



VÄRT  
ATT  
VETA



Mikael Johansson

# KVANTDATORER

**MIKAEL JOHANSSON**, docent vid Helsingfors universitet, har forskat i och föreläst om kvantmekaniska effekter i kemi och biokemi i över tjugo år. På IT-centret för vetenskap, CSC, kombinerar han superdatorer och kvantdatorer med en vetenskapsrevolution i sikte, ett jobb som vid första anblicken kan te sig som ren science fiction.



Mikael Johansson

# KVANTDATORER

*Svenska litteratursällskapet i Finland, Helsingfors  
Appell Förlag, Stockholm  
2024*

# *Innehåll*

KAPITEL $ 00\rangle$ - BEGYNNELSEN	3
KAPITEL $ 01\rangle$ - KVANTEFFEKTER	13
KAPITEL $ 00\rangle$ - KVANTDATORER	26
KAPITEL $ 11\rangle$ - VAD RÄKNA?	44
LITTERATUR	60

*Till Peter som ivrigt undrar vad  
det riktigt är pappa jobbar med.*

En ny port mot det Otroliga, det  
Möjliga, en ny dag där allting kan hända  
om man inte har nånting emot det.

Tove Jansson, *Muminpappans Bravader* (1950)

## KAPITEL |00) – BEGYNNELSEN

Kvantdatorer. Redan ordet i sig låter fascinerande, som en apparat ur en avlägsen framtid. Också deras funktionsprincip är som tagen ur en science fiction-berättelse. Kvantdatorer fungerar nämligen på ett helt annorlunda sätt än de datorer vi använder till vardags. En kvantdator utnyttjar de grundläggande fysikaliska principerna som hela vårt universum baserar sig på: kvantmekanikens lagar.

Vår omgivning följer den klassiska fysikens regler. Allt omkring oss förändras på ett i princip fullständigt förutsägbart sätt. Med tillräcklig information om nuläget kan vi räkna ut vad som kommer att ske härnäst. Om vi känner till den exakta hastigheten, riktningen och rotationen för en biljardboll vet vi om den kommer att gå i hål innan den stannar eller inte.

Men om vi tar en mycket närmare titt på biljardbordet, och zoomar in på biljardbordets minsta tråd för att se finare och finare detaljer,

kommer vi till sist, vid en förstoringsgrad på cirka en miljon, in i kvantmekanikens värld. Här är allt annorlunda. På denna pyttelilla storleksskala är verkligheten suddig, en sorts spökvärld där formerna är opåtagliga och flyktiga. Universums outgrundliga slumpmässighet gör att vi inte ens i princip kan veta vad som händer i nästa ögonblick. Vi kan som bäst endast hoppas på att komma fram med en någorlunda bra gissning.

För omkring fyrtio år sedan fick man idén att konstruera en dator med en närmast kolossal kapacitet genom att tämja denna i kvantmekaniken manifesterade naturens urkraft och tvinga de märkliga, gäckande kvanteffekterna att lyda instruktioner. Man visade att det borde vara möjligt att på finurliga sätt få universum att utföra en ofantlig mängd beräkningar samtidigt, och därmed lösa problem som man aldrig kan ta sig an med hjälp av vanliga datorer. Kvantdatorer är kulminationen av en utveckling som började långt bak i tiden, ja, egentligen från och med att människans förfäder klev ner från träden.

Flera djurarter tyr sig till fysiska hjälpmedel i sitt dagliga liv. Föga överraskande är till exempel våra närmaste släktingar, aporna, hejare på att utnyttja verktyg. Vissa apsläkten använder stenar för att bokstavligen knäcka hårda nötter. Människan är dock troligen den enda varelse på

jorden som använder sig av verktyg för att öka sin förståelse av omvärlden. Vi tycks ha ett inbyggt behov av att stilla vår nyfikenhet. Detta har lett till en mängd revolutionerande upptäckter. Nyfikenheten, kombinerad med ett intresse för att lösa problem, har förmått oss att övervinna vår rädsla för elden, konstruera hjulet, baka bröd och sända sonder till Mars.

Människan är också ett matematiskt väsen. Matematik är ett redskap av den mer abstrakta sorten, även om de första tillämpningarna var konkreta, såsom bokföring och skatteindrivning. Tidigt började matematik också användas för att stilla människans inbyggda vetgirighet. Astronomi, läran om himlakroppar och deras rörelser, anses vara världens första naturvetenskapliga inriktning, och har länge utövats också för mindre praktiska tillämpningar. För tvåtusen år sedan var det ingen som hade behov av att veta ifall jorden är universums medelpunkt, eller om den bara är en planet bland andra som kretsar kring solen. Men det stoppade inte Aristarchos från Samos från att spekulera i ämnet.

Att studera ämnen som inte direkt medför praktisk nytta kräver fritid. Flera av de tidiga vetenskapsfilosoferna var amatörer i ordets ursprungliga bemärkelse, personer med förkärlek för något. Tryggheten att tillhöra en välbärgad fa-

milj gav Platon förutsättningar för att formulera sin grottliknelse. Leonardo da Vinci levde gott genom att utföra beställningsjobb för diverse mecenater. Det gav honom möjligheten att vid sidan av sitt övriga arbete bland annat fundera på hur människan kunde tänkas flyga med hjälp av en helikopter och sedan rädda sig med en fallskärm.

Den mest kända amatörvetenskaparen i modern tid är utan tvekan Albert Einstein. Då han inte gavs möjligheten till en akademisk karriär efter sin högskoleexamen tog han i stället emot en tjänst vid patentbyrån i Bern. Han slutförde ofta raskt sina arbetsuppgifter, och fick därmed tid över för sina egna spekulationer kring fysiken. Dessa fäste han på papper, men gömde kvickt anteckningarna i sin skrivbordslåda om det fanns risk för att han skulle bli upptäckt. År 1905 publicerade han fyra vetenskapliga artiklar om sina skrivbordsfunderingar. Dessa artiklar hade en banbrytande inverkan på den moderna fysiken och förståelsen av universum. Året 1905 kallas för Einsteins *annus mirabilis*, mirakelår. Vi återkommer till Einsteins upptäckter i nästa kapitel.

