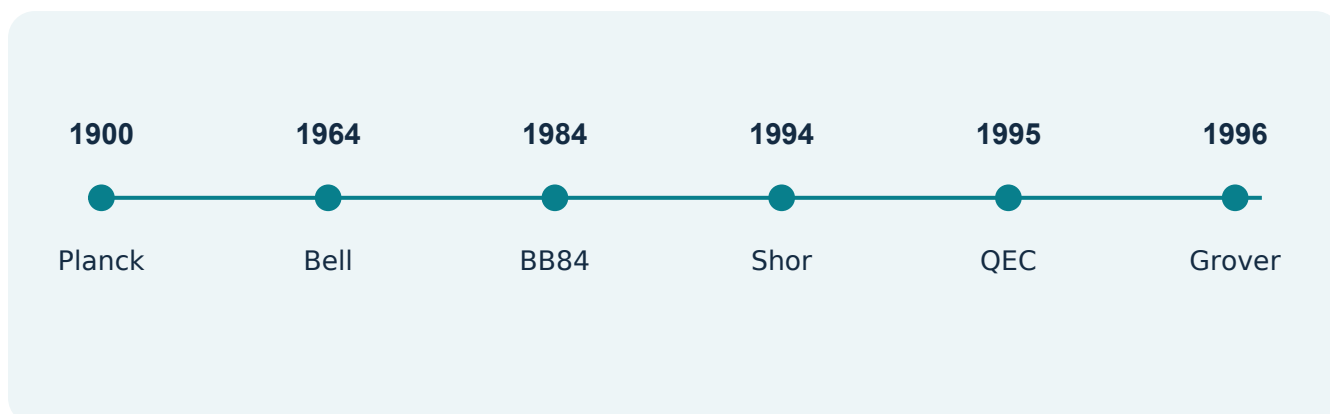
Kvantna tehnologija koristi kontrolisane fizičke sisteme čije ponašanje zahteva kvantnu mehaniku. Računarstvo obrađuje informacije; komunikacije prenose kvantna stanja ili uspostavljaju ključeve; senzori mere fizičke veličine. Laseri, tranzistori i magnetna rezonanca već počivaju na kvantnoj fizici. Noviji pristupi koriste pojedinačne kvantne sisteme, koherenciju, a ponekad i sprežanje kao projektovane resurse.

Kvantni računar obično je akcelerator povezan sa klasičnim računarima. Ne zamenjuje svaki procesor i nije brži za svaki zadatak. Korisna prednost znači bolje rešenje uz prihvatljiv ukupni trošak, uključujući pripremu, kontrolu, ponavljanja i proveru. Ne postoji eksperimentalno potvrđena tehnologija jednostavno rangirana iznad svih kvantnih tehnologija. Različite arhitekture rešavaju različite probleme. [R1, R2]

02 Vek ideja i eksperimenata

Plank je 1900. uveo kvantovanje energije; Ajnštajn je 1905. povezao svetlosne kvante sa fotoelektričnim efektom. Matrična i talasna mehanika nastale su 1925-1926. EPR argument iz 1935. i Belova teorema iz 1964. razjasnili su značaj korelacija koje lokalni klasični modeli ne mogu reprodukovati pod odgovarajućim pretpostavkama.

Tokom osamdesetih Fajman je obrazložio kvantnu simulaciju, a Dojč formalizovao univerzalno kvantno računanje. BB84 je 1984. predložio kvantnu distribuciju ključa. Šorov algoritam iz 1994. i Groverov iz 1996. pokazali su važne računske mogućnosti; kvantna korekcija grešaka pojavila se 1995. Kasnije prekretnice uključuju kontrolisane kapije, procesore dostupne preko oblaka, naprednije simulatore i demonstracije logičkih kubita. To su različita dostignuća, a ne dokaz da je svaka korisna primena već praktična. [R1, R2, R10]



Originalni edukativni dijagram 01. Izabrane istorijske prekretnice; datumi označavaju ideje, ne spremnost proizvoda.

03 Stanja, amplitude i merenje

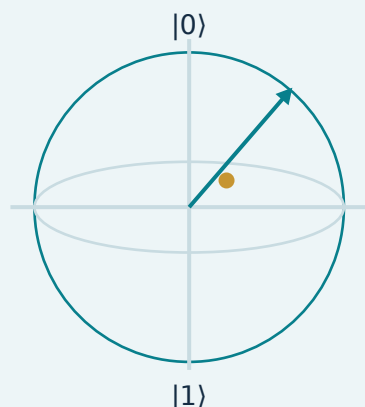
Kubit je kontrolisani kvantni sistem sa dva nivoa. U izabranoj bazi njegovo čisto stanje je $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, gde su amplitude kompleksne i važi $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Merenje u toj bazi daje 0 ili 1 sa odgovarajućim kvadratima modula kao verovatnoćama. Jedno merenje ne otkriva obe amplitude; procena stanja zahteva mnogo identično pripremljenih uzoraka i više postavki merenja.

