

DEO I

USPON
KVAANTNIH
RAČUNARA

KRAJ DOBA SILICIJUMA

Revolucija je pred nama.

Tokom 2019. i 2020. godine, dve stvari su uzdrmale svet nauke. Dve grupe su objavile da su dostigle kvantnu nadmoć, da su dosegle mitski trenutak u kom bi potpuno nova vrsta računara, nazvana kvantni računar, mogla definitivno da nadmaši običan digitalni superračunar u izvršavanju određenih zadataka. To je bila najava previranja koje bi moglo da izmeni čitavu računarsku scenu i da preokrene svaki aspekt našeg svakodnevnog života.

Prvo je Gugl saopštio da matematički problem za koji bi najbržem superkompjuteru trebalo 10.000 godina da ga reši njihov kvantni računar Sikamor (Sycamore) može rešiti za 200 sekundi. Prema magazinu *MIT Teknologji rivju*, Gugl je to nazvao velikim probojem. Uporedili su ga s lansiranjem Sputnjika ili prvim letom braće Rajt. To je bio „prag nove ere mašina naspram kojih bi najmoćniji računar današnjice izgledao kao računaljka“.

Onda je Institut za kvantnu inovaciju Kineske akademije nauka otišao korak dalje. Tvrđili su da je njihov kvantni računar 100 biliona puta brži od običnog superračunara.

U svojoj izjavi u vezi sa meteorskim usponom kvantnih računara potpredsednik IBM-a Bob Sutor jednostavno je rekao: „Mislim da će to biti najvažnija računarska tehnologija ovog veka.“

Kvantni računari su nazvani „ultimativnim računarom“, odlučnim skokom u tehnologiji s dalekosežnim posledicama za ceo svet. Umesto računanja na sitnim tranzistorima, računaju na najmanjem mogućem objektu, samim atomima, i zato mogu lako da nadmaše moć našeg najvećeg superračunara. Kvantni računari bi mogli da nas uvedu u potpuno novu eru za ekonomiju, društvo i način života.

Ali kvantni računari nisu tek samo još jedan moćni računar. Oni su nova vrsta računara koji mogu rešiti probleme kakve digitalni računari nikada ne mogu rešiti, čak ni kad bi na raspolaganju imali beskonačno mnogo vremena. Na primer, digitalni računari nikada ne mogu tačno da izračunaju kako se atomi kombinuju da ostvare ključne hemijske reakcije, posebno one koje omogućavaju život. Digitalni računari mogu da računaju samo na digitalnoj traci, koristeći nizove nula i jedinica, što je previše grubo da bi opisalo delikatne talase elektrona koji plešu duboko unutar molekula. Primera radi, kad digitalni računar mukotrpno proračunava staze koje miš prelazi u lavirintu, on mora da analizira svaku moguću stazu, jednu za drugom. Međutim, kvantni računar *istovremeno* analizira sve moguće staze brzinom svetlosti.

Ovo je dodatno produbilo intenzivno suparništvo među tehnološkim divovima, koji se redom utrkuju da stvore najmoćniji kvantni računar na svetu. U 2021. godini, IBM je predstavio svoj kvantni računar, nazvan Igl (Eagl), koji je dospao na prvo mesto po računarskoj snazi u poređenju sa svim prethodnim modelima.

Ali ovi rekordi su kao sportski rezultati – stvoreni da bi se obarali.

S obzirom na duboke implikacije ove revolucije, ne iznenađuje da su mnoge vodeće svetske korporacije uložile velike sume novca u ovu novu tehnologiju. Gugl, Majkrosoft, Intel, IBM, Rigeti i Hanivel konstruišu prototipove kvantnih računara. Lideri Silicijumske doline shvataju da moraju držati korak sa ovom revolucijom ili će završiti u zapečku.

IBM, Hanivel i Rigeti postavili su prvu generaciju svojih kvantnih računara na internet kako bi pobudili znatilježlu javnosti, omogućavajući

ljudima da steknu prvo direktno iskustvo sa kvantnim računanjem. Korisnik računara može doživeti ovu novu kvantnu revoluciju iz prve ruke, povezujući se s kvantnim računarom na internetu. „IBM Quantum Experience“, aplikacija u oblaku pokrenuta 2016. godine, na primer, omogućava da petnaest kvantnih računara bude besplatno dostupno javnosti putem interneta. Među korisnicima su Samsung i JP Morgan Čejs. Već sad 2000 ljudi, od đaka do profesora, koristi te računare svakog meseca.

Vol Strit je pokazao veliko interesovanje za ovu tehnologiju. AjonKju je postao prva velika kompanija za kvantno računarstvo koja je izašla na berzu, prikupivši 600 miliona dolara na svojoj inicijalnoj javnoj ponudi 2021. godine. Zapanjujuće je kako je suparništvo toliko snažno da je novi startap, SajKvantum, bez ikakvog komercijalnog prototipa na tržištu ili ijednog prethodnog proizvoda, odjednom dosegaо vrednost od 3,1 milijarde dolara na Vol Stritu, sa kapacitetom da prikupi 665 miliona dolara za finansiranje maltene preko noći. Poslovni analitičari su pisali da su retko videli nešto slično, novu kompaniju koja dostiže takve visine na talasu grozničave spekulacije i senzacionalnih naslova.

Deloit, konsultantska i računovodstvena firma, procenjuje da bi tržište kvantnih računara trebalo da dostigne stotine miliona dolara tokom dvadesetih godina ovog veka i desetine milijardi dolara u tri-desetim godinama. Niko ne zna kada će se kvantni računari pojaviti na komercijalnom tržištu i promeniti ekonomski krajolik, ali predviđanja se stalno revidiraju kako bi se uskladila sa neviđenom brzinom nastanka naučnih otkrića u ovoj oblasti. Kristofer Savoј, direktor kompanije Zapata Kompjuting, govoreći o meteorskom usponu kvantnih računara, ističe: „Više nije pitanje da li će, već kada će.“

Čak je i Kongres Sjedinjenih Američkih Država izrazio veliko interesovanje da pomogne pokretanje ove nove kvantne tehnologije. Uviđajući da su druge nacije već izdašno finansirale istraživanja u oblasti kvantnih računara, Kongres je u decembru 2018. godine usvojio Zakon o nacionalnoj kvantnoj inicijativi kako bi obezbedio početni

kapital za podsticanje novih istraživanja. Zakon je nalagao formiranje od dva do pet novih Nacionalnih centara za istraživanje kvantne nauke o informacijama, za čije finansiranje će se izdvajati 80 miliona dolara godišnje.

Takođe, američka vlada je 2021. godine najavila investiciju u kvantne tehnologije od 625 miliona dolara, koju će nadzirati Ministarstvo energetike. Gigantske korporacije poput Majkrosofta, IBM-a i Lokhid Martina dodatno su doprinele podršci ovom projektu sa 340 miliona dolara.

Kina i SAD nisu jedine koje koriste državna sredstva za ubrzani razvoj ove tehnologije. Britanska vlada sada gradi Nacionalni centar za kvantno računarstvo, koji će služiti kao središte istraživanja kvantnog računarstva, i nalaziće se u Laboratoriji Harvel pri Savetu za naučna i tehnološka postrojenja u Oksfordširu. Uz pomoć vlade, u Ujedinjenom Kraljevstvu je do kraja 2019. godine osnovano trideset startup kompanija za kvantno računarstvo.

Ekonomski analitičari kažu da je ulog u novu tehnologiju vredan bilion dolara. U toj izuzetno konkurentskoj oblasti nema garancija. Uprkos impresivnim tehničkim dostignućima koje su postigli Gugl i ostali u proteklih nekoliko godina, funkcionalni kvantni računar koji može da rešava realne probleme još je mnogo godina daleko. Pred nama je izuzetno obiman i težak rad. Neki kritičari čak tvrde da je poduhvat ravan potrazi za nemogućim. Ali kompanije za računarstvo shvataju da bi im se, ako ne zakorače u ovu oblast, vrata mogla zatvoriti pred nosom.

Ivan Ostojik, partner u konsultantskoj firmi Mekinsi, kaže: „Kompanije u industrijama gde kvantna tehnologija ima najveći potencijal za potpunu disruptivnost treba odmah da prigrle kvantno računarstvo.“ Oblasti poput hemije, medicine, industrije nafte i gasa, transporta, logistike, bankarstva, farmacije i sajber bezbednosti zrele su za velike promene. Dodaje: „U načelu, kvantna tehnologija će biti važna za sve direktore sektora za informacione tehnologije u kompanijama, jer će ubrzati rešavanje velikog broja problema.“

Vern Braunel, bivši izvršni direktor kanadske kompanije za kvantno računarstvo Di-Vejv Sistems, primećuje: „Verujemo da smo na pragu stvaranja mogućnosti koje klasični računari ne pružaju.“

Mnogi naučnici smatraju da sada stupamo u potpuno novo doba čije udarne talase možemo porediti sa onima koje su izazvali uvođenje tranzistora i mikročipa. Kompanije koje nisu neposredno povezane sa proizvodnjom računara, poput automobilskog giganta Dajmlera, u čijem vlasništvu je Mercedes-Benz, već ulažu u ovu novu tehnologiju, sluteći da kvantni računari mogu da utru put za nove razvojne mogućnosti u njihovim industrijama. Julius Marsea, izvršni direktor konkurentskog BMW-a, napisao je: „Uzbuđeni smo što istražujemo potencijal kvantnog računarstva da preobrati automobilsku industriju i posvećeni smo proširenju granica inženjerskih performansi.“ Druge velike kompanije, poput Folksvagena i Erbasa, osnovale su sopstvena odeljenja za kvantno računarstvo da bi istražile kako bi njihova primena mogla da im donese revoluciju u poslovanju.