Även om utövandet av naturvetenskap och naturfilosofi nu har blivit ett yrke bland andra, byggs det fortfarande på nyfikenhet. Jag vågar påstå att de vetenskapliga framstegen skulle stagnera utan nyfikenhet. För att inspiration och kreativi-



tet ska kunna flöda, behövs mer än en regelbunden – eller oregelbunden – inkomst och hårt arbete. Man måste tycka att det man håller på med är intressant och tillfredsställande. Naturligtvis kan man också motiveras av att man forskar i något som kan vara nyttigt för samhället. Einstein, i sin blygsamhet, uttryckte detta kort och koncist i ett brev:

Jag har ingen speciell talang, jag är bara passionerat nyfiken. [min övers.]

Albert Einstein (1952)

De flesta av oss har våra första matematiska verktyg ”installerade” sedan födseln. Inget annat djur har kommit på tanken att använda sina fingrar, eller tentakler, som ett yttre minne för att öka hjärnans kapacitet för matematik. Nästa steg, papper och penna, är till synes enkla men i verkligheten otroligt kraftfulla verktyg. Inga djur använder skriftspråk eller ens enkla symboler för att kommunicera eller samla sina tankar. Det närmaste man kommer är revirmarkering med hjälp av dofter, ibland kombinerat med skrapmärkning av träd, som utövas av vissa björnar.

Exakt när våra förfäder började räkna på fingrarna är okänt, men vi har en god aning om när världens första ”urdator” togs i bruk. Kulramen

utvecklades redan för fyrtusen år sedan för att underlätta bokföring när samhället utvecklades och det blev alltmer komplicerat att hålla reda på vem som ägde vad. Nu blev det effektivare och mindre felbenäget att addera 61 höns och subtrahera 1976 säckar ull.

För att kunna använda de matematiska verktygen, från fingrar till moderna datorer, måste man veta hur de används och styrs. Här kommer algoritmerna in. En algoritm kan liknas vid ett recept för hur man ska utföra en beräkning: ”för att räkna ut arean av ett fyrkantigt havrefält, multiplicerar du ena sidans längd med den andra sidans längd”. De algoritmer som körs på dagens datorer är mycket mer komplicerade, och används till stor del för underhållning: ”räkna ut hur omgivningen ser ut från sätet i en racerbil som kör 300 km/h bland husen i Monaco och rita sedan upp det på skärmen”.

Algoritmer styr dock mycket mer än vår fritidssysselsättning: de genomsyrar det moderna samhället och vår vardag. Algoritmer ligger till exempel bakom personprofilering. Strömningstjänster rekommenderar filmer baserat på vad du tittat på tidigare och nätbokhandeln berättar vad andra kunder som också köpt *Pippi Långstrump* har gillat. Finansalgoritmer bestämmer hur stor risk du utgör för banken när du ansöker om ett

lån. Algoritmer beskriver väderleksmodellen som spår solsken eller regn. På flygfältet går en algoritm igenom ditt bagage och markerar suspekt innehåll i olika färger. Bakom säkerhetskontrollen väntar flygplan vars former, linjer och motorer är designade med hjälp av algoritmer. Autopilotsalgoritmer styr sedan flygplanet största delen av resan. Algoritmer har också en massiv *indirekt* påverkan på våra liv, eftersom de ligger bakom en betydande del av både grundforskning och produktutveckling.

Det är omöjligt att utföra dessa beräkningar med papper och penna. Vi behöver avancerade datorer. Inte för att de enskilda beräkningarna skulle vara svåra, utan för att mängden beräkningar gör det ogörligt. En modern spelkonsol som kan ge upplevelsen av att köra runt en racerbana med knogarna vita, utför över 10 biljoner, alltså 10 000 miljarder beräkningar per sekund. Även om en matematiskt superbegåvad människa vore kapabel att utföra en multiplikation per sekund, skulle det ta 300 000 år att räkna ut det spelkonsolen gör på en endaste sekund.

Datorer i modern bemärkelse har sitt ursprung i 1800-talets England, där Charles Babbage utvecklade idén om en programmerbar dator. Det som gjorde den analytiska maskinen Analytical Engine till en riktig dator var att den kunde ta

beslut under beräkningens gång. Algoritmerna kunde innehålla instruktioner som var villkorliga: "Om A är mindre än noll, multiplicera A med -1." Den analytiska maskinen kunde ha revolutionerat den dåtida vetenskapen, men den byggdes aldrig färdig.

Det tog hundra år innan de första programmerbara elektroniska datorerna såg världens ljus. Drivkraften var andra världskriget. År 1943 började Colossus-datorerna i Storbritannien knäcka krypteringen på hemliga tyska meddelanden. Amerikanska ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer, elektronisk numerisk integrerare och räknare) designades 1942. Den var avsedd att räkna ut banor för nya projektiler, men blev klar först i november 1945, efter krigsslutet. Den presenterades för allmänhet och media som en maskin som hade kapacitet att lösa "ett mycket svårt krigstida problem" på två timmar – ett problem som det skulle ha tagit hundra yrkesmän ett år att lösa. Det här innebar en markant förändring i samhället överlag. För första gången ersatte datorer människan på arbetsmarknaden: sedan 1600-talet hade det engelska ordet *computer* inneburit ett yrke, någon med uppgift att utföra beräkningar.