Relativna faza menja interferenciju. Globalna faza ne menja predviđanja merenja. Koherentna evolucija izolovanog sistema je unitarna; Hamiltonijan opisuje njegovu energiju i dinamiku. Mešana stanja opisuju neizvesnost ili sprežanje sa neopaženom okolinom i zahtevaju matricu gustine. Blohova sfera prikazuje čista stanja jednog kubita na površini, a mešana unutar sfere; nije slika putanje elektrona. [R10, R11]

04 Superpozicija nije zbir gotovih odgovora

Stanja $|+\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ i $|-\rangle = (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$ daju jednake verovatnoće 0/1 u računarskoj bazi. Hadamardova kapija H pre merenja ih razlikuje: $H|+\rangle = |0\rangle$ i $H|-\rangle = |1\rangle$. Interferencija tako pretvara informaciju o fazi u uočljive razlike verovatnoća.

Čisto stanje n kubita ima 2^n amplituda, ali očitavanje ne daje 2^n klasičnih odgovora. Algoritam mora podesiti interferenciju tako da korisni ishodi budu verovatni. Ni ogroman prostor stanja sam po sebi ne dokazuje ubrzanje: neka velika kvantna kola mogu se efikasno klasično simulirati. Glavni inženjerski izazov jeste očuvanje potrebne interferencije uz suzbijanje neželjenih interakcija. [R2, R10]



čisto stanje

mešana stanja

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

Originalni edukativni dijagram 02. Blohova sfera: geometrijski prikaz jednog kubita, ne orbita elektrona.

05 Sprezanje, korelacije i zabrana kloniranja

Podimo od $|00\rangle$, primenimo H na prvi kubit, zatim kontrolisani NOT sa prvim kubitom kao kontrolom. Dobijamo Belovo stanje $(|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$. Idealni ishodi u računarskoj bazi su 00 i 11 sa jednakom verovatnoćom. Svaki podsistem zasebno izgleda nasumično.

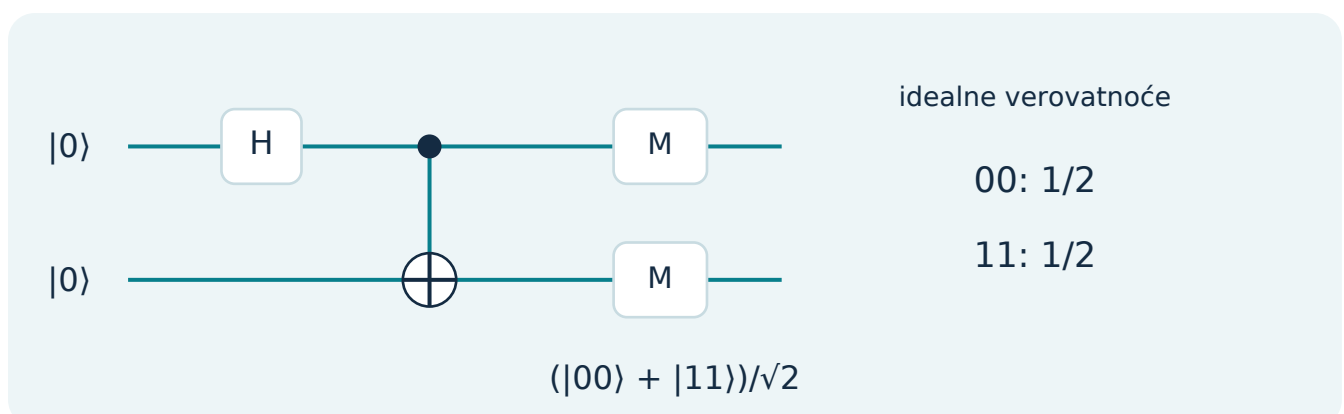
Korelacija u samo jednoj bazi ne potvrđuje sprezanje: klasična mešavina 00 i 11 daje istu raspodelu u toj bazi.

Sprezanje je osobina zajedničkog stanja koje se ne može predstaviti kao mešavina proizvodnih stanja. Odgovarajuća merenja ili svedoci sprezanja razlikuju ga od klasičnih korelacija. Ono ne omogućava slanje kontrolisane poruke brže od svetlosti. Zabrana kloniranja isključuje univerzalni savršeni kopir-aparat za nepoznato kvantno stanje; poznata ortogonalna klasična stanja ipak se mogu kopirati. Teleportacija troši zajedničko sprezanje i zahteva klasičnu komunikaciju. [R3, R10]

06 Kapije, kola i prvi eksperiment

X razmenjuje $|0\rangle$ i $|1\rangle$. Z menja znak amplitude uz $|1\rangle$. H prelazi između računarske i superpozicione baze. Fazne kapije S i T uvode određene relativne faze; kontinuirane rotacije pružaju drugi koristan opis. CNOT okreće ciljni kubit samo kada je kontrola $|1\rangle$ u računarskoj bazi. Univerzalni skup kapija može približiti proizvoljno unitarno računanje do izabrane preciznosti.

