

DE KWANTUM HEERSCHAPPIJ

Hoe de nieuwe computer alles verandert

Michio Kaku

Vertaald door Erick Vermeulen

Noordboek

*Voor mijn liefhebbende vrouw Shizue en
mijn dochters, dr. Michelle Kaku en Alyson Kaku*

© 2025 uitgeverij Noordboek

Oorspronkelijke titel:

***Quantum Supremacy – How the Quantum
Computing Revolution Will Change Everything***

© 2023 by Michio Kaku, published by Doubleday,
a division of Penguin Random House LLC, New York

Vertaling: Erick Vermeulen

Omslagontwerp: Mijke Wondergem

Boekverzorging: Sagor | Doortje Gorissen

ISBN 978 94 6471 334 3

NUR 910

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van uitgeverij Noordboek, Hellingbaas 1, 8401 JH Gorredijk, Nederland – info@noordboek.nl.

De uitgeverij stelt alles in het werk om op milieuvriendelijke en duurzame wijze met natuurlijke bronnen om te gaan. Bij de productie van dit boek is gebruikgemaakt van papier dat het keurmerk van de Forest Stewardship Council (fsc) mag dragen. Bij dit papier is het zeker dat de productie niet tot bosvernietiging heeft geleid.

Noordboek is onderdeel van
20 leafdesdichten en in liet fan wanhoop bv

www.noordboek.nl

Inhoud

DEEL I De opkomst van kwantumcomputers 7

- 1 Het einde van het Siliciumtijdperk 9
- 2 Het einde van het digitale tijdperk 33
- 3 De opkomst van het kwantum 51
- 4 De dageraad van kwantumcomputers 75
- 5 Het startschot heeft geklonken 107

DEEL II Kwantumcomputers en samenleving 121

- 6 De oorsprong van het leven 123
- 7 De vergroening van de wereld 139
- 8 De planeet voeden 151
- 9 Energie voor de wereld 163

DEEL III Kwantumgeneeskunde 175

- 10 Kwantumgezondheid 177
- 11 Genbewerking en kanker genezen 191
- 12 AI en kwantumcomputers 213
- 13 Onsterfelijkheid 237

DEEL IV Modelleren van de wereld en het heelal 261

- 14 Klimaatverandering 263
- 15 De zon in een fles 279
- 16 Het heelal simuleren 297
- 17 Een dag in het jaar 2050 325

Epiloog: Kwantumpuzzels 335

Dankwoord 349

Noten 351

Verder lezen 361

Bronvermelding illustraties 362

Trefwoordenregister 363

Over de auteur 389

DEEL I

De opkomst van kwantum- computers

Het einde van **het** **Siliciumtijdperk**

Er is een revolutie op komst.

In 2019 en 2020 brachten twee sensationele mededelingen de wetenschappelijke wereld in beroering. Twee onderzoeksgroepen maakten bekend dat ze kwantumsuperioriteit hadden bereikt, het mythische punt waarop een radicaal nieuw type computer, de kwantumcomputer, bij bepaalde taken een gewone digitale supercomputer overtuigend kon overtreffen. Dat voorspelde een omwenteling die het volledige computerlandschap kan veranderen en elk aspect van ons dagelijks leven kan laten kantelen.

Allereerst onthulde Google dat hun Sycamore-kwantumcomputer in 200 seconden een wiskundig probleem kon oplossen waar de snelste supercomputer ter wereld 10.000 jaar over zou doen. Volgens *Technology Review*, een tijdschrift van MIT, noemde Google het een grote doorbraak, te vergelijken met de lancering van de Spoetnik of de eerste gemotoriseerde vlucht door de gebroeders Wright. Het was 'de drempel van een nieuw tijdperk van machines die de krachtigste computers van vandaag doen lijken op een telraam'.

Daarop ging het Quantum Innovation Institute van de Chinese academie van wetenschappen nog een stap verder. Ze beweerden dat hun kwantumcomputer honderd biljoen maal sneller dan een gewone supercomputer was.

Bob Sutor, de vicepresident van IBM, reageerde op deze stormachtige opkomst van kwantumcomputers. Hij zei onomwonden: 'Ik

denk dat het de allerbelangrijkste computertechnologie van deze eeuw gaat worden.’