Farmaceutske kompanije takođe pažljivo prate razvoj u ovoj oblasti, uviđajući da bi kvantni računari mogli da simuliraju složene hemijske i biološke procese koji su daleko izvan mogućnosti digitalnih računara. Ogromne laboratorije posvećene testiranju miliona lekova jednog dana bi mogle biti zamenjene „virtuelnim laboratorijama“ koje testiraju lekove u sajberprostoru. Ima i onih koji su izrazili bojazan da bi tehnologija jednog dana mogla zameniti hemičare. Ali Derek Lou, koji vodi blog o otkrivanju novih lekova, kaže: „Nije da će mašine zameniti hemičare. Radi se o tome da će hemičari koji koriste mašine zameniti one koji to ne čine.“

Čak i Veliki hadronski sudarač kod Ženeve, najveća mašina na svetu koja se koristi u naučne svrhe, i u kojoj se protoni sudaraju pri energijama od 14 biliona elektron-volti da bi se ponovo uspostavili uslovi kakvi su bili s početka svemira, sada koristi kvantne računare kao pomoć u pretraživanju ogromnih količina podataka. Ti računari su u stanju da u jednoj sekundi analiziraju do bilion bajtova generisanih iz oko milijardu sudara čestica. Možda će kvantni računari jednog dana otkriti tajne stvaranja svemira.

Kvantna nadmoć

Još 2012. godine, kada je fizičar Džon Preskil s Kalifornijskog instituta za tehnologiju skovao termin „kvantna nadmoć“ (engl. *quantum supremacy*), mnogi naučnici su odmahivali s nepoverenjem. Smatrali su da će proći decenije, ako ne i vekovi, dok kvantni računari ne budu u stanju da nadmaše digitalni računar. Uostalom, računanje na pojedinačnim atomima, umesto pomoću silicijumskih čipova, smatralo se izuzetno teškim. I najmanja vibracija ili šum može poremetiti delikatni ples atoma u kvantnom računaru. Ali ove čudesne najave kvantne nadmoći su dosad potrlje mračne prognoze skeptika. Sada se strepi zbog toga koliko brzo se ova oblast razvija.

Podrhtavanja izazvana ovim izvanrednim postignućima potresla su i upravne odbore i vrhunske tajne obaveštajne agencije širom sveta. Dokumenta koje su otkrili uzbunjivači pokazala su da CIA i Nacionalna bezbednosna agencija (NSA) pomno prate razvoj u ovoj oblasti. Razlog je to što su kvantni računari toliko moćni da, u principu, mogu razbiti sve poznate sajberkodove. To znači da su tajne koje vlade pažljivo čuvaju, njihove krunske dragocenosti sa najosetljivijim informacijama, ranjive u slučaju napada – isto važi i za strogo čuvane tajne korporacija, čak i pojedinaca. Situacija je toliko hitna da je i Američki nacionalni institut za standarde i tehnologiju (NIST), koji definiše nacionalne politike i standarde, nedavno izdao smernice kako bi pomogao velikim korporacijama i agencijama da se pripreme za neizbežan prelazak u ovu novu eru. NIST je već najavio da očekuje kako će kvantni računari do 2029. godine moći da razreše 128-bitnu AES enkripciju, kôd koji koriste mnoge kompanije.

U tekstu za časopis *Forbs*, Ali El Kafarani primećuje: „To je prilično zastrašujuća perspektiva za bilo koju organizaciju sa osetljivim informacijama koje treba da zaštititi.“

Kinezi su potrošili 10 milijardi dolara na svoju Nacionalnu laboratoriju za kvantne informacione nauke jer su odlučni da budu predvodnici u ovoj vitalnoj oblasti koja se ubrzano razvija. Države troše desetine

milijardi dolara, ljubomorno čuvajući ove kodove. Naoružan kvantnim računarom, haker bi mogao da provali u *svaki* digitalni računar na planeti, čime bi poremetio razne industrije, čak i vojnu. Sve osetljive informacije mogle bi da postanu dostupne onome ko ponudi najviše. Finansijska tržišta takođe bi mogla biti gurnuta u haos ako bi kvantni računari provalili u svetište Vol Strita. Kvantni računari mogli bi otključati i blokčejn, izazivajući rusvaj na tržištu bitkoina. Deloit je procenio da je oko 25 procenata bitkoina potencijalno ranjivo na hakovanje pomoću kvantnog računara.

„Oni koji vode blokčejn projekte verovatno će s nervozom pratiti napredak kvantnog računarstva“, zaključuje se u izveštaju IT kompanije CB Insajts.

Dakle, na kocki je ni manje ni više nego svetska ekonomija, koja je blisko povezana s digitalnom tehnologijom. Banke s Vol Strita koriste računare da bi pratile transakcije vredne više milijardi dolara. Inženjeri koriste računare za projektovanje nebodera, mostova i raketa. Računari su od pomoći umetnicima za animacije u holivudskim blokbasterima. Farmaceutske kompanije koriste računare za razvoj svojih novih čudesnih lekova. Deca se oslanjaju na računare da bi igrala najnovije videoigre sa svojim prijateljima. Mobilni telefoni su za sve nas od presudne važnosti da bismo trenutno dobili vesti od naših prijatelja, saradnika i rođaka. Svi znamo kakva nas panika obuzme kada ne možemo da nađemo svoj mobilni telefon. U stvari, izuzetno je teško navesti bilo koju ljudsku aktivnost koja nije iz korena preokrenuta zahvaljujući računarima. Toliko smo zavisni od njih da bi civilizacija zapala u haos ako bi nekako svi računari na svetu iznenada prestali da rade. Zato naučnici tako pažljivo prate razvoj kvantnih računara.

Kraj Murovog zakona

Šta pokreće svu ovu buru i kontroverzu?

Uspon kvantnih računara je znak da se doba silicijuma postepeno privodi kraju. U proteklih pola veka, eksplozija računarske moći opisana

je Murovim zakonom, nazvanim po osnivaču Intela Gordonu Muro. Prema Murovom zakonu, računska moć se udvostručuje svakih osamnaest meseci. Ovaj naizgled jednostavan zakon prati izvanredno eksponencijalno povećanje računске moći, koje je bez presedana u ljudskoj istoriji. Nijedan drugi izum nije ostvario tako sveobuhvatan uticaj za tako kratko vreme.

Računari su prošli kroz mnoge faze tokom svoje istorije, svaki put znatno povećavajući svoju moć i dovodeći do velikih društvenih promena. Murov zakon bi se, zapravo, mogao primeniti i na prve decenije 19. veka, na doba mehaničkih računara. Tada su inženjeri koristili rotirajuće cilindre, zupčanike i točkove da bi izvodili jednostavne aritmetičke operacije. U osvit 20. veka, ovi kalkulatori su počeli da rade na električnu energiju, a zupčanici su zamenjeni relejima i kablovima. Tokom Drugog svetskog rata, računari su koristili velike nizove vakuumskih cevi za razbijanje tajnih kodova vlada. U posleratnom periodu prešlo se sa vakuumskih cevi na tranzistore, koji su mogli da se smanje do mikroskopske veličine, omogućavajući dalji napredak u brzini i snazi.

Pedesetih godina prošlog veka, ogromne centralne računare mogle su da priušte samo velike korporacije i vladine agencije poput Pentagona i međunarodnih banaka. Oni su bili moćni (na primer, ENIAC je za trideset sekundi mogao da uradi ono za šta bi ljudima trebalo oko dvadeset sati), ali su bili skupi, glomazni i često su zauzimali čitav sprat poslovne zgrade. Mikročip je uneo revoluciju u ovaj proces, smanjujući se tokom decenija tako da tipičan čip veličine vašeg nokta sada može da sadrži oko milijardu tranzistora. Danas su mobilni telefoni koje deca koriste za igranje video-igara moćniji od sobe pune takvih tromih dinosaurususa koje je nekada koristio Pentagon. Uzeli smo zdravo za gotovo da računar u našem džepu premašuje snagu računara korišćenih tokom Hladnog rata.

Sve je prolazno. Nakon svakog prelaza u novu fazu u razvoju računara, prethodna tehnologija postaje zastarela u procesu kreativne destrukcije. Murov zakon se već usporava i možda će na kraju potpuno

stati. To je zato što su mikročipovi toliko kompaktni da je najtanji sloj tranzistora širine oko dvadeset atoma. Kada dostignu širinu od oko pet atoma, pozicija elektrona postaje neodređena i oni mogu procuriti i izazvati kratak spoj na čipu ili mogu generisati toliko toplote da se čipovi tope. Drugim rečima, prema zakonima fizike, Murov zakon mora na kraju propasti ako nastavimo da koristimo prevashodno silicijum. Može se desiti da postanemo svedoci kraja doba silicijuma. Sledeći skok bi mogao voditi u post-silicijumsko ili kvantno doba.