Linije kola označavaju kubite, a horizontalni smer redosled operacija, ne fizičku udaljenost. Pripremite $|00\rangle$, primenite H(0), CNOT(0,1), izmerite oba kubita i ponovite 1.000 puta. Idealno se dobija oko 500 ishoda 00 i 500 ishoda 11, uz statističke fluktuacije. Šum dodaje druge ishode. Zabeležite simulator ili uređaj, kolo, redosled bitova, broj ponavljanja i vreme kalibracije. Primer pokazuje pripremu i korelaciju, a ne računsku prednost. [R10, R11]



Originalni edukativni dijagram 03. Kolo Belovog para: idealni ishodi u Z bazi sami ne potvrđuju sprezanje.

07 Algoritmi i uslovi za ubrzanje

Šorov algoritam svodi faktORIZACIJU i diskretne logaritme na kvantne proračune povezane sa periodom, čime ugrožava rasprostranjene šeme javnog ključa na dovoljno sposobnom hardveru otpornom na greške. Groverova pretraga zahteva $O(\sqrt{N})$ poziva orakula za jedan označeni element među N kandidata, naspram $O(N)$ klasičnih upita. Orakul, pristup podacima i korekcija grešaka takođe troše resurse.

Procena faze otkriva informacije o sopstvenim vrednostima kada su dostupne odgovarajuće kontrolisane evolucije i ulazna stanja. Kvantna simulacija cilja dinamiku molekula i materijala. VQE i QAOA kombinuju parametrizovana kola sa klasičnom optimizacijom, ali opšta praktična nadmoć nije dokazana. Predlozi za linearne sisteme i mašinsko učenje često pretpostavljaju efikasan unos podataka, povoljnu uslovljenost ili ograničene izlaze. Porediti treba celovite tokove rada sa jakim klasičnim metodama. [R2, R1]

08 Kako hardver kodira kubit

Superprovodna kola koriste nelinearne električne oscilatore, često transmone, mikrotalasnu kontrolu i hlađenje do milikelvina. Zarobljeni joni koriste unutrašnja atomska stanja, elektromagnetne zamke i optičke ili mikrotalasne kapije. Neutralni atomi raspoređuju se optičkim pincetama ili rešetkama; Ridbergove interakcije mogu stvoriti sprežanje.

Poluprovodnički spinski kubiti koriste spin elektrona ili jezgra i obećavaju gustu proizvodnju, dok ujednačena kontrola i povezivanje ostaju izazovi. Fotonske platforme kodiraju informacije u svetlosti, na primer u modovima ili polarizaciji; važni su gubici, izvori, detekcija i operacije sprežanja. Centri boje spajaju spinove u čvrstom telu sa optičkim interfejsima. Topološki pristupi traže zaštićena kodiranja, ali tvrdnje zahtevaju nezavisnu proveru i skalabilne kapije. Sam broj kubita ne može rangirati platforme. [R3, R8, R21]



Originalni edukativni dijagram 04. Šest fizičkih pristupa; polja predstavljaju kategorije, ne rang-listu performansi.

09 Procesor je samo deo mašine

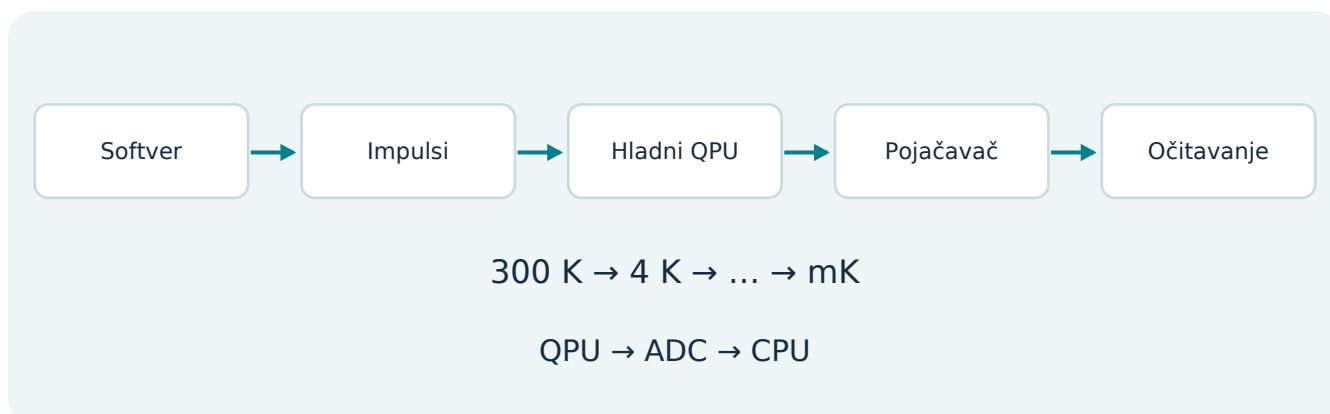
Funkcionalni sistem zahteva pripremu, adresiranje, interakcije sprezanja, očitavanje, resetovanje i kalibraciju. Povezanost određuje koji kubiti mogu neposredno međusobno delovati. Rutiranje može dodati SWAP operacije i povećati vreme i grešku. Curenje izmešta sistem iz zamišljenog dvo-nivojskog potprostora; preslušavanje omogućava da kontrola jednog kubita poremeti drugi.