I dagens datorer har transistorer ersatt elektronrören, som användes i Colossus och

ENIAC. Storleken på datorer har därmed drastiskt förminskats, medan kapaciteten har ökat. År 1971 lanserade elektronikföretaget Intel den första mikroprocessorn, den moderna datorns "hjärna". Också här var underhållningsindustrin på hugget i ett tidigt skede och en av de första tillämpningarna av Intels 4004 processor hittas i ett flipperspel.

Intel 4004 använde sig av 2 300 transistorer för att utföra sina beräkningar. Nu, femtio år senare, innehåller den största processorn 2 600 *miljarder* transistorer. Ett nästan ofattbart hopp i både ingenjörskonst och prestanda.

Världens snabbaste datorer kallas för superdatorer. De innehåller tiotusentals processorer som jobbar tillsammans för att lösa olika problem. År 2022 nådde man en milstolpe då superdatorn Frontier i USA uppnådde en beräkningskraft på en exaflops, *floating point operations per second*, flyttalsoperationer per sekund. Prefixet exa står för talet  $10^{18}$ : en triljon beräkningar per sekund. Nu skulle vår begåvade matematiker som ovan kämpade med spelkonsolen ligga riktigt illa till. Det skulle ta 30 miljarder år för hen att räkna det superdatorn räknar på en sekund.

Stora tal är krångliga för våra hjärnor. Vi förstår inte riktigt innebörden av dem. Vi kan ta reda på att en triljon är en etta följd av arton nollor,

men att verkligen förstå vad det betyder är en annan sak. Till och med på ministernivå blandas ibland miljoner och miljarder ihop. Det är fullständigt mänskligt, även för de som till vardags handhar statsbudgeten. Det är svårt att föreställa sig hur många en triljon beräkningar faktiskt är. En miljard miljarder. Fantasisiffror.

Våra hjärnor är mycket bättre på att jämföra tal än den är på att begripa innebörden av stora tal. För omkring ett kvarts sekel sedan passerades den föregående stora milstolpen i datorkraft. År 1997 uppnådde en superdator för första gången teraflops, alltså förmågan att utföra  $10^{12}$ , en biljon, tusen miljarder beräkningar per sekund. Det är fortfarande fantasisiffror, men jämförelsen med dagsläget blir lättare. En exaflops är en miljon gånger mer än en teraflops. På 25 år har alltså världens snabbaste dator blivit en miljon gånger kraftfullare och kan lösa matematiska problem som är en miljon gånger mer komplicerade.

En miljon gånger mer datorkraft är väldigt mycket. Vi kan i nuläget göra mycket mer komplicerade modelleringar och beräkningar än i slutet av 1900-talet. Ett färskt exempel är de stora språkmodellerna som till exempel chatbottjansnten ChatGPT utnyttjar. Dessa språkmodeller kan föra mycket övertygande konversationer, även om de "bara" är en hög datoralgoritmer som övat

sig på språk genom att läsa en stor del av innehållet på internet. Till exempel har GPT-3.5-modellen, den som tog världen med storm i slutet av 2022, gått igenom 300 miljarder ord. Språkmodellerna hade alltså redan då läst 30 miljoner gånger mer text än det finns i denna bok, som innehåller cirka tiotusen ord. Detta skulle ha varit fullständigt omöjligt för 25 år sedan; ingen dator skulle på något sätt ha klarat av att bearbeta så mycket information.

Det finns ändå vissa problem där en faktor på en miljon i datorkraft knappt har någon betydelse. Om vi så väntade 25 eller 250 år till, eller koplade ihop en miljon superdatorer, skulle vi aldrig klara av att lösa de allra svåraste beräkningsproblemen. För att kunna knäcka de hårdaste nöterna måste vi ty oss till kvantdatorer.

## KAPITEL |01⟩ - KVANTEFFEKTER

Kvantdatorer utnyttjar kvantmekaniska fenomen för att utföra en beräkning, fenomenen som *superposition*, *interferens* och *kvantsammanflätning*. För att förstå hur annorlunda och revolutionerande kvantdatorer egentligen är, hjälper det att få ett hum om vad dessa kvanteffekter egentligen går ut på. För en utförligare behand-

ling rekommenderar jag John Gribbins klassiker, som på svenska har titeln *Jakten på Schrödingers katt*.

Vi är fullständigt beroende av vår förmåga att observera vår omgivning med hjälp av våra sinnen. Vi använder smak, lukt, känsel, hörsel och syn för att få insikt om vad som händer omkring oss, och vi använder denna information för att styra vårt beteende. Våra förmågor har utvecklats till att passa våra behov och vår miljö. Med blotta ögat kan vi till exempel inte urskilja detaljer mindre än cirka 0,1 mm, ett hårstrå. Till vardags räcker detta väl, men vi kan ju ändå vara nyfikna på att zooma in lite mer.

Nuförtiden kan man med så kallade sveptunnelmikroskop se enskilda atomer, byggstenarna för alla kemiska föreningar från vattenmolekyler till solceller. På den här skalan ser världen helt annorlunda ut. Vattnet i ett glas är inte längre en jämn och stillastående vätska, utan består av enskilda partiklar, molekyler, som myllrar omkring varandra:  $H_2O$ , en syreatom med två väteatomer fastbundna på var sida. I rumstemperatur har vattenmolekylerna en medelhastighet på 2 000 km/h, även om vattenytan är spegelblank. Detta myller upplever vi aldrig direkt, eftersom de enskilda molekylerna är så små. En sandhög stor som Mount Everest skulle bestå av ungefär



lika många sandkorn som det finns vattenmolekyler i en endaste droppe. Myllret på molekylnivå kan vi endast se med avancerade mikroskop – eller genom datorsimulation.