Kao što je rekao Sandži Nataradžan iz Intela: „Izvukli smo, verujemo, sve što se moglo izvući iz te arhitekture.“

Silicijumska dolina može na kraju postati sledeći Pojas rđe.*

Iako se situacija sada čini mirnom, nova budućnosti će osvanuti, pre ili kasnije. Hartmut Neven, direktor Guglove laboratorije za veštačku inteligenciju, kaže: „Izgleda kao da se ništa ne dešava, ništa se ne dešava, i onda bum – odjednom ste u drugačijem svetu.“

Zašto su tako moćni?

Šta čini kvantne računare toliko moćnim da se države utrkuju da ovladaju ovom novom tehnologijom?

U suštini, svi moderni računari zasnivaju se na digitalnim informacijama, koje mogu biti kodirane nizovima nula i jedinica. Najmanja informaciona jedinica, jedna cifra, naziva se bit. Ova sekvenca nula i jedinica unosi se u digitalni procesor koji vrši proračun, i zatim daje izlazne vrednosti. Vaša internet veza se, recimo, može meriti u bitovima u sekundi (engl. *bits per second*, bps), što znači da se milijardu bitova šalje vašem računaru svake sekunde, omogućavajući vam trenutni pristup filmovima, mejlovima, dokumentima itd.

Međutim, nobelovac Ričard Fajnman je 1959. godine zamislio drugačiji pristup digitalnim informacijama. U proročkom, revolucionarnom

* Pojas rđe (engl. *Rust Belt*), područje u severoistočnom delu SAD koje je u drugoj polovini prošlog veka pogođeno smanjenjem industrijskih kapaciteta nastalim dobrim delom usled tehnološke zaostalosti. (*Prim. prev.*)

eseju pod naslovom „Ima puno prostora na dnu“ (There's Plenty of Room at the Bottom) i u kasnijim tekstovima, postavio je pitanje: zašto ne bismo zamenili ovu sekvencu nula i jedinica stanjima atoma, stvarajući tako atomski računar? Zašto ne bismo zamenili tranzistore najmanjim mogućim objektom, atomom?

Atomi su poput čigri. U magnetnom polju atomi se mogu poravnati bilo nagore ili nadole u odnosu na magnetno polje, što može odgovarati vrednosti 0 ili 1. Moć digitalnog računara je povezana s brojem stanja (nula ili jedinica) koja imate u računaru.

Ali zbog čudnih pravila subatomskeg sveta, atomi se mogu takođe vrteti u bilo kojoj kombinaciji ta dva stanja. Možete imati stanje u kome se atom vrti s momentom nagore 10 posto vremena, a nadole 90 posto vremena. Ili se vrti sa momentom nagore 65 posto vremena i nadole 35 posto vremena. Zapravo, atom može da se vrti na beskonačno mnogo načina. To drastično povećava broj mogućih stanja. Dakle, atom može da prenosi mnogo više informacija, ne samo u vidu bita, već i kubita – što su kvantni bitovi – tj. putem simultane mešovine stanja „gore“ i „dole“. Digitalni bitovi mogu nositi samo jedan bit informacija u nekom trenutku, što ograničava njihovu moć, ali kubiti imaju skoro neograničenu moć. Činjenica da objekti na atomskoj skali mogu istovremeno da postoje u više stanja zove se superpozicija. (To takođe znači da se nama poznati zakoni zdravog razuma rutinski krše na atomskoj skali. Na tom nivou, elektroni mogu biti na dva mesta u isto vreme, što za velike objekte ne važi.)

Pored toga, moguće su interakcije između kubita, što u slučaju običnih bitova nije moguće. To se zove spletenost. Dok digitalni bitovi imaju nezavisna stanja, svaki put kada dodate još jedan kubit, on interaguje sa svim prethodnim kubitima, tako da udvostručujete broj mogućih interakcija. Dakle, kvantni računari su inherentno eksponencijalno moćniji od digitalnih računara, jer udvostručujete broj interakcija kad god dodate još jedan kubit.

Kvantni računari danas mogu da imaju preko 100 kubita. To znači da su 2^{100} puta moćniji od superračunara sa samo jednim kubitom.

Guglov kvantni računar Sikamor, koji je prvi ostvario kvantnu nadmoć, može da obradi 72 milijarde milijardi bajtova memorije sa svoja pedeset tri kubita. Dakle, kvantni računari poput Sikamora su pravi džinovski naspram konvencionalnih računara.

Komercijalne i naučne implikacije ovoga su nesagledive. Dok prelazimo iz digitalne svetske ekonomije u kvantnu ekonomiju, ulozi su neverovatno visoki.

Prepreke na putu kvantnih računara

Sledeće ključno pitanje glasi: zašto se moćni kvantni računari već ne reklamiraju? Zašto neki preduzimljivi pronalazač ne predstavi kvantni računar koji može da razbije sve poznate kodove?

Problem sa kojim se suočavaju kvantni računari predvideo je i Ričard Fajnman kada je prvi put objasnio ovaj koncept. Da bi kvantni računari radili, atomi moraju da budu precizno raspoređeni tako da vibriraju usklađeno. To se zove koherentnost. Ali atomi su neverovatno mali i osetljivi objekti. Najmanja nečistoća ili remećenje iz spoljnog sveta može dovesti to toga da ova mreža atoma izgubi koherentnost, i to bi uništilo čitav proračun. Ova krhkost je glavni problem s kojim se suočavaju kvantni računari. Dakle, pitanje za bilion dolara glasi: možemo li kontrolisati dekoherenciju?

Kako bi kontaminaciju iz spoljnog sveta sveli na minimum, naučnici koriste specijalnu opremu za spuštanje temperature blizu apsolutne nule, gde su neželjene vibracije minimalne. Ali da bi se postigle tako niske temperature, potrebne su skupe, specijalne pumpe i cevi.

Međutim, tu nas čeka misterija. Majka Priroda primenjuje kvantnu mehaniku na sobnoj temperaturi bez ikakvih problema. Na primer, čudo fotosinteze, jednog od najvažnijih procesa na Zemlji, jeste kvantni proces, ali se odvija na normalnim temperaturama. Majci Prirodi ne treba soba puna ekstravagantnih uređaja koji rade blizu apsolutne nule da bi vršila fotosintezu. Iz razloga koje još uvek ne razumemo dobro, koherencija u prirodnom svetu može da se održava čak i po toplom,

sunčanom danu, kad bi remećenje iz spoljnog sveta trebalo da izaziva kaos na atomskom nivou. Ako bismo jednog dana uspeali da shvatimo kako Majka Priroda izvodi svoju magiju na sobnoj temperaturi, mogli bismo da postanemo gospodari kvantnog sveta, čak i samog života.

Revolucija u ekonomiji

Iako kratkoročno posmatrano kvantni računari predstavljaju pretnju po sajberbezbednost država, oni takođe imaju ogromne praktične implikacije na duže staze, zbog svoje moći da unesu revoluciju u svetsku ekonomiju, da stvore održiviju budućnost i uvedu nas u eru kvantne medicine koja bi pomogla u lečenju dosad neizlečivih bolesti.

Kvantni računari bi mogli nadmašiti konvencionalne digitalne računare u mnogim oblastima:

1. Pretraživači

U prošlosti, bogatstvo se moglo meriti naftom ili zlatom.

Sada se sve više meri podacima. Kompanije su nekada bacale sopstvene finansijske podatke, ali sada se te informacije smatraju vrednijim od plemenitih metala. Međutim, pretraživanje gomila podataka moglo bi biti preveliki zalogaj za konvencionalni digitalni računar. Tu na scenu stupaju kvantni računari i pronalaze iglu u plastu sena. Kvantni računari mogu da analiziraju finansijske kompanije i da izoluju činioce koji ometaju njen razvoj.

Zapravo, kompanija Džej Pi Morgan Čejs je nedavno ušla u partnerstvo sa kompanijama IBM i Hanivel, sa ciljem da analizira svoje podatke, dođe do boljih predviđanja finansijskih rizika i nesigurnosti i da poveća efikasnost njihovih operacija.

2. Optimizacija

Kad kvantni računari pomoću pretraživača identifikuju ključne činioce u podacima, sledeće pitanje glasi: kako pomoću njih maksimizovati određene faktore poput profita. Velike korporacije, univerziteti i

vladine agencije će u najmanju ruku koristiti kvantne računare da minimizuju svoje troškove i maksimizuju efikasnost i profit. Recimo, neto prihod kompanije zavisi od stotina faktora, kao što su plate, prodaja, troškovi i tako dalje, koji se brzo menjaju s vremenom. Tradicionalnom digitalnom računaru moglo bi biti teško da nađe pravu kombinaciju ovih bezbrojnih faktora kako bi se što više povećala profitna marža kompanije. Osim toga, finansijska firma bi možda htela da predvidi budućnost određenih finansijskih tržišta na kojima se dnevno obavljaju transakcije vredne milijarde dolara pomoću kvantnih računara. Kvantni računari tu mogu biti od pomoći kao komputacioni „mišići“ za optimizaciju prihoda kompanije.

3. Simulacija

Kvantni računari bi mogli da rešavaju složene jednačine koje su van dosega digitalnih računara. Inženjerske firme, recimo, mogu da koriste kvantne računare za izračunavanje aerodinamičkih karakteristika mlaznjaka, aviona i automobila, da bi pronašle idealan oblik koji smanjuje trenje, snižava troškove i povećava efikasnost. Ili bi vlade mogle da se oslanjaju na kvantne računare za predviđanje vremenskih prilika, od određivanja puta ogromnog uragana do proračuna kako će globalno zagrevanje uticati na ekonomiju i naš način života decenijama unapred. Takođe, naučnici bi pomoću kvantnih računara mogli da pronalaze optimalne konfiguracije magneta u ogromnim mašinama za nuklearnu fuziju da bi iskoristili moć vodonične fuzije i da „stave Sunce u bocu“.