Prinos proizvodnje, pakovanje, optičko poravnanje, vakuum i ožičenje mogu biti jednako važni kao rekordna vernost kapije. Modularnim procesorima potrebne su brze, pouzdane veze i protokoli koji računaju na neuspešne pokušaje sprezanja. Analogna simulacija i kvantno žarenje koriste druge modele kontrole od univerzalnih kola, pa njihove brojeve kubita i rezultate ne treba neposredno izjednačavati. [R1, R3, R8]

10 Kontrolna elektronika, optika i kriogenika

Kod superprovodnog procesora klasični softver zahteva impulse; generatori talasnih oblika i mikrotalasne komponente ih oblikuju; filtrirane i oslabljene linije ih dovode do hladnog čipa. Signali očitavanja vraćaju se kroz pojačavanje i digitalizaciju. Dekoder ili povratni kontroler može morati da reaguje unutar vremenskih zahteva korekcije grešaka.

Dilucionni kriostat obezbeđuje niz temperaturnih stepeni; rad na milikelvinima nije apsolutna nula. Više vodova donosi toplotu, šum i ograničenja pakovanja. Kriogeni CMOS i multipleksiranje nastoje da smanje taj teret, ali disipacija i vernost moraju se meriti. Jonski i neutralno-atomski sistemi snažno zavise od lasera, vakuuma i optike, a ne od istih zahteva hlađenja. Nekim fotonским detektorima ipak treba kriogenika. Nacrti objašnjavaju funkcije, nisu specifikacije za izgradnju. [R8, R3, R21]



Originalni edukativni dijagram 05. Funkcionalni lanac superprovodne kontrole; povratni signal se pojačava i digitalizuje.

11 Šum i korekcija grešaka

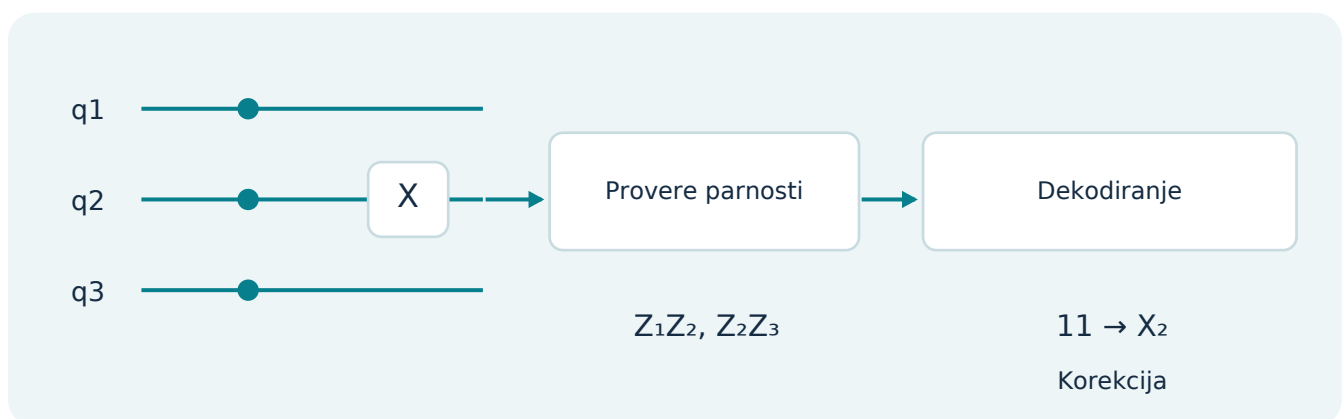
Relaksacija, često opisana vremenom T_1 , menja populacije pobuđenih stanja; defaziranje smanjuje faznu koherenciju, opisanu vremenom T_2 . Greške kapija i merenja, gubici i korelisani poremećaji deluju različito. Ublažavanje grešaka procenjuje manje pristrasne rezultate dodatnim uzorkovanjem ili modelovanjem; uglavnom ne obezbeđuje skalabilnu otpornost na greške.

Kvantna korekcija kodira logičku informaciju u više fizičkih stepeni slobode i meri sindrome bez neposrednog očitavanja logičkih amplituda. Repeticioni kod sa tri kubita mapira $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ u $\alpha|000\rangle + \beta|111\rangle$ i ispravlja jedan obrt bita pod pretpostavljenim modelom greške; ne ispravlja proizvoljne fazne greške. Za potpunu zaštitu potrebni su složeniji kodovi. I merenja sindroma greše, pa se uglavnom ponavljaju. [R4, R12]

12 Logički kubiti i otpornost na greške

Površinski kod koristi lokalne provere parnosti na rešetki. Rastojanje koda određuje najmanju neotkrivenu logičku grešku, a veće rastojanje zahteva više fizičkih kubita. Ispod odgovarajućeg praga šuma logička greška može opadati sa rastom koda. Prag zavisi od modela šuma, kola i dekodera; nije univerzalna specifikacija hardvera.