Vid sekelskiftet 1900 hade vetenskapliga instrument utvecklats i så hög grad att det gjorts flera upptäckter som inte riktigt passade in i den fysikaliska världsbild som hade byggts upp. Små och ännu mindre avvikelser från hur verkligheten borde bete sig började skönjas. Genombrottet kom då Max Planck fann lösningen till ett förbryllande fenomen för hur olika varma objekt, så kallade svarta kroppar, utstrålade energi. Planck föreslog en modell där energin som utstrålades skulle komma i små paket, i stället för i en jämn ström – på samma sätt som en till synes jämn ström av vatten faktiskt består av flera enskilda ”paket”, vattenmolekyler. Modellen fungerade perfekt. Energipaketet kallade Planck för kvanta av energi, från latinets *quantum*, ’hur mycket’. Kvantmekanikens tidevarv hade börjat.

Kvantmekaniken berättar för oss att världen är kvantiserad, delad i små bitar. Det gäller inte bara materia och energi, utan också exempelvis avstånd och elektrisk laddning. Dessa kvanta är dock otroligt mycket mindre än vad vi direkt kan erfara. Därför har våra hjärnor under evolutionens gång aldrig haft en drivkraft att utveckla en

inbyggd förståelse av eller intuition om kvantvärlden. Vårt förnuft är förankrat i det handgripliga.

Låt oss för en stund återvända till den klassiska världen, den vi upplever omkring oss, och studera skillnaden mellan vågor och partiklar. Vågor, som vatten- eller ljudvågor, är utspridda över ett stort område. Utgångspunkten kan till exempel vara nedslagsplatsen för en sten kastad i en pöl eller en högtalare som skickar ut en ström av ljudvågor som vi uppfattar som musik eller väderleksrapporter. Vågorna sprider sig alltså i rum och tid, och vågformen består av toppar och dalar. Vågor kan också mötas och växelverka. Detta kallas för interferens och är ett av de centrala begreppen också för kvantdatorer.

När två vågor träffar varandra kan två saker hända. Om båda vågorna ligger ovanför viloläget, den i övrigt blanka vattenytan, så förstärker de varandra och resultatet blir en högre våg just i den punkten. Ifall de växelverkande vågorna ligger nedanför viloläget, i en vågdal, förstärker de också varandra och vågdalen blir djupare. Detta kallas för positiv eller konstruktiv interferens.

Det andra alternativet är att den ena vågen ligger ovanför viloläget och den andra nedanför. Då motverkar vågorna varandra, och intensiteten för den sammansatta vågen minskar. Detta kallas för negativ eller destruktiv interferens. Om de båda

vågorna är precis lika starka, men den ena ligger ovanför viloläget och den andra under, tar vågorna helt ut varandra. Fenomenet utnyttjas till exempel i brusreducerande hörlurar. En mikrofon lyssnar på det omgivande nojset och spelar upp en ljudvåg som är så identisk med det omgivande bruset som möjligt, men spegelvänt: där omgivningens ljudvåg har en topp, skickar hörlurarnas högtalare ut en dal. Genom att två ljud spelas på varandra försvinner båda!

Partiklar är till skillnad från vågor mycket lokaliserade, de har en bestämd plats i rummet. Deras rörelse är också rätt så okomplicerad. De följer den klassiska mekanik som Isaac Newton utvecklade redan i 1600-talets England. Med dessa ekvationer kan vi med stor noggrannhet beskriva pollenkorn, biljardbollar och planeter som partiklar.

Sin gravitationslag utvecklade Newton inspirerad av att ha sett ett äpple falla till marken på sin gård. I mer utsmyckade historier föll äpplet honom i huvudet där han satt och spekulerade under trädet. Newtons äppelträd står fortfarande på sin plats på Woolsthorpe herrgård. Också Newtons lagar lever och må bra. En stor del av alla beräkningar som varje dag utförs på superdatorer världen över löser 300 år gamla ekvationer. Tack vare dessa kan vi till exempel simulera myllret

av vattenmolekyler överraskande väl. Också planeternas rörelse kring solen beskrivs rätt så bra med hjälp av Newtons klassiska lagar. Helt exakt blir det inte då objekten är riktigt tunga – eller riktigt små.

Partiklar påverkar alltså varandra, liksom vågor påverkar varandra, men växelverkan är av en helt annan typ. Till skillnad från vågor uppstår ingen interferens om två partiklar träffas. När två biljardbollar stöter till varandra smälter de inte samman till en dubbelt så stor biljardboll. När vi staplar två likadana skålar på varandra så att den ena är uppochnervänd, försvinner inte skålarna.

Tillbaka till kvantmekaniken. Newton utvecklade faktiskt en teori om att ljus skulle bestå av partiklar, korpuskler, som följde den klassiska mekanik han byggt upp. Denna idé hade vid 1900-talets början förkastats helt. Vetenskapliga kretsar hade äntligen uppnått konsensus och accepterat att ljus beter sig som en vågrörelse, i analogi med hur vågorna sprider sig då man kastar sten i sjön. Einsteins första mirakelårsartikel vände upp och ned på detta. I den påvisades att ljus, som till vardags beter sig som en våg, trots allt består av enskilda partiklar, fotoner. Upptäckten gav honom Nobelpriset 1921 och satte myror i huvudet på dåtida fysiker.

I förbifarten kan det nämnas att Einstein i de tre påföljande artiklarna visade att 1) atomer faktiskt är verkliga, något som då ännu väckte skepsis, 2) fastställde en hastighetsbegränsning i universum, inget kan färdas snabbare än ljuset, 300 000 km/s, och 3) beskrev sin kändaste formel  $E = mc^2$ , energin ( $E$ ) är lika med massan ( $m$ ) gånger ljusets hastighet i kvadrat ( $c \times c$ ), det vill säga energi och massa är egentligen två olika former av samma sak. Mirakel-prefixet är nog välförtjänt.