Ali najveću korist od kvantnih računara mogla bi da predstavlja simulacija stotina vitalnih hemijskih procesa. Cilj bi bio predvideti ishod bilo koje hemijske reakcije na atomskom nivou bez upotrebe hemikalija, koristeći samo kvantne računare. Ova nova grana nauke, računarska hemija, ne određuje hemijska svojstva eksperimentom, već simulacijama na kvantnom računaru, što bi jednog dana moglo eliminisati skupa i dugotrajna testiranja. Čitava biologija, medicina i hemija bile bi svedene na kvantnu mehaniku. To znači stvaranje „virtuelne laboratorije“ u kojoj bismo mogli brzo da isprobamo nove lekove,

terapije i lečenja zahvaljujući memoriji kvantnog računara, preskačući decenije pokušaja i grešaka i sporih, zamornih laboratorijskih eksperimenata. Umesto da izvodimo hiljade složenih, skupih i dugotrajnih hemijskih eksperimenata, mogli bismo naprosto da pritisnemo dugme na kvantnom računaru.

4. Spajanje veštačke inteligencije i kvantnih računara

Veštačka inteligencija (engl. *artificial intelligence*, AI) odlikuje se sposobnošću da uči iz grešaka, kako bi mogla da obavlja sve teže zadatke. Već je dokazala svoju vrednost u industriji i medicini. Međutim, jedno od njenih ograničenja je to što se lako može desiti da konvencionalni digitalni računar ne bude dovoljan za ogroman broj podataka koje AI mora da obradi. Ali sposobnost pretraživanja gomila podataka jedna je od jačih strana kvantnih računara. Dakle, spajanje AI i kvantnih računara može da u znatnoj meri poveća njihovu moć da rešavaju probleme svih vrsta.

Dalje primene kvantnih računara

Kvantni računari imaju moć da promene čitave industrije. Kvantni računari mogu napokon doneti dugo očekivanu Solarnu eru. Decenijama su futuristi i vizionari predviđali da će obnovljiva energija zameniti fosilna goriva i rešiti problem efekta staklene bašte zbog kog se naša planeta zagreva. Armije ovih mislilaca i sanjara zaklinjale su se u vrline obnovljive energije.

Ali Solarna era je skrenula s puta.

Iako su se smanjili troškovi za izgradnju vetroturbina i solarnih panela, oni i dalje predstavljaju samo mali deo svetske energetske proizvodnje. Šta se dogodilo?

Svaka nova tehnologija na kraju se suočava s konačnom preprekom: s troškovima. Nakon decenija hvalospeva solarnoj energiji i energiji vetra, pristalice moraju prihvatiti činjenicu da je ona i dalje u proseku nešto skuplja od fosilnih goriva. Razlog je jasan. Kada sunce ne sija

i vetrovi ne duvaju, tehnologija za iskorišćavanje obnovljive energije čuči neiskorišćena, skupljajući prašinu.

Često se zanemaruje ključno usko grlo za Solarnu eru: baterija. Razmazila nas je činjenica da računarska snaga eksponencijalno raste i bez razmišljanja prihvatamo da sva elektronska tehnologija prati taj tempo poboljšavanja.

Jedan od razloga zašto je računarska snaga doživela munjevit uzlet jeste to što možemo kraćim talasnim dužinama ultraljubičastog zračenja ugravirati male tranzistore na silicijumski čip. Ali baterije su nešto drugo; haotične su, oslanjaju se na skup egzotičnih supstanci u složenom sadejstvu. Snaga baterije raste polako i mukotrpno, kroz pokušaje i greške, a ne sistematskim graviranjem ultraljubičastim zracima sve kraće talasne dužine. Štaviše, energija uskladištena u bateriji je mali deo energije pohranjene u benzinu.

Kvantni računari bi mogli to da promene. Mogli bi da modeluju hiljade mogućih hemijskih reakcija bez potrebe da se one izvode u laboratoriji kako bi se pronašao najefikasniji proces za superbateriju, čime bi se otvorila vrata Solarne ere.

Kompanije za distribuciju energije i automobilske kompanije već koriste kvantne računare prve generacije IBM-a da bi izašle na kraj s problemom baterija. Pokušavaju da povećaju kapacitet i brzinu punjenja za sledeću generaciju litijum-sumpornih baterija. Međutim, ovo je samo jedan od načina da se ublaži klimatska kriza. Na primer, EksonMobil koristi IBM-ove kvantne računare da bi došao do novih hemijskih supstanci za niskoenergetsku obradu i zahvatanje ugljen-dioksida. Konkretno, njihov cilj je da kvantni računari budu u stanju da simuliraju materijale i određuju njihovu hemijsku prirodu, poput toplotnog kapaciteta.

Džeremi O'Brajen, osnivač SajKvantuma, naglašava da se ova revolucija ne vrti oko izgradnje bržih računara. U stvari, radi se o rešavanju problema poput složenih hemijskih i bioloških reakcija, koje nijedan konvencionalni računar ne bi mogao da reši koliko god vremena imao na raspolaganju.

On kaže: „Ne govorimo o tome da li ćemo stvari raditi brže ili bolje... već da ih uopšte možemo raditi... Ovi problemi su zauvek van domašaja bilo kog konvencionalnog računara koji bismo ikada mogli da konstruišemo... čak i ako bismo svaki silicijumski atom na planeti pretvorili u superračunar, i dalje ne bismo mogli da rešimo ove... teške probleme.“

Hranjenje planete

Još jedna ključna primena kvantnih računara mogla bi da bude hranjenje sve brojnije svetske populacije. Određene bakterije mogu bez problema da uzimaju azot iz vazduha pretvarajući ga u amonijak, koji potom prelazi u hemijska jedinjenja koja postaju đubrivo. Zbog ovog procesa vezivanja azota život buja na Zemlji, on omogućava rast bujne vegetacije koja hrani ljude i životinje. Zelena revolucija je pokrenuta kad su hemičari uspeli da postignu isto što i priroda putem Haber-Bošovog procesa. Međutim, za ovaj proces je neophodna ogromna količina energije. Zapravo, na njega odlazi neverovatnih dva posto ukupne svetske proizvodnje energije.

U tome se krije ironija. *Bakterije mogu bez ikakvih troškova da rade nešto za šta mi koristimo ogroman deo svetske energije.*

Mogu li kvantni računari da reše ovaj problem efikasne proizvodnje đubriva i da pokrenu drugu Zelenu revoluciju? Pojedini futuristi predviđaju da će se desiti ekološka katastrofa ako ne bude revolucije u proizvodnji hrane jer će biti sve teže hraniti svetsku populaciju koja se uvećava; to bi moglo dovesti do masovne gladi i nereda zbog hrane širom sveta.

Naučnici u Majkrosoftu već su ostvarili prve pokušaje da pomoću kvantnih računara povećaju prinose iz nađubrenog zemljišta i otkrili tajnu azotofiksacije. Na kraju, kvantni računari bi mogli pomoći da se ljudska civilizacija spasi sebe same. Još jedno čudo prirode je fotosinteza, kojom se sunčeva svetlost i ugljen-dioksid pretvaraju u kiseonik i glukozu, što čini osnovu za skoro sav životinjski svet. Bez fotosinteze, lanac ishrane bi se srušio i život na ovoj planeti brzo bi izumro.

Naučnici su decenijama pokušavali da razjasne svaki korak ovog procesa, molekul po molekul. Ali problem pretvaranja svetlosti u šećer je kvantno-mehanički proces. Nakon godina truda, naučnici su utvrdili gde kvantni efekti dominiraju ovim procesom, i svi su van domašaja digitalnih računara. Zato uspostavljanje sintetičke fotosinteze koja bi mogla biti efikasnija od prirodne i dalje izmiče našim najboljim hemičarima.

Kvantni računari mogli bi da budu od pomoći u stvaranju efikasnije sintetičke fotosinteze ili možda potpuno novih načina iskorišćavanja energije sunčeve svetlosti. Budućnost snabdevanja ljudi hranom mogla bi da zavisi od toga.

Rođenje kvantne medicine

Dakle, kvantni računari imaju moć da podmlade životnu sredinu i biljni svet. Ali mogu i da izleče bolesne i umiruće. Ne samo da su u stanju da istovremeno analiziraju efikasnost miliona potencijalnih lekova brže od bilo kog konvencionalnog računara, već mogu i da razotkriju prirodu same bolesti.

Kvantni računari bi mogli da odgovore na pitanja poput ovih: šta dovodi do toga da zdrave ćelije iznenada postanu kancerogene i kako se to može zaustaviti? Šta uzrokuje Alchajmerovu bolest? Zašto su Parkinsonova bolest i ALS neizlečivi? Još aktuelnije, poznato je da koronavirus mutira, ali koliko su opasne svaka od tih mutiranih varijanti i kako će reagovati na lečenje?