Otpornost na greške zahteva i pouzdane logičke kapije, pripremu, merenja i dekodiranje u realnom vremenu. Neke ne-Klifordove operacije zahtevaju skupe pomoćne resurse, poput destilovanih magičnih stanja. Bozonski i kvantni LDPC kodovi istražuju druge kompromise. Demonstracija zaštićene memorije ne dokazuje kompletan koristan računar otporan na greške. Procene resursa moraju navesti algoritam, ciljnu verovatnoću neuspeha, fizički šum, trajanje ciklusa, kod i povezanost. [R4, R13]



Originalni edukativni dijagram 06. Kod sa tri kubita za obrt bita: sindromi parnosti otkrivaju jedan obrt; fazne greške ostaju.

13 Softverski slojevi

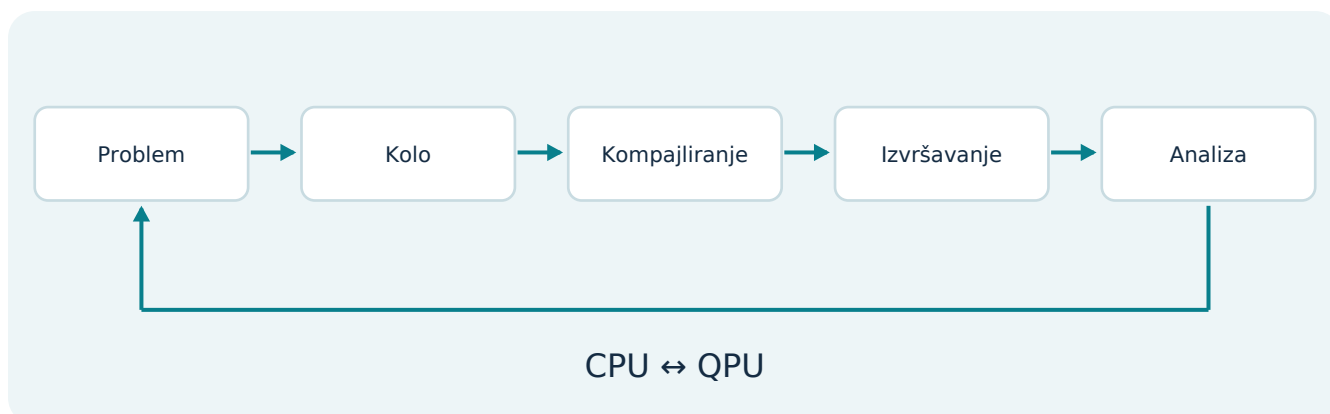
Tipičan rad počinje modelom problema i klasičnim referentnim rešenjem. Algoritam postaje kolo ili drugi međuzapis. Kompajler razlaže operacije na izvorne kapije, bira fizičke kubite i rutira interakcije. Raspoređivanje i kontrola impulsa povezuju program sa uređajem. Uzorci merenja vraćaju se klasičnoj obradi, a hibridne metode ponavljaju petlju.

Qiskit, Cirq i PennyLane podržavaju delove ovog procesa; OpenQASM je jezik za opis kvantnih programa. Interfejsi se menjaju, pa izvršivi primeri treba da navedu verzije i aktuelnu dokumentaciju. Simulator može modelovati idealna stanja, kanale sa šumom ili posebne strukture kola. Trošak klasične simulacije zavisi od strukture, ne samo broja kubita. Za ponovljivost sačuvajte kod, početne vrednosti generatora slučajnosti, odluke kompajlera, kalibracije i sirove ishode. [R14, R15]

14 Benchmarkovi koji odgovaraju na prava pitanja

Fizičke i logičke kubite prikazujte odvojeno. Korisne metrike uključuju greške kapija i očitavanja, koherenciju, povezanost, dubinu kola, propusnost, logičku grešku po ciklusu i ukupno vreme do željene preciznosti. Nasumično benchmarkovanje procenjuje grešku pod pretpostavkama; unakrsna entropija i testovi primena odgovaraju na druga pitanja. Jedan skor skriva kompromise.

Verodostojna tvrdnja o prednosti definiše zadatak i tačnost, uključuje pripremu, ponavljanja i klasičnu obradu i poredi se sa najboljim relevantnim klasičnim metodama. Rezultate treba proveriti ili statistički validirati odgovarajućim postupkom. Razlikujte eksperiment težak za simulaciju od ekonomski korisne primene. Planovi proizvođača su prognoze. Laboratorijski rekord iz jedne kalibracije nije automatski trajna proizvodna sposobnost. [R1, R16, R20]



Originalni edukativni dijagram 07. Softverski tok: merenja se vraćaju klasičnoj analizi i mogu pokrenuti novi prolaz.