Det blev inte lättare av att Louis de Broglie i sin doktorsavhandling från 1924 föreslog att partiklar som elektroner kunde anses vara vågor i stället. Redan på 1800-talet hade man mätt elektronens massa, och visat att den är en partikel. År 1926 publicerade sedan, till råga på allt, Erwin Schrödinger sin ekvation, där *allt* omkring oss beskrivs som en våg. Schrödingers vågekvation utgör fortfarande grunden för att beskriva växelverkan mellan elektroner på atom- och molekylnivå.

Ljus är alltså partiklar och elektroner är vågor. Vad var nu detta? Helt tvärtom mot det som redan slagits fast. Att vara fysiker för hundra år sen måste ha varit en otroligt spännande tid, men måste också ha lett till en hel del frustration och tandagnisslan.

Man kom rätt så snart fram till den enda lösningen som passade in: fotoner är både vågor och partiklar, och elektroner är både partiklar och vågor. Eller mer exakt, universums byggstenar består av ett tredje tillstånd som vi inte riktigt kan få grepp om, men som ger allt i vår omgivning både våg- och partikelkaraktär. För massivare objekt dominerar partikelkaraktären, men våg-partikeldualiteten finns alltid där.

Detta demonstreras tydligast i det så kallade dubbelspaltsexperimentet. Man låter en ljusvåg eller partikelström passera en skärm med två hål, spalter, och observerar sedan hurdant mönster som ritas upp. Resultaten av experimentet är förbluffande. Det visar sig nämligen att enskilda fotoner, ljuspartiklar, på något sätt kan dela sig itu, och gå igenom *båda* spalterna på samma gång. Det syns via att fotoner interfererar, växelverkar, med sig själva. Partiklarna beter sig alltså som en våg.

Experimentet har med tiden utförts med allt större partiklar, med början från elektronen, med samma resultat: interferens med sig själv, vågkaraktär. Samma sak är fallet för  $C_{60}$ -fullerenen, en molekyl som består av 60 kolatomer bundna till varandra i form av en fotboll med fem- och sexkanter. En mycket liten fotboll förstås – storleken av  $C_{60}$  jämfört med en riktig fotboll är som förhållandet mellan en riktig fotboll och månen.

Men molekylen har ändå en tydlig struktur som man kan se med till exempel ett sveptunnelmikroskop – inte något de flesta skulle beskriva som en våg alltså.

Vad som händer i experimentet med fotoner, elektroner och C<sub>60</sub>-fotbollor är att de uppvisar kvantfenomenet superposition. De finns på samma gång och i samma tid på två olika ställen.

Rekordstorleken för ett objekt som uppvisat superposition i rummet är en bjässe på tvåtusen atomer. Det finns proteiner i vår kropp som är mindre. Biljardbollor ser vi ändå inte dela upp sig och gå in i två hål samtidigt. Var går gränsen för hur stora partiklar vi kan se i superposition? Detta är fortfarande en öppen fråga. Men vi måste justera den en aning. Det är nämligen så att vi inte heller kan se en elektron eller en fullerenmolekyl på två platser samtidigt. Detta beror på en av de mest häpnadsväckande aspekterna av kvantmekaniken: observation eller mätning av ett kvanttillstånd förändrar det så att dess kvantunderligheter försvinner.

Om vi i dubbelspaltsexperimentet kunde mäta vilket hål vår partikel går igenom, så skulle den alltid gå igenom någotdera (eller inget alls). Vi skulle aldrig se en situation där partikeln gick genom båda spalterna. Genom att försöka mäta superpositionen av partikeln försvinner effek-

ten. Det är som om kvanttillståndet skulle lida av svår scenskräck. Allt fungerar perfekt utan publik, men om det så bara finns en endaste åskådare kollapsar kvanttillståndet. Kvantvärldens kvantkonster sker endast då ingen ser på. Först vid mätningen måste kvantpartikeln välja vilken verklighet den tillhör. Före mätningen är verkligheten flummig och odefinierad. Men trots vagheten har den ändå synliga konsekvenser som påverkar den upplevda omgivningen.

Dubbelspaltsexperimentet demonstrerar tre kvanteffekter som direkt påverkar kvantdatorernas funktion. Superposition och interferens används till gagn för att utföra beräkningar. Effekten av observation är däremot en komplikation som man helst skulle undvika, om det bara var möjligt. I nästa kapitel tar vi oss an den tredje nyttiga kvanteffekten för kvantdatorer: kvant-sammanflätning.

Mätningseffekten har lett till en hel del filosofiskt grubbel. Vad räknas som en mätning, alltså observation? När sker denna mätning? Är det en mätning om vi sätter på mätapparaturen, men ingen medveten varelse tar del av mätningresultatet? Redan 1935 funderade Erwin Schrödinger på detta och framförde sitt kända tankeexperiment med sin stackars, men lyckligtvis virtuella katt.



Schrödingers katt sätts i en låda. I lådan har vi också en radioaktiv atom, som med någon viss sannolikhet skickar ut radioaktiv strålning – låt oss säga 50 procents sannolikhet för sönderfall inom en timme. Strålningen mäts med en geigermätare, som är kopplad till en flaska med giftgas. När mätaren registrerar strålning släpps giftet ur flaskan, med dödlig effekt.

Efter en timme finns det alltså en 50/50 sannolikhet för att atomen sönderfallit, giftet släppts ut och katten somnat in för gott, eller att atomen fortfarande är intakt och katten mår bra. Utanför lådan vet vi inte vilken situation vi har inne i lådan. Enligt kvantmekanikens lagar är nu katten i en superposition av både levande och död. Först då vi öppnar lådan tvingas universum välja att visa oss antingen en avliden eller en levande katt.