U najveća otkrića u celoj medicini ubrajaju se antibiotici i vakcine. Ali novi antibiotici se pronalaze uglavnom metodom pokušaja i grešaka, bez preciznog razumevanja kako funkcionišu na molekularnom nivou, a vakcine samo stimulišu ljudsko telo da proizvodi hemikalije koje napadaju virus. U oba slučaja, precizni molekularni mehanizmi još uvek su misterija, a kvantni računari mogu da daju uvid u to kako bismo mogli da razvijemo bolje vakcine i antibiotike.

Kada je reč o razumevanju tela, prvi veliki korak bio je Projekat ljudski genom, kojim je napravljen katalog sve tri milijarde parova baza

i 20.000 gena koji čine šemu za formiranje ljudskog tela. Međutim, to je samo početak. Problem je u tome što se digitalni računari uglavnom koriste za pretraživanje velikih baza podataka poznatih genetičkih kodova, ali su bespomoćni kad je reč o preciznom objašnjavanju kako to DNK i proteini izvode svoja čuda unutar tela. Proteini su složeni objekti, često sačinjeni od hiljada atoma koji se uvijaju u malu loptu, na specifične i neobjašnjive načine sprovodeći svoju molekularnu magiju. Na svom najosnovnijem nivou, sav život je kvantnomehanički, i zato je van domašaja digitalnih računara.

Ali kvantni računari će predvoditi sledeću fazu, kada ćemo dešifrovati mehanizme na molekularnom nivou koji će nam objasniti prirodu proteina, što će omogućiti naučnicima da sačine nove genetičke obrasce, nove terapije, nove lekove za savladavanje do sada neizlečivih bolesti.

Farmaceutske kompanije, uključujući firme kao što su ProteinKjur, Didžital Helt 150, Merk i Bajodžen, već osnivaju istraživačke centre za ispitivanje uticaja kvantnih računara na analizu lekova.

Naučnici su zadivljeni time što je Majka Priroda uspela da stvori ogroman arsenal molekularnih mehanizama koji omogućavaju čudo života. Ali ti mehanizmi su sporedni proizvod slučajnosti i prirodne selekcije koja deluje tokom milijardi godina. Zbog toga i dalje patimo od određenih neizlečivih bolesti i procesa starenja. Jednom kada shvatimo kako ti molekularni mehanizmi funkcionišu, bićemo u stanju da koristimo kvantne računare kako bismo ih poboljšali ili stvorili njihove nove verzije.

Na primer, pomoću DNK genomike, možemo koristiti računare da identifikujemo gene kao što su BRCA1 i BRCA2 koji verovatno dovode do raka dojke. Ali digitalni računari su beskorisni kad je reč o preciznom određivanju načina na koji ti defektni geni uzrokuju rak. Takođe su nemoćni pri zaustavljanju raka koji se proširio po telu. Ali kvantni računari, dešifrujući molekularne finese našeg imunskog sistema, možda mogu da naprave nove lekove i osmisle terapije za borbu protiv ovih bolesti.

Još jedan primer je Alchajmerova bolest, za koju neki veruju da će postati „bolest veka“ kako svetska populacija stari. Digitalni računari omogućavaju da se pokaže kako su mutacije u određenim genima poput gena ApoE4 povezane sa Alchajmerovom bolešću. Ali digitalni računari ne mogu da doprinesu objašnjenju zašto je to tako.

Prema jednoj od vodećih teorija, Alchajmerovu bolest uzrokuju prioni – amiloidni proteini koji se nepravilno uvijaju u mozgu. Kad ovakav odmetnički molekul naleti na drugi molekul proteina, dovodi do toga da se i taj molekul uvije na pogrešan način. Dakle, bolest se može širiti kontaktom, iako nema bakterija i virusa. Sumnja se da su ovi prioni krivci za Alchajmerovu bolest, Parkinsonovu bolest, ALS i niz drugih neizlečivih bolesti koje pogađaju starije.

Dakle, uvijanje proteina jedno je od najvećih, neistraženih područja u biologiji. Zapravo, moguće je da krije i samu tajnu života. Ali kako se tačno molekul proteina uvija pitanje je van mogućnosti izračunavanja bilo kog konvencionalnog kompjutera. Međutim, kvantni računari mogu da ukažu na nove puteve za neutralizaciju odmetnutih proteina i da omogućе nove terapije.

Pored toga, moglo bi se pokazati da je budućnost medicine u pomenutom spajanju veštačke inteligencije i kvantnih računara. Već sada su AI programi kao što je AlfaFold uspeli da mapiraju detaljnu atomsku strukturu zaprepašćujućih 350.000 tipova proteina, uključujući kompletan skup proteina koji čine ljudsko telo. Sledeći korak je primena jedinstvenih metoda kvantnih računara da se otkrije kako ti proteini izvode svoje čarolije i da se osmisle sledeće generacije lekova i terapija.

Kvantni računari već se povezuju sa neuronskim mrežama, kako bi stvorili sledeću generaciju mašina koje uče i koje doslovno imaju sposobnost sopstvenog stvaranja. Laptop na vašem stolu, nasuprot tome, nikad ne uči. Nije ništa moćniji danas nego što je bio prošle godine. Tek odnedavno, s napretkom u dubokom učenju (engl. *deep learning*), računari čine prve korake u prepoznavanju grešaka i učenju. Kvantni računari bi mogli da eksponencijalno ubrzaju ovaj proces i da ostvare izuzetan uticaj na medicinu i biologiju.

Sundar Pičaj, izvršni direktor Gugla, poredi dolazak kvantnih računara sa istorijskim letom braće Rajt iz 1903. godine. Prvobitni probni let nije bio toliko fascinant sam po sebi, jer je trajao samo skromnih dvanaest sekundi. Ali taj kratak let bio je okidač za uzlet moderne avijacije koja je promenila tok ljudske civilizacije.

Ulog je ništa manje do naša budućnost. Na dohvat ruke je onom ko je sposoban da napravi i koristi kvantni računar. Ali da bismo zaista razumeli kakav bi uticaj ova revolucija mogla imati na naše svakodnevne živote, korisno je osvrnuti se na neke od hrabrih pokušaja u prošlosti da ispunimo svoj san: da koristimo računare za simulaciju i razumevanje sveta oko nas.

A sve je počelo sa tajanstvenim, dve hiljade godina starim artefaktom pronađenim na dnu Sredozemnog mora.

KRAJ DIGITALNE ERE

Sa dna Egejskog mora dolazi jedna od najintragantnijih i najzanimljivijih zagonetki drevnog sveta. Godine 1901. ronionci su izvadili čudnovatu retkost blizu ostrva Antikitere. Među razbacanim komadima razbijene keramike, novčića, nakita i figurica u olupini broda, ronionci su pronašli jedan sasvim drugačiji i neobičan predmet. Isprva je izgledao kao bezvredni komad koralom prekrivenog kamena.

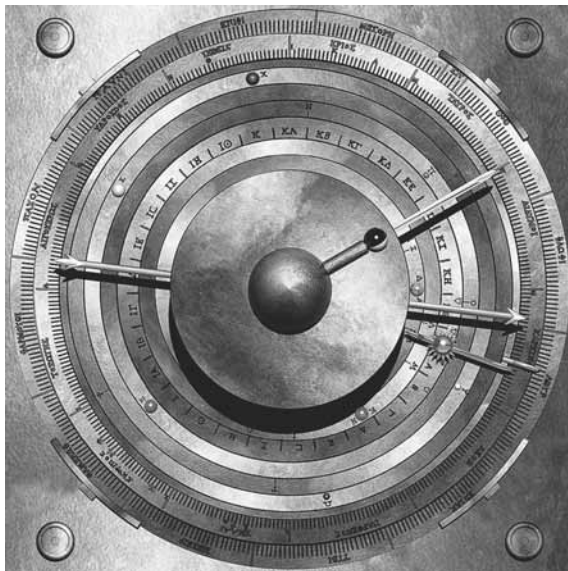
Ali kada su očistili naslage praha, arheolozi su shvatili da gledaju u izuzetno retko, jedinstveno blago. Bilo je ispunjeno zupčanicima, točkovima i čudnim natpisima – mašina složenog i prefinjenog dizajna.

Datiranjem artefakata pronađenih u olupini broda, procenjeno je da je ovaj izrađen između 150. i 100. godine pre n. e. Neki istoričari veruju da su ga dopremali u Rim s Rodosa, kao poklon Juliju Cezaru za trijumfalnu paradu.

Godine 2008. naučnici su, koristeći rendgensku tomografiju i skeniranje površine u visokoj rezoluciji, prodrli u unutrašnjost ovog intrigantnog objekta. Šokirali su se kad su shvatili da gledaju u drevni mehanički uređaj koji je bio neverovatno napredan.

Nigde u drevnim zapisima nije bilo pomena o tako sofisticiranom mehanizmu. Shvatili su da je ova veličanstvena mašina morala biti vrhunac naučnog znanja drevnog sveta. Bila je to supernova briljantnosti

koja je gledala u njih iz milenijumima daleke prošlosti. Bio je to *najstariji računar na svetu*, uređaj kakvog čovek neće napraviti još dve hiljade godina.



Slika 1: Mehanizam Antikitera

Pre dve hiljade godina Grci su stvorili Antikiteru, prvi u dugoj evolutivnoj liniji računara, prikazan ovde kao model na osnovu originalnog uređaja. Dok Antikitera predstavlja početak računarske tehnologije, kvantni računar će možda predstavljati najvišu fazu u njenoj evoluciji.