15 Komunikacije i kvantni internet

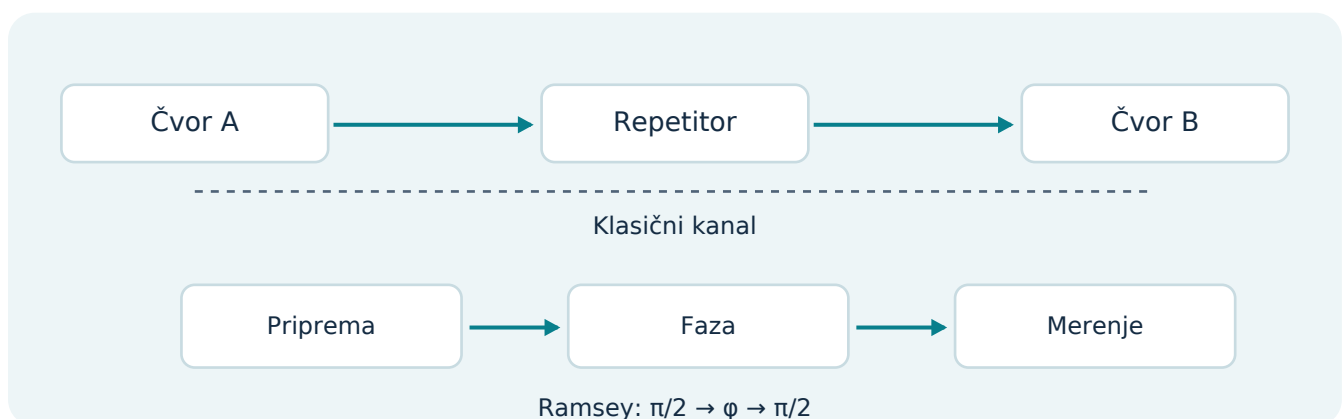
Fotoni prenose kvantna stanja kroz optičko vlakno ili slobodan prostor. Gubici rastu sa rastojanjem, a nepoznato stanje ne može se pojačati običnim kopiranjem. Kvantni repetitori nastoje da povežu stvaranje sprežanja, memorije i zamenu sprežanja, ponekad prečišćavanje ili korekciju grešaka, kako bi produžili korisne veze.

Teleportacija prenosi kvantno stanje pomoću zajedničkog spregnutog para i dva klasična bita u standardnom kubitnom protokolu; ne prenosi materiju niti zaobilazi brzinu svetlosti. Mreže mogu povezivati procesore, distribuirati ključeve ili unaprediti zajedničko merenje. Pokazane veze i male mreže jesu važne, ali univerzalan, skalabilan kvantni internet ostaje razvojni cilj. Mreže ključeva sa pouzdanim čvorovima i repetitorske mreže sprežanja imaju različitu bezbednost i funkcije. [R3]

16 Senzori i precizna merenja

Kvantni senzori pretvaraju polje, ubrzanje ili frekvenciju u promene kontrolisanog kvantnog stanja. U Remzijevoj sekvenci prvi impuls stvara koherenciju, slobodna evolucija akumulira fazu zavisnu od signala, a drugi impuls prevodi fazu u merljivu populaciju. Atomi časaovnici, atomski interferometri i spinski magnetometri koriste povezane ideje.

Za nezavisne idealne sonde statistička neizvesnost obično opada kao $1/\sqrt{N}$. Spregnuti resursi pod odgovarajućim uslovima mogu dati bolje skaliranje, ali šum, gubici, priprema i očitavanje mogu ukloniti korist. Zajedno procenjujte osetljivost, propusni opseg, prostornu rezoluciju, drift i radno okruženje. Neke senzorske tehnologije su zrele; mnoge biomedicinske ili distribuirane primene još su istraživački projekti i nisu potvrđeni dijagnostički uređaji. [R5, R17]



Originalni edukativni dijagram 08. Kvantne veze zahtevaju klasičnu koordinaciju. Remzijevo merenje pretvara fazu u signal.

17 Postkvantna kriptografija i QKD

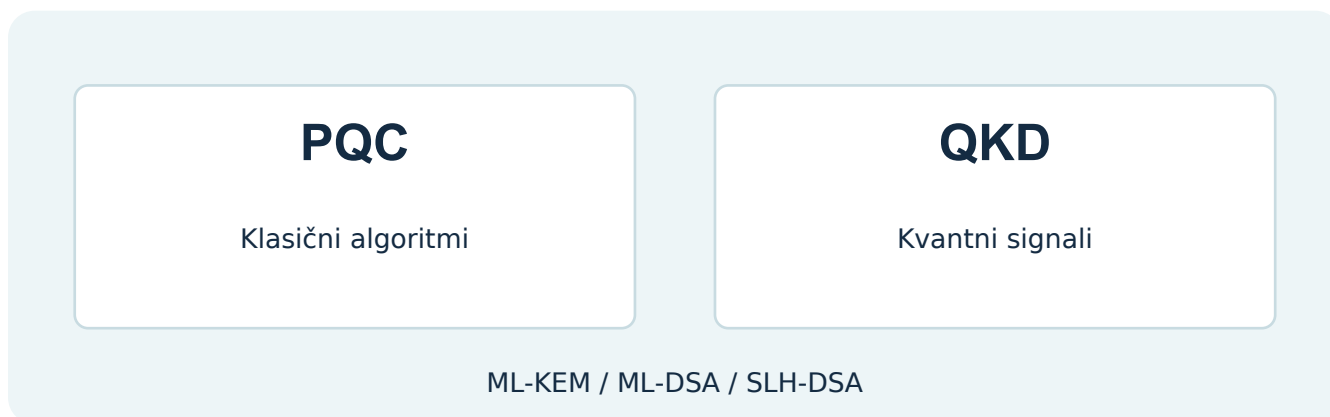
Postkvantna kriptografija (PQC) koristi klasične algoritme projektovane da odole poznatim klasičnim i kvantnim napadima. Radi na klasičnoj infrastrukturi. NIST standard FIPS 203 iz 2024. definiše ML-KEM za uspostavljanje ključa; FIPS 204 i 205 definišu digitalne potpise ML-DSA i SLH-DSA. To su različite funkcije, a ne tri zamenjive metode šifrovanja.