Schrödingers katt tvingar på oss en situation som känns otillfredsställande. Det borde ju vara nonsens att katten skulle vara levande och död samtidigt. Snacka om spökvärld. Vad som var tänkt som en tankelek som skulle visa att man med feltolkning av kvantmekaniken gräver ner sig i en grop, har lett till ett naturfilosofiskt problem som omfattar själva definitionen av verklighet och medvetande. Gropen har under årens lopp snarast blivit djupare. Vad upplever till ex-

empel katten själv under den tid den är i lådan och vi på utsidan anser den vara i superposition?

Den vanligaste synen på kvantmekaniken kallas för Köpenhamnstolkningen. Enligt denna är kvantvärlden i sitt innersta väsen slumpmässig, alltså baserad på sannolikheter. Det finns en viss sannolikhet för att partikeln tar någondera vägen i dubbelspaltsexperimentet. Det finns en viss sannolikhet för att katten är vid liv. I grunden är verkligheten baserad på en flummig och flyktig sannolikhetsfördelning av olika alternativ. Inget är bestämt förrän det behöver vara det.

Universum beskrivs av en kvantmekanisk vågfunktion som innefattar all materia och alla möjligheter. Först då vi mäter värdet på vågfunktionen kollapsar den till en definitiv verklighet; den ena eller den andra spalten, levande eller död. Kvantfenomen som superposition går förlorade. Vad en ”mätning” innebär tar Köpenhamnstolkningen inte riktigt ställning till. Egentligen antas det att observatören står utanför den jättelika låda som är vårt universum.

Det är bra att vara medveten om att det finns omkring ett dussin olika tolkningar av hur kvantmekaniken fungerar, alla med mer eller mindre tilltalande förklaringar. Man har ännu inte lyckats utföra experiment som skulle skilja på de olika teorierna genom att antingen förkasta eller

bekräfta deras förutsägelser. Därmed är de alla så gott som lika bra eller lika dåliga. Från en vetenskaplig synpunkt har det just ingen betydelse om en förklaring *låter* vettig. En teoris förtjänst mäts i dess förmåga att beskriva världen som den är samt att göra förutsägelser om vad nya experiment, som ännu inte utförts, kommer att visa.

Det vore dock väldigt nyttigt om teorin dessutom kunde förse oss med en grogrund för att utveckla vetenskapen vidare – bygga på det kända för att förklara det okända. En tillfredsställande förklaring till *varför* verkligheten beter sig som den gör är en värdefull bonus, men en svårdefinierad sådan. Vem ska förklaringen tillfredsställa? Får förklaringen vara så komplex att till och med de mest briljanta hjärnor måste anstränga sig för att fatta vad det hela går ut på? Tänk om det är som att försöka förklara multiplikationstabellen för katten i lådan. Det är inget mystiskt med att  $3 \times 5$  blir 15, även om katten inte har den blekaste aning om matematik. Kvantmekaniken är kanske heller inte mer mystisk än multiplikation, bara väldigt mycket krångligare, bortom all mänsklig förståelseförmåga. Min inbyggda nyfikenhet gör att jag innerligt hoppas att detta inte är fallet, och att vi en dag förstår mer om universums essens.

Jag ska ta upp ytterligare en syn på diskussionen som har särskild relevans just här. N. David

Mermin var troligen den första som använde frasen: ”Tyst nu, och räkna på!” Det var hans satiriska summering av Köpenhamnstolkningen. Det är också vad vi ska göra härnäst.

## KAPITEL $|\mathbb{0}\mathbb{0}\rangle$ - KVANTDATORER

Kvantdatorer är alltså apparater som är konstruerade för att utnyttja kvantfenomen. Det viktiga ordet här är *utnyttja*. Kvanteffekter är oundvikliga också för vanliga processorer i telefoner och superdatorer. Men då är de endast till förtret, en konsekvens av att elektroniken krympt så otroligt mycket. Nu tillverkas redan mikrochipp där de minsta detaljerna är av storleksskalan två nanometer, bara tre gånger större än fotbollsmolekylen  $C_{60}$ . Klassiska datorer har alltså redan klivit in i kvantvärlden, men de trivs inte alls där. Det är alldeles för stökigt.

Det är också viktigt att genast definiera vad en kvantdator *inte* är. En kvantdator är inte en supersnabb version av en vanlig dator som plötsligt löser alla räkneproblem en miljon gånger snabbare. Den är i stället helt annorlunda. Kvantdatorer är fenomenala på att lösa vissa typer av svåra beräkningsproblem. För många andra beräkningar fungerar kvantdatorer faktiskt riktigt dåligt.

Ett vinnande recept för att lösa de allra knepigaste beräkningsproblemen är att kombinera klassiska superdatorer och kvantdatorer.

Som idé föddes kvantdatorerna vid decennieskiftet mellan 1970- och 1980-talen. Datorer hade då varit i forskningsbruk sedan 1940-talet. En god uppfattning om styrkan av binär beräkningskraft hade uppnåtts. Man hade också börjat förstå dess begränsningar. Delvis baserat på denna insikt lade Paul Benioff, Yuri Manin, Richard Feynman och David Deutsch grunden för en helt ny typ av datorer.

Vad man insett var att vissa typer av beräkningar var extremt tunga till och med för de största superdatorerna. Än viktigare, man förstod att dessa problem skulle förbli svåra för klassiska superdatorer i all evighet. Feynman sammanfattade och avslutade 1981 en föreläsning om ämnet på sitt färggranna sätt:

[...] naturen är inte klassisk, för tusan, och vill man göra en simulering av naturen måste man göra det kvantmekaniskt, och oj vilket underbart problem det är, för det ser inte så enkelt ut. Tack. [min övers.]

Richard Feynman

Man hade alltså förstått att klassiska datorer aldrig kan förväntas fullständigt beskriva fysikaliska fenomen som baserar sig på kvantmekaniska effekter. Detta innefattar kvantfysiken i sig, men också mer tillämpade områden som molekylära vetenskaper, biokemi, materialvetenskap och farmakologi. Allt som är baserat på att förstå den växelverkan som styrs av kvantmekanikens lagar är och förblir krångligt för klassiska datorer.