Naučnici su počeli da izrađuju mehaničke reprodukcije ovog važnog uređaja. Okretanjem ručice, serija složenih točkova i zupčanika pokrenuta je po prvi put posle hiljada godina. Uređaj je imao najmanje trideset sedam bronzanih zupčanika. Jedna grupa zupčanika proračunavala je kretanje Meseca i Sunca. Druga je mogla da predvidi predstojeće pomračenje Sunca. Uređaj je bio toliko precizan da je čak mogao da izračuna male nepravilnosti u orbiti Meseca. Prevodi natpisa ukazuju na kretanje Merkura, Venere, Marsa, Saturna i Jupitera, planeta poznatih drevnim ljudima, ali veruje se da je deo uređaja koji nedostaje mogao da iscertava putanje planeta.

Naučnici su od tada napravili složene modele unutrašnjosti uređaja koji su istoričarima pružili neviđeni uvid u znanje i umove drevnih

ljudi. Uređaj je najavio rađanje potpuno nove grane nauke, koja koristi mehaničke alate za simulaciju svemira. To je bio najstariji analogni računar na svetu – uređaj koji je mogao da računa putem neprekidnih mehaničkih pokreta.

Dakle, svrha prvog računara na svetu bila je da simulira nebeska tela, da reprodukuje tajne kosmosa u uređaju koji ste mogli držati u rukama. Umesto da samo u čudu gledaju noćno nebo, ovi drevni naučnici želeli su da steknu dublje razumevanje njegovih mehanizama i neviđeni uvid u kretanje nebeskih tela.

Kvantni računari: konačna simulacija

Arheolozi su otkrili da Antikitera predstavlja vrhunac naših drevnih pokušaja da simuliramo kosmos. Zapravo, ta ista želja iz davnih vremena da simuliramo svet oko sebe jedna je od pokretačkih sila iza kvantnog računara, koja predstavlja krajnji napor u dvomilenijumskom putovanju ka simuliranju svega, od kosmosa do samog atoma.

Simulacija je jedna od naših najdubljih čovekovih težnji. Deca izvode simulaciju pomoću igračaka da bi razumela ljudsko ponašanje. Kada se deca igraju policajaca i lopova, učitelja i đaka, ili lekara i pacijenta, oni simuliraju deo društva odraslih kako bi razumeli složene ljudske odnose.

Nažalost, moralo je proći mnogo vekova dok su naučnici napravili mašine dovoljno složene da simuliraju naš svet jednako dobro kao što se to činilo Antikiterom.

Bebidž i diferencijalna mašina

S padom Rimskog carstva nastao je zastoje u naučnom napretku na mnogim poljima, uključujući simulaciju svemira.

Interesovanje je postepeno počelo da oživljava tek početkom 19. veka. Do tad su se već pojavila praktična pitanja na koja se moglo odgovoriti samo mehaničkim analognim računarima.

Na primer, navigatori su se oslanjali na detaljne mape i dijagrame pri iscrtavanju putanje svojih brodova. Trebali su im uređaji koji bi im pomogli da te mape budu što preciznije.

Kako su ljudi počeli da akumuliraju sve veća bogatstva, mašine sve veće složenosti bile su nužne i za praćenje trgovine. Računovođe su morali ručno da sastavljaju velike tabele za izračunavanje kamata.

Ali ljudi bi često pravili skupe i kobne greške. Zato je postojalo veliko interesovanje za osmišljavanje mehaničkih računskih mašina koje ne bi pravile takve greške. Kako su računске mašine postajale složenije, preduzimljivi izumitelji su se utrkiivali ko će napraviti najnapredniju takvu mašinu.

Možda je najambiciozniji od ovih projekata vodio ekscentrični engleski pronalazač i vizionar Čarls Bebidž, koji se često naziva ocem računara. Bavio se raznim oblastima, između ostalih i umetnošću, čak i politikom, ali u svemu su ga fascinirali brojevi. Srećom, rodio se u bogatoj porodici, tako da mu je otac, budući bankar, mogao pomoći da sledi mnoga od svojih raznovrsnih interesovanja.

San mu je bio da stvori najnapredniju računsku mašinu tog vremena, koju bi mogli da koriste bankari, inženjeri, moreplovci i vojska da nepogrešivo izvode zamorne proračune od presudne važnosti. Imao je dva cilja. Kao osnivač Kraljevskog astronomskeg društva, hteo je da napravi mašinu koja bi mogla pratiti kretanje planeta i astronomskih tela (sledio bi, u suštini, isti pionirski put kao tvorci Antikitere). Pored toga, zanimale su ga i precizne navigacione karte za pomorsku industriju. Engleska je bila velika pomorska sila, i greške u navigacionim kartama mogle su da dovedu do skupih katastrofa. Ideja mu je bila je da stvori najmoćniji mehanički računar koji bi predvideo kretanje svega, od planeta preko brodova na moru do kamatnih stopa.

Bio je veoma ubedljiv u vrbovanju entuzijasta koji bi mu pomogli u izvođenju njegovog ambicioznog projekta. Jedna od njih bila je leđi Ada Lavlejs, aristokratkinja, ćerka lorda Bajrona. I ona je ozbiljno proučavala matematiku, što je bilo retko za žene tog vremena. Kada je videla mali radni model Bebidžovog projekta, njegov plan ju je zaintrigirao.

Ada Lavlejs je poznata po tome što je pomogla Bebidžu da uvede nekoliko novih koncepata u računarstvu. Za rad mehaničkog računara bio je potreban komplet zupčanika i točkica da polako i mukotrpno izračunava brojeve, jedan po jedan. Ali da bi odjednom generisao čitave tabele s hiljadama vrednosti (poput logaritama, kamatnih stopa i navigacionih dijagrama), bio je neophodan skup instrukcija da usmerava mašinu kroz brojne iteracije. Drugim rečima, bio je potreban softver da usmerava sekvencu proračuna u hardveru. Lavlejsova je napisala niz detaljnih uputstava pomoću kojih bi mašina mogla sistematski da generiše Bernulijeve brojeve, neophodne za proračune koje je obavljala.

Na neki način, Lavlejs je bila prvi programer na svetu. Istoričari se slažu da je Bebidž verovatno bio svestan važnosti softvera i programiranja, ali upravo su njene detaljne beleške nastale 1843. godine predstavljale prvi objavljeni zapis o računarskom programu.

Ona je takođe uvidela da je računar u stanju ne samo da manipuliše brojevima, kako je mislio Bebidž, već da se može generalizovati tako da opisuje simboličke koncepte u širokom spektru oblasti. Autor Doron Svejđ piše: „Ada je videla nešto što Bebidž, u neku ruku, nije mogao. U Bebidžovom svetu njegove mašine su bile vezane za broj. Lavlejsova je uvidela... kako broj može da predstavlja entitete, a ne samo količinu. Kada imate mašinu za upravljanje brojevima, a ti brojevi predstavljaju druge stvari, slova, muzičke note, mašina u skladu s pravilima može da upravlja simbolima od kojih je broj samo jedan primer.“

Lavlejsova je kao primer navela da se računar može programirati da stvara muzička dela. Napisala je: „Mašina bi mogla da komponuje muzičke komade bilo kog stepena složenosti ili opsega.“ Dakle, računar nije bio samo prerađivač brojeva ili glorifikovana mašina za sabiranje. Mogao je da se koristi i za istraživanje nauke, umetnosti, muzike i kulture. Nažalost, pre nego što je stigla da objasni ove koncepte koji bi promenili svet, umrla je od raka u trideset šestoj godini.

U međuvremenu, bez sredstava i u neprekidnom sukobu s drugima, Bebidž nije uspeo da ispuni san o stvaranju najnaprednijeg mehaničkog

računara tog vremena. Kada je umro, mnogi njegovi nacrti i ideje umrli su sa njim.

Naučnici su od tada pokušavali da utvrde koliko su njegove mašine bile napredne. Nacrt jednog od njegovih nedovršenih modela sadržao je 25.000 delova. Kada bi bio izgrađen, težio bi četiri tone i bio bi visok dva i po metra. Bio je toliko ispred svog vremena da bi njegova mašina mogla da radi s hiljadu pedesetocifrenih brojeva. Sve do 1960. godine nije napravljena druga mašina sa tolikom memorijom.

Ali otprilike stotinu godina nakon njegove smrti, inženjeri u Londonskom muzeju nauke su, prateći njegove nacрте na papiru, dovršili jedan od njegovih modela i izložili ga. I radio je, baš kao što je Bebiđ predvideo vek ranije.

Da li je matematika potpuna?

Dok su inženjeri konstruisali sve složenije mehaničke računare kako bi zadovoljili prohteve sveta koji se ubrzano industrijalizovao, matematičari su se bavili još jednim pitanjem. Još su grčki geometri snivali da dokažu kako se sve istinite tvrdnje u matematici mogu strogo dokazati.

Ali zanimljivo je da je ta jednostavna ideja frustrirala matematičare punih 2000 godina. Vekovima su se proučavaoci Euklidovih *Elementa* trudili da dokažu teoremu za teoremom o geometrijskim objektima. S vremenom, briljantni mislioci su dokazali sve širi skup istinitih tvrdnji. Čak i danas, matematičari provode ceo svoj život prikupljajući brojne istinite tvrdnje koje se mogu matematički dokazati. Ali u Bebiđdovoj eri počeli su da postavljaju još fundamentalnije pitanje: da li je matematika celovita? Da li pravila matematike osiguravaju da se svaka istinita tvrdnja može dokazati, ili postoje istinite tvrdnje koje mogu izmaći najizuzetnijim umovima ljudskog roda jer, zapravo, nisu dokazive?