Kwantumcomputers zijn wel ‘de ultieme computers’ genoemd, een baanbrekende technologische sprong vooruit met vergaande gevolgen voor de gehele wereld. In plaats van te rekenen met kleine transistoren rekenen ze met de kleinst mogelijke voorwerpen, de atomen zelf, en kunnen daarmee gemakkelijk de rekenkracht van onze grootste supercomputer overtreffen. Kwantumcomputers zouden weleens een compleet nieuw tijdperk voor de economie, de samenleving en onze manier van leven kunnen inluiden.

Kwantumcomputers vormen echter meer dan zo maar een volgende krachtige computergeneratie. Ze zijn een nieuw computertype dat problemen kan oppakken die digitale computers nooit kunnen oplossen, zelfs niet als ze daarvoor eeuwig de tijd hebben. Digitale computers kunnen bijvoorbeeld nooit precies berekenen hoe atomen met elkaar belangrijke chemische reacties uitvoeren, vooral die reacties die het leven mogelijk maken. Digitale computers kunnen alleen maar rekenen op een digitale band, bestaande uit een reeks nullen en enen, en dat is te grof voor het beschrijven van de subtiele golven van elektronen die diep binnenin een molecuul ronddansen. Bij bijvoorbeeld het omslachtige berekenen van de routes die een muis in een doolhof kan afleggen, moet een digitale computer nauwgezet alle mogelijke routes één voor één analyseren. Een kwantumcomputer analyseert echter *simultaan* alle mogelijke routes tegelijkertijd, met de snelheid van het licht.

Dat verhoogde de intense rivaliteit tussen de wedijverende computerreuzen. Ze doen allemaal mee aan een wedloop om de krachtigste kwantumcomputer per wereld te maken. In 2021 onthulde IBM zijn eigen kwantumcomputer, de Eagle genoemd, die de koppositie innam met meer rekenkracht dan alle eerdere modellen.

Deze records zijn echter als suikerkorstjes op de crème brûlée – bedoeld om te breken.

Gegeven de diepgaande betekenis van deze revolutie is het niet verrassend dat de toonaangevende bedrijven op deze wereld zwaar

in de nieuwe technologie hebben geïnvesteerd. Google, Microsoft, Intel, IBM, Rigetti en Honeywell bouwen allemaal prototypen van kwantumcomputers. De leiders in Silicon Valley beseffen dat ze deze revolutie moeten bijhouden of anders in het stof moeten bijten.

IBM, Honeywell en Rigetti Computing hebben hun eerste generatie kwantumcomputers op het internet gezet, zodat het nieuwsgierige publiek kan watertanden en mensen hun eerste directe ervaring met kwantumcomputing kunnen opdoen. Je kunt deze nieuwe kwantumrevolutie uit de eerste hand ervaren door via internet contact te leggen met een kwantumcomputer. Zo stelt de 'IBM Q Experience', gelanceerd in 2016, via internet vijftien kwantumcomputers gratis beschikbaar voor het publiek. Samsung en JPMorgan Chase behoren tot de gebruikers. Al meer dan tweeduizend mensen, van schoolkinderen tot hoogleraren, gebruiken ze maandelijks.

Wall Street heeft veel interesse in deze technologie. IonQ werd in 2016 het eerste grote kwantumcomputerbedrijf dat naar de beurs ging, en haalde bij de beursgang 600 miljoen Amerikaanse dollar op. Nog opzienbarender was dat de rivaliteit zo hevig is dat een nieuwe startup, PsiQuantum, zonder dat het bedrijf een commercieel prototype op de markt had of enig bewezen succes met eerdere producten, plotseling een hoge vlucht nam op Wall Street, naar een waardering van 3,1 miljard Amerikaanse dollar. Het bedrijf wist binnen een dag 665 miljoen Amerikaanse dollar aan investeringen binnen te halen. Bedrijfsanalisten schreven dat ze zelden zoiets hadden gezien, een nieuw bedrijf dat op de stroom van koortsachtige speculatie en sensationele krantenkoppen tot zulke enorme hoogten stijgt.

Deloitte, de internationale zakelijke en financiële dienstverlener, schat dat de markt voor kwantumcomputers nog dit decennium een omvang van honderden miljoenen Amerikaanse dollars zal bereiken en dat die in de komende jaren dertig zal stijgen naar tientallen miljarden Amerikaanse dollars. Niemand weet wanneer de kwantumcomputers de commerciële markt zullen betreden en het

economische landschap zullen veranderen. Voorspellingen worden in ieder geval voortdurend herzien om de ongekende snelheid van wetenschappelijke ontdekkingen op dit gebied bij te houden. Christopher Savoie, destijds bestuursvoorzitter van Zapata Computing, zei toen hij het had over de stormachtige opkomst van kwantumcomputers dat ‘het niet langer een kwestie is van of maar van wanneer’.