Orsaken till att det är svårt att simulera kvantmekaniska fenomen är att ekvationerna är mycket komplexa. Det är återigen inte de enskilda beräkningarna i sig som är speciellt svåra, utan det enorma antalet som måste lösas. Mödan i att lösa till exempel Schrödingers vågekvation beror på antalet partiklar, vanligtvis elektroner, som man vill studera. Tiden det tar att få en exakt lösning på ekvationen växer exponentiellt med antalet partiklar.

Exponentiell tillväxt är lätt att beskriva matematiskt, till exempel  $x = 2^n$ . När  $n$  växer, växer  $x$  ofantligt snabbt. Med  $n = 1$  så är  $x = 2^1 = 2$ . Med  $n = 2$  så är  $x = 2^2 = 4$ . Med  $n = 3$  så är  $x = 2^3 = 8$ . När värdet på  $n$  stiger med ett, fördubblas alltså värdet på  $x$ . Då  $n = 20$  är  $x$  redan en miljon – enkelt att räkna ut med telefonens kalkylatorapp, men att förstå exponentiell tillväxt är en annan sak.

Människohjärnan är inte bara dålig på stora tal, den är inte heller bra på att gestalta annat än jämn, linjär tillväxt. Bakteriers utbredning är ett klassiskt exempel på exponentiell (för)ökning. De fortplantar sig genom celledelning: en bakterie blir två. Sedan delar sig dessa två, och vi har fyra bakterier som delar sig och blir åtta. Mönstret är bekant från ovan. Låt oss säga att vi har en bakterie som håller på att ta över en sjö, och delar sig en gång per dag. Det har börjat långsamt men efter hundra dagar har bakterien spritt sig så att den täcker en fjärdedel av ytan. Hur länge tar det innan hela sjön är täckt? Man gissar lätt intuitivt att det behövs 300 dagar till för att täcka de resterande tre fjärdedelarna av sjön, men det tar faktiskt bara två dagar. Om en dag har en fjärdedel fördubblats till en halva, och efter en dag och en fördubbling till, är sjön helt övertagen av bakterien.

Coronaepidemin var ett praktexempel på hur kontraintuitiv exponentiell ökning är. Det var svårt att reagera snabbt nog, eftersom det var så mänskligt att inbilla sig att det fanns gott om tid. Även om man *vet* hur det egentligen fungerar, vill hjärnan trots det inte riktigt tro på konceptet.

Klassiska datorer är binära. Det betyder att deras talsystem baserar sig på två siffror, noll och ett. I det decimala tiosystemet används tio olika siffror för att beskriva ett tal: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

och 9. När vi i decimala talsystemet räknat upp till talet nio, behöver vi övergå till att representera nästa tal, tio, med två siffror: 10. Varje gång siffran längst till höger räknat upp till 9 går den räknaren runt till noll, och siffran till vänster ökas med ett – på samma sätt som bilarnas vägmätare brukade fungera innan digitaliseringen tog över.

I det binära talsystemet kommer man oftare till situationen då man måste öka siffran till vänster. Talet ett markeras i det binära systemet som 1, men redan talet två behöver en siffra till: 10. Talet tre motsvarar då 11, och fyra är lika med 100, och så vidare.

Datorer använder detta räknesätt eftersom det är lätt att representera tekniskt. Det binära systemet motsvarar en avbrytare, där ”av” = 0 och ”på” = 1. Med bara två alternativ blir informationssystemet robust. Redan Charles Babbages analytiska maskin var tänkt att använda hålkort, pappbitar indelade i rutor, där man antingen slagit ett hål eller låtit bli. Ett eller noll. I dagens datorer görs detta elektroniskt på flera olika sätt. En etta kan till exempel representeras av en elektrisk spänning på någon volt, och en nolla som avsaknaden av spänning.

Dessa binära siffror kallas för bitar, ett teleskopord från engelskans *binary digit*. All information i vår dator representeras av bitar. Minnet i da-



torn är fullt av ettor och nollor. Internet är fullt av ettor och nollor på genomresa, med uppgift att förmedla information mellan datorer runt om i världen.

När en dator utför en beräkning förändras värdet på bitarna. När vi programmerar en dator skriver vi egentligen bara ett recept som bestämmer vilka bitar som ska byta värde, och när detta ska ske. Grundprincipen för en dator är alltså rätt så okomplicerad. Det blir komplicerat för att det behövs en ofantlig mängd av dessa bitflippar för att utföra något nyttigt.

Hur kan man förbättra bitar? Som en engelsk dramatiker från den elisabetanska eran kunde ha sagt: ”Att vara och inte vara – det är svaret!”

Kvantdatorer använder sig av kvantbitar. Dessa är mycket kraftfullare än vanliga bitar. Där en vanlig bit kan vara *antingen* ett *eller* noll, kan en kvantbit vara *både* ett *och* noll, och vad som helst mitt emellan på samma gång. En kvantbit kan alltså vara i en superposition av ett och noll, på motsvarande sätt som partiklarna i dubbelspaltsexperimentet var i en superposition av två platser och fanns i båda spalterna på samma gång.

Klassiska bitar och kvantbitar kan jämföras med hjälp av en jordglob. Värdet på både en klassisk bit och en kvantbit kan representeras av en punkt på jordens yta, med longitud och latitud.

Klassiska bitar är dock bundna till två enskilda punkter: nordpolen, 0, och sydpolen, 1.