Godine 1900. veliki nemački matematičar David Hilbert naveo je najvažnija nedokazana matematička pitanja tog vremena, stavljajući izazov pred najveće svetske matematičare. Ovaj izuzetan skup nerešenih

pitanja tada je definisao program matematike za naredni vek, jer će se svaka od nedokazanih teorema dokazati. Tokom decenija, mladi matematičari sticali su slavu i priznanje osvajajući po neku od Hilbertovih nedovršenih teorema.

Ali tu se krila i ironija. Jedan od nerešenih problema koje je Hilbert naveo bio je drevni problem dokazivanja svih istinitih tvrdnji u matematici s datim skupom aksioma. Godine 1931. na konferenciji na kojoj je Hilbert raspravljao o svom programu, mladi austrijski matematičar Kurt Godel dokazao je da je to nemoguće.

Matematičkom zajednicom širili su se potresi. Dve hiljade godina grčkog razmišljanja bilo je sasvim i nepovratno urušeno. Matematičari širom sveta bili su u potpunoj neverici. Morali su se pomiriti s činjenicom da matematika nije savršen, uredan, kompletan i dokučiv skup teorema kako su Grci nekad zacrtali. Čak je i matematika, temelj za razumevanje fizičkog sveta oko nas, bila neuređena i nepotpuna.

Alan Tjuring: pionir računarske nauke

Nekoliko godina kasnije, jedan mladi engleski matematičar, zaintrigiran Gedelovom čuvenom teoremom o nepotpunosti, našao je genijalan način da preformuliše čitavo pitanje. To je za sva vremena promenilo sver računarske nauke.

Tjuringov izuzetan talent se vrlo rano ispoljio. Upravnica u njegovoj osnovnoj školi napisala je da „među učenicima ima pametnih i vrednih dečaka, ali Alan je genije“. Kasnije će biti poznat kao otac računarske nauke i veštačke inteligencije.

Tjuring je bio odlučan da ovlada matematikom uprkos oštrom protivljenju i teškoćama. U školi su, zapravo, aktivno pokušavali da ga obeshrabre u njegovom interesovanju za nauku, navodeći da „gubi vreme u javnoj školi“. Ali to protivljenje samo je ojačalo njegovu odlučnost. Kad je imao četrnaest godina, zbog generalnog štrajka je bio zatvoren veći deo zemlje, ali on je, željan da bude u školi, prešao šezdeset milja biciklom kako bi bio u razredu kad se škola ponovo otvori.

Umesto da gradi sve složenije mašine za sabiranje poput Bebiždove diferencijalne mašine, Alan Tjuring je sebi postavio drugačije pitanje: da li postoji matematičko ograničenje u onome što mehanički računar može da izvede?

Drugim rečima, može li računar sve da dokaže?

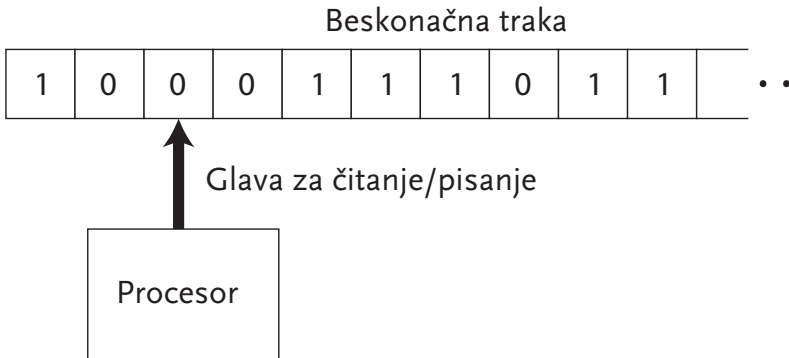
Da bi odgovorio na to pitanje, morao je da uvede rigoroznost u oblast računarske nauke koja je pre toga predstavljala labav spoj nespojivih ideja i pronalazaka ekscentričnih inženjera. Nije postojao sistematski način da se istraže pitanja poput ograničenja za ono što je obradivo. Tako je 1936. godine uveo koncept onoga što je danas poznato kao univerzalna Tjuringova mašina, varljivo jednostavnog uređaja koji je obuhvatao suštinu računarstva, omogućavajući čitavoj oblasti da se postavi na čvrstu matematičku osnovu. Danas su Tjuringove mašine temelj svih modernih računara. Sve, od velikih superračunara u Pentagonu do mobilnog telefona u vašem džepu, primeri su Tjuringovih mašina. Nije preterano reći da je gotovo celo savremeno društvo izgrađeno na Tjuringovim mašinama.

Tjuring je zamislio beskonačno dugačku traku koja sadrži niz kvadrata ili ćelija. Unutar svakog kvadrata mogli ste staviti 0, 1 ili ostaviti prazno polje.

Potom bi procesor čitao traku, a dozvoljeno mu je bilo da obavlja samo šest jednostavnih operacija. U suštini, mogli ste da zamenite 0 sa 1 ili obrnuto, i pomerite procesor za jedan kvadrat ulevo ili udesno. Mogli ste:

1. pročitati broj u kvadratu
2. upisati broj u kvadrat
3. pomeriti se za jedan kvadrat ulevo
4. pomeriti se za jedan kvadrat udesno
5. promeniti broj u kvadratu
6. ili se zaustaviti

(Tjuringova mašina napisana je binarnim jezikom, a ne sistemom sa osnovom 10. Na binarnom jeziku, broj jedan je predstavljen sa 1,



Slika 2: Tjuringova mašina

Tjuringova mašina se sastoji od (a) beskonačno duge ulazne digitalne trake, (b) izlazne digitalne trake i (c) procesora koji pretvara ulazne informacije u izlazne prema zadatom skupu pravila. To je osnova svih modernih digitalnih računara.

broj dva sa 10, broj tri sa 11, broj četiri sa 100 itd. Postoji i memorija u kojoj se mogu čuvati brojevi.) Izlazni rezultat koji daje procesor je brojčani.

Drugim rečima, Tjuringova mašina može jedan broj pretvoriti u drugi prema preciznim naredbama u softveru. Tako je Tjuring sveo matematiku na igru: sistematskim zamenjivanjem 0 sa 1 i obrnuto, mogla je da se kodira čitava matematika.

U radu u kom je izložio ove ideje, Tjuring je naveo sažet skup uputstava pomoću kojih se njegova mašina može koristiti za obavljanje svih aritmetičkih radnji – tj. mogla je da sabira, oduzima, množi i deli. Zatim je iskoristio taj rezultat da reši neke od najtežih problema u matematici, redefinišući sve iz perspektive izračunljivosti. Čitava matematika ponovo je ispisana kroz prizmu računanja.

Primeru radi, pokažimo kako se na Tjuringovoj mašini izvodi $2 + 2 = 4$, što prikazuje kako se može kodirati čitava aritmetika. Pokrenite traku sa ulaznim brojem dva, tj. 010. Zatim se pomerite na srednju ćeliju, gde je 1, i zamenite tu vrednost sa 0. Nakon toga, pomerite se jedan korak ulevo, gde se nalazi 0 i zamenite to sa 1. Traka sada sadrži 100, što je jednako četiri. Uopštavanjem ovih naredbi, može se izvesti bilo koja operacija, uključujući sabiranje, oduzimanje i množenje. S malo doterivanja, brojevi se mogu i deliti.

Tjuring je zatim sebi postavio jednostavno, ali važno pitanje: da li se čuvena Gedelova teorema o nepotpunosti, koja se oslanja na višu matematiku, može dokazati pomoću Tjuringove mašine, koja je bila mnogo jednostavnija, ali je i dalje odražavala suštinu matematike?

Tjuring je krenuo od toga šta znači „izračunljivo“. U suštini, rekao je da je teorema izračunljiva ako se može dokazati za konačno vreme pomoću Tjuringove mašine. Ako teorema zahteva beskonačno vreme Tjuringove mašine, tada, praktično nije izračunljiva i ne znamo da li je tačna ili nije. Sledi da ne bi bila dokaziva.

Jednostavno rečeno, Tjuring je potom pitanje koje je postavljeno u Gedelovom radu sažeo na sledeći način: kada je dat skup aksioma, da li postoje istinite tvrdnje koje se ne mogu izračunati za konačno vreme pomoću Tjuringove mašine?

Tjuring je, poput Gedela, pokazao da je odgovor potvrđan.

Još jednom, ovo je srušilo drevni san o dokazivanju potpunosti matematike, ali na način koji je bio intuitivan i jednostavan. To je značilo da se, čak i s najmoćnijim računarom na svetu, sve istinite tvrdnje u matematici nikada ne mogu dokazati za konačno vreme s datim skupom aksioma.

Računari u ratu

Jasno je da se Tjuring dokazao kao vrhunski matematički genije. Ali njegovo istraživanje omeo je Drugi svetski rat. Da bi doprineo ratnim naporima, Tjuring je regrutovan da obavlja strogo poverljive poslove u britanskom vojnom centru u Blečli Parku u okolini Londona. Tamo je bio deo tima zaduženog za dešifrovanje tajnih nacističkih kodova. Nacistički naučnici napravili su mašinu po imenu Enigma. Enigma je poruku pretvarala u kôd koji se nije mogao razbiti, a zatim je tako šifrovanu slala nacističkoj ratnoj mašineriji u raznim krajevima sveta. Kodirana su najosetljivija uputstva: ratni planovi nacističke vojske, posebno mornarice. Konačna sudbina civilizacije mogla je da zavisi od razbijanja koda Enigme.