Zelfs het Congres van de Verenigde Staten heeft grote interesse getoond en draagt bij aan een vliegende start van deze nieuwe kwantumtechnologie. In de wetenschap dat andere landen al royaal onderzoek aan kwantumcomputers hadden gefinancierd, nam het Amerikaanse congres in december 2018 de National Quantum Initiative Act aan, die startkapitaal moest opleveren om nieuw onderzoek te helpen aanwakken. De wet voorzag in de vorming van twee tot vijf nieuwe National Quantum Information Science Research Centers, met elk een jaarbudget van tachtig miljoen Amerikaanse dollar.

In 2021 kondigde de Amerikaanse overheid nog een investering in kwantumtechnologieën aan van 625 miljoen Amerikaanse dollar, onder toezicht van het United States Department of Energy, het Amerikaanse ministerie voor energie. Grote bedrijven, waaronder Microsoft, IBM en Lockheed Martin, droegen nog eens 340 miljoen Amerikaanse dollar extra bij aan dit project.

China en de VS zijn niet de enige landen die overheidsfondsen gebruiken om deze technologie te versnellen. De overheid van het Verenigd Koninkrijk laat nu het National Quantum Computing Centre bouwen, dat een middelpunt voor onderzoek aan kwantumcomputers moet vormen. Het moet worden gebouwd in Oxfordshire, als onderdeel van de Harwell Science and Innovation Campus. Aangemoedigd door de overheid waren er eind 2019 dertig kwantumcomputerstartups opgericht in het VK.

Industrieanalisten zien in dat het een gok met biljoenen Amerikaanse dollars is. Er zijn geen garanties in dit zeer concurrerende veld. Ondanks de indrukwekkende technische prestaties die Goog-

le en andere bedrijven in de afgelopen jaren hebben geleverd, ligt een werkzame kwantumcomputer die werkelijke problemen kan oplossen nog steeds vele jaren in het verschiet. Er moet nog een enorme berg noeste arbeid worden verzet. Sommige critici beweren zelfs dat het een hopeloze onderneming is, een zoektocht naar de heilige graal. Computerbedrijven beseffen echter dat tenzij ze een voet tussen de deur krijgen, die voor hen weleens in het slot kan vallen.

Ivan Ostojic, een partner van organisatieadviesbureau McKinsey, zegt: 'Bedrijven in de industrieën waar kwantum de grootste mogelijkheden heeft om de boel volledig te ontwrichten, zouden zich nu meteen met kwantum moeten bemoeien.' Gebieden zoals chemie, geneeskunde, olie en gas, vervoer, logistiek, bankwezen, farmacie en cyberveiligheid zijn rijp voor een grote verandering. Hij voegt daaraan toe: 'In principe zal kwantum relevant zijn voor alle informatietechnologiedirecteuren omdat het oplossingen voor een breed scala aan problemen zal versnellen. Die bedrijven moeten zich kwantumvaardigheid eigen maken.'

Vern Brownell, voormalig bestuursvoorzitter van het Canadese kwantumcomputerbedrijf D-Wave Systems, merkt op: 'We geloven dat we precies op het keerpunt zitten voor het leveren van mogelijkheden die je met de klassieke informatica niet kunt verkrijgen.'

Veel wetenschappers geloven dat we nu een volledig nieuw tijdperk betreden, waarbij schokgolven optreden die we kunnen vergelijken met degene die volgden op de introductie van de transistor en de microchip. Bedrijven zonder enige directe banden met de computerproductie, zoals automobielgigant Daimler, eigenaar van Mercedes-Benz, investeren al in deze nieuwe technologie. Ze voelen aan dat kwantumcomputers de weg kunnen plaveien naar nieuwe ontwikkelingen in hun eigen industrie. Julius Marcea, een kaderlid bij rivaal BMW, schreef: 'Met enthousiasme onderzoeken we het hervormingsvermogen van kwantumcomputing voor de automobiellindustrie en we zijn vastberaden om de grenzen van technische prestaties te verleggen.' Andere grote bedrijven, zoals Volkswagen

en Airbus, hebben hun eigen kwantumcomputerafdelingen opgericht om te verkennen hoe kwantumcomputers een revolutie in hun activiteiten kunnen ontketenen.