Kvantna distribucija ključa (QKD) koristi kvantne signale i autentifikovani klasični kanal, uz izričite pretpostavke bezbednosti. Sama ne potvrđuje identitet, ne štiti kompromitovane krajnje uređaje i ne uklanja implementacione napade. PQC migracija zahteva popis kriptografije, proveru kompatibilnosti protokola i održavane implementacije; ovaj vodič nije specifikacija za primenu. Dugotrajne tajne motivišu pažnju na rizik „prikupi sada, dešifruj kasnije”. Pre implementacije proverite aktuelne standarde, ispravke i smernice. [R6, R7, R9, R18]

18 Dokazi na datum pregleda 2026.

Objavljeni eksperimenti potvrđuju kontrolisane procesore, kvantne komunikacione veze i napredak u smanjenju logičkih grešaka. Google-ov rad o površinskom kodu, prvo objavljen onlajn decembra 2024, a u časopisu Nature 2025, pokazuje rad ispod praga u određenom eksperimentalnom okruženju. Ne demonstrira proizvoljne velike primene otporne na greške. Studija spinske kontrole milikelvinskim CMOS čipom iz 2025. rešava konkretno ograničenje integracije. [R13, R8]

DARPA Quantum Benchmarking Initiative ispituje da li je industrijski korisno kvantno računanje ostvarivo do 2033; datum je programski cilj, a ne garantovani rok. Nijedna rang-lista ne obuhvata sve platforme i primene. Izdanje koristi izabrane proverene prekretnice, ne iscrpnu tabelu rekorda; tvrdnje o performansama čitajte uz datum objave, pretpostavke i benchmark. [R16]



Originalni edukativni dijagram 09. PQC koristi klasični hardver; QKD zahteva kvantne signale i autentifikovanu klasičnu komunikaciju.

19 Budući pravci: uslovni, ne neizbežni

Vodeći pravci uključuju pouzdanije logičke operacije, ekonomičnije kodove, bolje dekodere, modularne veze, napredniju proizvodnju i integrisanu kontrolu. Heterogeni sistemi mogli bi dodeliti memoriju, računanje i komunikaciju različitim fizičkim platformama. DARPA HARQ istražuje ovu integraciju; program ne dokazuje da će heterogene mašine univerzalno nadmašiti druge arhitekture. [R19]

Kvantno mašinsko učenje, neuromorfni predlozi, topološka kodiranja i distribuirani senzori aktivne su oblasti sa različitim nivoima dokaza. Tvrdnje o univerzalnom eksponencijalnom ubrzanju, neograničenim paralelnim odgovorima ili tehnologiji iznad kvantne fizike nisu potkrepljene. Koristan plan definiše proverljivu prekretnicu: logičku tačnost, trajanje stabilnog rada, uspešnost veze ili celokupnu korist primene. Prognoze zahtevaju pretpostavke i reviziju kada se dokazi promene. [R1, R2, R16]

20 Put učenja i zadaci

Počnite od vektora, kompleksnih brojeva, verovatnoće i malih kola. Izračunajte H, X i CNOT na papiru, zatim ih ponovite u idealnom simulatoru. Dodajte jednostavan model šuma i uporedite raspodele. Proučite jednu hardversku platformu, zatim izdvajanje sindroma i logičke operacije. Manifest biblioteke vodi od uvodnih izvora ka pregledima i originalnim eksperimentima.

Zadatak 1: Ako su $\alpha = \sqrt{3}/2$ i $\beta = 1/2$, koliko je $P(1)$? Odgovor: $1/4$. Zadatak 2: Zašto ishodi 00/11 sami ne dokazuju sprežanje? Odgovor: klasična mešavina daje isti broj ishoda. Zadatak 3: Za 1.000 nezavisnih ponavljanja uz $p = 1/2$ standardna devijacija broja ishoda je $\sqrt{(1000 \times 1/2 \times 1/2)}$, približno 15,8. Zadatak 4: Ispravlja li repeticioni kod svaku grešku kubita? Odgovor: kod sa tri kubita za obrt bita ne ispravlja opšte fazne greške.



Originalni edukativni dijagram 10. Istraživačke prekretnice su uslovne; strelice nisu obećani rokovi.