Tjuring i njegove kolege uhvatili su se ukoštac sa ovim ključnim problemom; osmislili su računarske mašine koje bi mogle sistematski da razbiju te neprobojne kodove. Prvi proboj načinili su konstruišući „bombu“ koja je, na izvestan način, nalikovala Bebiždovom diferencijalnom motoru. Umesto da se koristi para za pokretanje mehanizma, kao kod prethodnih mašina, čije zupčanike je bilo teško napraviti, a uz to su bili spori i često su se zaglavljivali, bomba se oslanjala na rotore, bubnjeve i releje, pokretane električnom energijom.

Ali Tjuring je bio uključen i u drugi projekat, Kolos, s još genijalnijim dizajnom. Istoričari veruju da je to bio prvi *programabilni digitalni elektronski računar na svetu*. Umesto mehaničkih delova kao što je diferencijalni motor ili bomba, koristili su vakuumske cevi, koje mogu da šalju električne signale bezmalo brzinom svetlosti. Vakuumske cevi mogu se uporediti sa ventilima koji kontrolišu protok vode. Okretanjem malog ventila, može se zaustaviti voda koja teče u mnogo većoj cevi ili pustiti da teče nesmetano. To, zapravo, može da se iskaže kao 0 ili 1. Dakle, sistem vodovodnih cevi i ventila može da predstavlja digitalni računar, pri čemu je voda porediva sa protokom struje. U mašinama u Blečli Parku, veliki niz vakuumskih cevi mogao je da izvodi digitalne proračune neverovatnim brzinama, uključujući ili isključujući protok struje u vakuumskim cevima. Tako je, zahvaljujući radu Tjuringa i drugih, analogni računar zamenjen digitalnim. Jedna verzija Kolosa sadržala je 2400 vakuumskih cevi i zauzimala je celu sobu.

Pored toga što su brži, digitalni računari imaju još jednu veliku prednost nad analognim sistemima. Zamislite da koristite kancelarijski fotokopir-aparat da biste umnožili sliku. Kad god pravite kopiju slike, gubite deo informacija. Ako pravite jednu za drugom kopije slike, one će biti sve bleđe i bleđe dok slika potpuno ne iščezne. Analogni signali su, dakle, skloni greškama svaki put kad se slika kopira.

(Umesto toga, digitalizujte sliku tako da postane niz nula i jedinica. Kada prvi put digitalizujete sliku, izgubićete deo informacija. Međutim, digitalna poruka može se iznova kopirati, a u svakom navratu gubi

se veoma malo informacija. Tako digitalni računari mogu biti znatno tačniji od analognih.)

(Osim toga, digitalne signale je lako urediti. Analogne signale je, poput slike, izuzetno teško menjati. Ali digitalni signali se mogu izmeniti pritiskom na dugme, pomoću jednostavnih matematičkih algoritama.)

Pod ogromnim pritiskom zbog ratnih okolnosti, Tjuring i njegov tim negde 1942. godine napokon su uspeli da dešifruju nacistički kôd, što je doprinelo porazu nacističke mornarice na Atlantiku. Ubrzo su saveznici razotkrili najstrože čuvane tajne planove nacističke vojske. Saveznici su mogli da prisluškuju nacističke naredbe vojsci i da preduprede njihove ratne planove. Kolos je završen 1944. godine, na vreme za invaziju Normandije, za koju se nacisti nisu pripremili kako treba. Time je zapečaćena sudbina nacističkog carstva.

Ovo su bila otkrića monumentalnih razmera, od kojih su neka ovekovječena u filmu *Igra kodova* iz 2014. godine. Bez ključnih dostignuća Tjuringove ekipe, rat je mogao da traje godinama, stvarajući neizmernu nesreću i patnju. Istoričari poput Harija Hinslija procenjuju da je rad Tjuringa i saradnika u Blečli Parku skratio rat za oko dve godine i spasao preko 14 miliona života. Mapa sveta i životi nebrojeno mnogo nevinih ljudi nepovratno su izmenjeni njegovim pionirskim radom.

U SAD, radnici koji su izgradili atomske bombe slavljani su kao heroji rata i čudotvorci, ali Tjuringa je zadesila drugačija sudbina u Velikoj Britaniji. Zbog zakona o tajnosti državnih poslova, njegova dostignuća su decenijama bila nedostupna javnosti, pa niko nije znao za njegov ogroman doprinos ratnim naporima.

Tjuring i stvaranje veštačke inteligencije

Nakon rata, Tjuring se vratio starom problemu koji ga je intrigirao još u mladosti: veštačkoj inteligenciji. Godine 1950. svoj presudni rad na tu temu započeo je rečima: „Predlažem da razmotrimo pitanje: mogu li mašine da misle?“

Ili, drugim rečima, da li je mozak neka vrsta Tjuringove mašine?

Bio je umoran od svih filozofskih rasprava koje su se protezale vekovima o značenju svesti, duše i tome šta nas čini ljudima. Na kraju krajeva, sve te diskusije su bile besmislene, mislio je, jer nije postojao definitivan test ili merilo za svest.

Tako je Tjuring osmislio čuveni test koji je dobio ime po njemu. Stavite čoveka u jednu zapečaćenu sobu, a robota u drugu. Dozvoljeno vam je da dostavite svakome bilo koje pisano pitanje i da pročitate njihove odgovore. Izazov je bio da odredite u kojoj sobi je čovek. Ovaj test nazvao je igra imitacije.

U svom radu je napisao: „Verujem da će za oko pedeset godina biti moguće programirati računare, sa kapacitetom skladištenja od oko 10^9 , da igru imitacije izvode tako dobro da prosečan ispitivač neće imati više od 70 posto šanse da identifikuje ko je ko nakon pet minuta ispitivanja.“

Tjuringov test zamenjuje beskrajne filozofske debate jednostavnim, ponovljivim ispitivanjem koje daje prost odgovor – „da“ ili „ne“. Za razliku od filozofskog pitanja, za koje često nema odgovora, ovaj test je odlučiv.

Štaviše, on zaobilazi sklisko pitanje „razmišljanja“ pukim poređenjem sa onim što ljudi mogu da rade. Nema potrebe da se definiše šta podrazumevamo pod „svešću“, „mišljenjem“ ili „inteligencijom“. Drugim rečima, ako nešto izgleda i ponaša se kao patka, onda možda *jest* patka, bez obzira na to kako definišete patku. Tjuring je dao operativnu definiciju inteligencije.

Nijedna mašina do sada nije bila u stanju da dosledno prolazi Tjuringov test. Svakih nekoliko godina na naslovnim stranama osvanu vesti o izvođenju Tjuringovog testa, ali su procenjivači svaki put u stanju da razlikuju čoveka od mašine, čak i ako je mašini dozvoljeno da laže i izmišlja činjenice.

Međutim, jedan nesrećan incident će naglo prekinuti sav Tjuringov revolucionarni rad.

Godine 1952. neko je provalio u Tjuringov dom. Kada je policija došla da obavi uviđaj, našla je dokaze da je Tjuring homoseksualac.

Zbog toga je bio uhapšen i osuđen prema Dopuni krivičnog zakona iz 1885. godine. Kazna je bila prilično oštra. Dali su mu da bira između odlaska u zatvor ili hormonskog tretmana. Kad je izabrao ovo drugo, dali su mu stilbestrol, sintetički oblik ženskog polnog hormona estrogena, što je dovelo do toga da mu porastu grudi i postane impotentan. Kontroverzni tretmani su trajali godinu dana. Nakon toga, našli su ga mrtvog u njegovoj kući. Umro je od smrtonosne doze cijanida. Prijavljeno je da je pored njega bila napola pojedena zatrovana jabuka – neki kažu da je njome počinio samoubistvo.

Tragično je što je jednog od tvoraca računarske revolucije, čoveka koji je pomogao da se spasu milioni života i da se pobedi fašizam, na izvestan način uništila njegova sopstvena zemlja.

Ali njegovo nasleđe živi u svakom digitalnom računaru na planeti. Danas, svaki računar na svetu duguje svoju arhitekturu Tjuringovoj mašini. Svetska ekonomija zavisi od pionirskog rada ovog čoveka.

Ipak, ovo je samo početak naše priče. Tjuringov rad zasnovan je na determinizmu, tj. ideji da je budućnost unapred određena. To znači da ako Tjuringovoj mašini zadate problem, svaki put ćete dobiti isti odgovor. U tom smislu, sve je predvidivo.

Dakle, ako bi kosmos bio Tjuringova mašina, svi budući događaji bili bi određeni u trenutku kada je stvaranja kosmosa.

Ali druga revolucija u našem razumevanju sveta mogla bi da opovrgne ovu ideju. Determinizam bi bio zbačen s trona. Na isti način na koji su Gedel i Tjuring pomogli da se pokaže da je matematika nepotpuna, računari budućnosti će možda morati da se bave fundamentalnom neodređenošću koju uvodi fizika.

Matematičari bi se, onda, usredsredili na drugačije pitanje: da li je moguće napraviti kvantnu Tjuringovu mašinu?