Farmaceutische bedrijven kijken ook aandachtig naar de ontwikkelingen in het vakgebied. Ze beseffen dat kwantumcomputers mogelijk simulaties van ingewikkelde chemische en biologische processen kunnen uitvoeren die ver buiten het vermogen van digitale computers liggen. Enorme faciliteiten die zijn gewijd aan het testen van miljoenen geneesmiddelen kunnen ooit worden vervangen door ‘virtuele laboratoria’ die geneesmiddelen in de cyberruimte testen. Sommigen vreesden zelfs dat ze ooit scheikundigen zouden kunnen vervangen. Maar Derek Lowe, die een blog over geneesmiddelenonderzoek bijhoudt, zegt: ‘Het zijn niet de machines die de scheikundigen gaan vervangen. Het zijn de scheikundigen die de machines gebruiken die de plaats innemen van diegenen die dat niet doen.’

De Large Hadron Collider, nabij het Zwitserse Genève, is het grootste wetenschappelijke apparaat ter wereld. Daarin botsen protonen op elkaar met een energie van 14 biljoen elektronvolt om de omstandigheden in het jonge heelal te herscheppen. Daar worden kwantumcomputers nu ingezet om de meer dan een biljoen bytes aan meetgegevens te analyseren die ontstaan bij ongeveer een miljard deeltjesbotsingen. Misschien zullen kwantumcomputers ooit de geheimen van het ontstaan van het heelal ontrafelen.

Kwantumsuperioriteit

Toen in 2012 de natuurkundige John Preskill van het California Institute of Technology (Caltech) als eerste de term ‘kwantumsuperioriteit’ gebruikte, schudden vele wetenschappers het hoofd. Het zou tientallen jaren of misschien wel eeuwen duren, zo dachten ze, voordat kwantumcomputers een digitale computer zouden kunnen overtreffen. Het rekenen op afzonderlijke atomen in plaats van in

een plakje silicium werd immers als een duivelse moeilijkheid beschouwd. De geringste trilling of ruis kan de delicate dans van de atomen in een kwantumcomputer verstoren. Dankzij de verbluffende bekendmakingen van kwantumsuperioriteit liggen de sombere voorspellingen van de doemdenkers echter vooralsnog aan gort. De zorgen verschuiven nu naar hoe snel het vakgebied zich ontwikkelt.

De schokken veroorzaakt door deze opmerkelijke prestaties hebben ook bestuurskamers en zeer geheime veiligheidsdiensten rondom de wereld in beroering gebracht. Documenten die zijn gelekt door klokkenluiders laten zien dat de CIA en de Amerikaanse nationale veiligheidsdienst NSA de ontwikkelingen in het vakgebied op de voet volgen. De reden is dat kwantumcomputers zo krachtig zijn dat ze in principe alle bekende cyberversleutelingen zouden kunnen breken. Dat houdt in dat de geheimen die overheden zorgvuldig bewaren, de kroonjuwelen met hun meest gevoelige informatie, kwetsbaar voor aanvallen worden. Dat geldt ook voor de best bewaarde geheimen van bedrijven en zelfs individuen. De situatie is zo dringend dat NIST, het Amerikaanse nationale instituut voor standaarden en technologie, dat zowel standaarden vastlegt als innovatie en industrieel concurrentievermogen bevordert, onlangs richtlijnen heeft uitgegeven om grote bedrijven en instellingen te helpen plannen te maken voor de onvermijdelijke overgang naar dit nieuwe tijdperk. NIST heeft al aangekondigd dat het verwacht dat tegen 2029 kwantumcomputers de 128-bits-AES-encryptie zullen kunnen kraken, een versleuteling die door veel bedrijven wordt gebruikt.

In het tijdschrift *Forbes* schrijft Ali El Kaafarani, een Britse wetenskapkundige en cyberveiligheidsexpert: 'Dat is een nogal angstwekkend vooruitzicht voor elke organisatie die gevoelige informatie moet beschermen.'