21 Odgovorno korišćenje biblioteke

Svaka spoljna stavka navodi autora, temu, originalni izvor, licencu, datum provere i preporuku za objavljivanje. Lokalne PDF kopije uključene su samo kada provereni uslovi dozvoljavaju ovakvu upotrebu. Besplatan pristup bez dozvole za redistribuciju vodi u kategoriju „samo link”. Ne pretpostavlja se da je ograničenje NonCommercial kompatibilno sa sajtom kompanije. Spoljni originali ostaju neizmenjeni i ne predstavljaju se kao publikacije LIGHT BRIDGE GROUP.

Master vodič i konceptualni dijagrami originalni su edukativni materijal kreiran za LIGHT BRIDGE GROUP. Reference potkrepljuju činjenice, ali ne podrazumevaju podršku citiranih institucija. Bibliografski naslovi ostaju na izvornom jeziku radi pouzdanog pronalaženja. Povremeno ponovo proveravajte spoljne linkove i ispravke publikacija, posebno kriptografskih standarda.

01 → 06 → 11 → 17

R10 Introduction to Classical and Quantum Computing, 1st edition, 4th printing

R1 Quantum Computing in the NISQ era and beyond

R2 Quantum algorithms: an overview

R4 A Short Introduction to Quantum Error Correction

R3 Quantum networks with neutral atom processing nodes

R5 Quantum sensing

R21 A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits

R6 FIPS 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard

Bibliografija i dalje čitanje

R1 John Preskill / Caltech (2018). Quantum Computing in the NISQ era and beyond.

<https://quantum-journal.org/papers/q-2018-08-06-79/>

R2 Ashley Montanaro / University of Bristol (2016). Quantum algorithms: an overview.

<https://www.nature.com/articles/npjqi201523>

R3 Jacob P. Covey; Harald Weinfurter; Hannes Bernien (2023). Quantum networks with neutral atom processing nodes.

<https://www.nature.com/articles/s41534-023-00759-9>

R4 Thiago Lucena de Macedo Guedes (2026). A Short Introduction to Quantum Error Correction.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s13538-026-02007-9>

R5 C. L. Degen; F. Reinhard; P. Cappellaro (2017). Quantum sensing.

<https://arxiv.org/abs/1611.02427>

R6 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/203/final>

R7 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 204: Module-Lattice-Based Digital Signature Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/204/final>

R8 Bartee, Samuel K. et al. (2025). Spin-qubit control with a milli-kelvin CMOS chip.

<https://www.nature.com/articles/s41586-025-09157-x>

R9 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 205: Stateless Hash-Based Digital Signature Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/205/final>

R10 Thomas G. Wong / Creighton University (2023). Introduction to Classical and Quantum Computing, 1st edition, 4th printing.

<https://www.thomaswong.net/>

R11 John Preskill / Caltech (updated chapters). Lecture Notes for Physics 219: Quantum Computation.

<https://www.preskill.caltech.edu/ph219/index.html>

R12 Joschka Roffe (2019). Quantum Error Correction: An Introductory Guide.

<https://arxiv.org/abs/1907.11157>

R13 Google Quantum AI and Collaborators (2024 online / 2025 volume). Quantum error correction below the surface code threshold.

<https://www.nature.com/articles/s41586-024-08449-y>

R14 IBM Quantum (2026). IBM Quantum documentation and learning.

<https://quantum.cloud.ibm.com/docs/en/guides>

R15 OpenQASM contributors (2026). OpenQASM Live Specification.

<https://openqasm.com/>

R16 DARPA (2026). Quantum Benchmarking Initiative (QBI).

<https://www.darpa.mil/research/programs/quantum-benchmarking-initiative>

R17 Daniele Faccio / University of Glasgow (2024). The future of quantum technologies for brain imaging.

<https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.3002824>

R18 Valerio Scarani; Helle Bechmann-Pasquinucci; Nicolas J. Cerf; Miloslav Dusek; Norbert Lutkenhaus; Momtchil Peev (2009). The Security of Practical Quantum Key Distribution.

<https://arxiv.org/abs/0802.4155>

R19 DARPA (2025-2026). Heterogeneous Architectures for Quantum (HARQ).

<https://www.darpa.mil/research/programs/heterogeneous-architectures-for-quantum>

R20 Akel Hashim et al. (2025). Practical Introduction to Benchmarking and Characterization of Quantum Computers.

<https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.6.030202>

R21 Philip Krantz; Morten Kjaergaard; Fei Yan; Terry P. Orlando; Simon Gustavsson; William D. Oliver (2019). A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits.

<https://arxiv.org/abs/1904.06560>

Dokument kreirao LIGHT BRIDGE GROUP | lbgroup.rs. Verzija 1.0, 26. septembar 2026. Originalni tekst, prevodi i dijagrami pripremljeni su za LIGHT BRIDGE GROUP. Izdanje nije prošlo nezavisnu naučnu recenziju. Spoljne publikacije zadržavaju svoje autorstvo i zasebne licence. Srpsko i englesko izdanje imaju isti obuhvat; prevodi čuvaju naučne razlike.