China heeft tien miljard Amerikaanse dollar uitgegeven aan zijn National Laboratory for Quantum Information Sciences omdat het vastbesloten is om de leidende positie te verwerven in dit cruciale,

zich snel ontwikkelende vakgebied. Landen geven tientallen miljarden uit om angstvallig hun geheime codes te beschermen. Het is voorstelbaar dat een hacker gewapend met een kwantumcomputer zou kunnen inbreken in *elke* digitale computer op de planeet. Alle gevoelige informatie zou aan de hoogste bidder kunnen worden aangeboden. Financiële markten zouden in tumult kunnen ont-aarden als kwantumcomputers in het heilige hart van Wall Street inbreken. Kwantumcomputers zouden ook de blockchain kunnen ontgrendelen, met als gevolg chaos op de bitcoinmarkt. Deloitte heeft berekend dat ongeveer 25 procent van de bitcoins mogelijk kwetsbaar is voor het hacken door een kwantumcomputer.

Degenen die blockchainprojecten hebben opgezet, zullen waarschijnlijk een nerveuze blik werpen op de vooruitgang in kwantum-computing', concludeert een rapport van CB Insights, een IT-bedrijf in datasoftware.

Wat op het spel staat is dus niets minder dan de wereldeconomie, die de digitale technologie immers stevig heeft omarmd. Banken op Wall Street gebruiken computers voor het volgen van overschrijvingen van biljoenen Amerikaanse dollars. Ingenieurs ontwerpen met computers wolkenkrabbers, bruggen en raketten. Kunstenaars zijn afhankelijk van computers voor de animatie van Hollywoodkaskrakers. Farmaceutische bedrijven gebruiken computers voor de ontwikkeling van hun volgende wondermiddel. Kinderen hebben hun computers nodig om met hun vrienden het nieuwste computerspel te spelen. En we zijn sterk afhankelijk geworden van smartphones, die ons onmiddellijk nieuws over onze vrienden, collega's en verwanten geven. We hebben allemaal weleens ervaren hoe de paniek toesloeg toen we onze mobiele telefoon niet konden vinden. In feite is het erg moeilijk om enige menselijke activiteit te noemen die niet door computers ondersteboven is gekeerd. We zijn zo afhankelijk van computers dat als op een of andere manier alle computers in de wereld er opeens mee zouden ophouden, de samenleving abrupt in chaos zou verkeren. Dat is waarom wetenschappers de ontwikkeling van kwantumcomputers zo aandachtig volgen.

Het einde van de wet van Moore

Wat wakkert al deze chaos en controverse aan?

De opkomst van kwantumcomputers is een teken dat het Silicium-tijdperk geleidelijk aan op zijn eind loopt. De afgelopen halve eeuw volgde de explosieve groei van rekenkracht de wet van Moore, genoemd naar Gordon Moore, een van de oprichters van Intel. De wet van Moore stelt dat computerkracht elke achttien maanden verdubbelt. Deze bedrieglijk eenvoudige wet beschrijft de opmerkelijke exponentiële toename van rekenkracht, ongeëvenaard in de menselijke geschiedenis. Er is geen andere uitvinding die in een zo korte periode een zo diepgaande invloed heeft gehad.

Computers hebben in hun geschiedenis vele stadia doorlopen; elke keer nam hun rekenkracht enorm toe en veroorzaakte dat grote maatschappelijke veranderingen. We kunnen de wet van Moore in feite doortrekken tot in de negentiende eeuw, het tijdperk van de mechanische computers. Destijds gebruikten werktuigbouwkundigen draaiende cilinders, tandwielen, kamwielen en raderwerken om eenvoudige rekenkundige bewerkingen uit te voeren. Rond de eeuwwisseling begonnen die rekenmachines elektriciteit te gebruiken, en raderwerk werd vervangen door relais en kabels. Tijdens de Tweede Wereldoorlog gebruikten computers enorme arsenalen aan vacuümbuizen voor het kraken van geheime overheidsberichten. Na die oorlog volgde de overgang van vacuümbuizen naar transistoren, en die laatste konden worden verkleind tot een microscopisch formaat, wat de voortdurende vooruitgang in snelheid en rekenkracht mogelijk maakte.

In de jaren vijftig konden mainframecomputers alleen maar worden aangeschaft door grote bedrijven en overheidsinstellingen, zoals het Pentagon en internationale banken. Ze waren krachtig (de ENIAC kon bijvoorbeeld in dertig seconden doen waar een mens twintig uur voor nodig had). Ze waren echter duur en lijvig, sommige besloegen een complete verdieping in een kantoorgebouw. De microchip veroorzaakte een revolutie in dit hele proces. Het for-