I en klassisk dator kan en bit endast flytta sig mellan dessa två värden, hoppa från nord- till sydpol och tvärtom. En kvantbit kan däremot anta ett värde var som helst på ytan. Den kan befinna sig i Linköping eller Borgå, i Katowice eller mitt i Indiska oceanen. Vid ekvatorn är den i en 50/50 superposition av nordpol och sydpol, av noll och ett. På andra ställen är den i en ojämn superposition med olika vikt av ett och noll. Endast exakt vid polerna är kvantbiten utan superposition. För att poängtera att vi nu har ett kvanttillstånd i stället för ett binärt används Diracs dekoration för tillstånden,  $|0\rangle$  och  $|1\rangle$ . Paul Dirac var en av de främsta utvecklarna av kvantmekaniken och Nobelpristagare i fysik tillsammans med Schrödinger 1933. En superposition kan då betecknas som  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ , där  $\alpha$  och  $\beta$  ger förhållandet mellan de två tillstånden enligt ekvationen  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 100\%$ .

Informationsinnehållet i en kvantbit är alltså mycket större än i en klassisk bit. En klassisk bit kan bara representera två värden, medan en kvantbit i princip kan representera ett oändligt antal värden, då den kan finnas i vilken punkt som helst på klotets yta. Tekniskt sett kan det sedan vara knepigt att få helt exakt kontroll för att till

exempel flytta kvantbitens tillstånd från vardagsrumssoffan till kylskåpet, eller från schackbrädets ruta c7 till h7.

Kvantbitarnas flexibilitet gör också att det blir mycket mer invecklat att programmera kvantdatorer. Då ett vanligt datorprogram eller en vanlig algoritm endast kan byta bitarnas värden mellan ett och noll, är en kvantalgoritm mycket mer komplicerad. För att dra nytta av kvantbitens superpositionsförmåga måste man flytta dess värde, tillstånd, runt hela klotet, från exempelvis Linköping till Borgå. Man kunde visserligen nöja sig med att bara flytta kvantbiten mellan nordpol och sydpol, men då utnyttjar man inte superposition på något sätt och har bara en överkomplicerad implementering av en klassisk bit utan någon som helst kvantfördel.

Kvantprogrammering kräver att man helt tänker om sitt problem, snarare än att man försöker förädla befintliga lösningsmetoder. Vad försöker man egentligen uppnå? I stället för att utveckla effektivare segel eller motorer för att skeppa brev över Atlanten uppfinner man e-posten.

Påföljden av observation av kvanttillstånd komplicerar saken ytterligare. Kvanteffekterna försvinner ju då vi försöker mäta dem. Partikeln slutar gå igenom båda spalterna på samma gång; katten faller död till marken eller hoppar ur lå-

dan. Det betyder att det inte går att följa med vad som sker med kvantbitarna under beräkningens gång. Även om kvantbiten vore i en superposition vid ekvatorn, skulle en mätning alltid ge antingen 0 – nordpol eller 1 – sydpol som svar, inte till exempel 0,5. Vilket av värdena mätningen visar är fullständigt slumpmässigt. I medeltal mäts 0 i 50 procent av fallen och 1 i 50 procent av fallen, men vi kan inte på något sätt veta vilket värde vi får på förhand. Universum själv väljer värdet enligt en mekanism som vi inte kan se. Om det nu ens finns en mekanism. Men nu avviker jag igen från ”Tyst nu, och räkna!”-paradigmet. Det är svårt att låta bli.

En enskild kvantbit är alltså mycket mer kraftfull än en klassisk bit. Skillnaden understryks då vi har fler (kvant)bitar. Med två klassiska bitar kan vi beskriva fyra olika tillstånd, men bara ett åt gången: 00, 01, 10 och 11. Med två *kvant*bitar kan vi beskriva alla fyra tillstånd *på samma gång*. Med tre bitar kan vi beskriva åtta olika tillstånd, ett åt gången, medan tre kvantbitar kan beskriva åtta tillstånd samtidigt. Generellt kan  $n$  kvantbitar representera exponentiellt många tillstånd samtidigt,  $2^n$ . Så 20 kvantbitar kan redan beskriva en miljon olika tillstånd på en gång.

Detta är grunden till kvantparallellism, möjligheten att göra flera beräkningar på samma gång.

Dessa olika tillstånd kan nämligen ses som input till datorn, olika utgångsvärden som den ska utföra en beräkning på. I en klassisk dator med två bitar måste datorn köra beräkningen för de fyra olika kombinationerna av 0 och 1 fyra gånger. En kvantdator med två kvantbitar kan köra alla fyra kombinationer på samma gång. Med tjugo bitar måste man köra ett klassiskt datorprogram en miljon gånger för att ha gått igenom alla alternativen. En kvantdator kan bearbeta alla en miljon alternativ samtidigt.

Det finns en hake. Även om maskinen med tjugo kvantbitar kan matas med en miljon olika alternativ i superposition på samma gång, spottar datorn ut endast ett svar. När vi läser ut värdet på alla tjugo kvantbitar kollapsar deras kvantegenskaper, och svaret är en sträng med nollor och ettor – *en* av de en miljon möjliga kombinationerna. Detta innebär att en kvantdator generellt är bra på att hitta lösningar till problem där vi är intresserade av det bästa alternativet av flera möjliga, där ”bästa” definieras på önskat sätt. Har vi ett problem där vi är intresserade av svaret på varje möjlig kombination av inputvärden, så kan vi inte dra nytta av kvantparallellism.

Säg att vi har en samling olika potentiella läkemedelsmolekyler och vi har som mål att reda ut hur starkt de binder till ett visst enzym i vår

kropp, och därmed hur bra de till exempel stoppar ett virus från att fortplanta sig. Om vi endast vill veta vilken av molekylerna som klarar jobbet bäst, är det möjligen ett problem för en kvantdator. Om vi vill veta hur starkt alla de enskilda molekylerna binder, så ska vi använda en klassisk dator.

Genom att flytta tillståndet av kvantbiten runt jordklotet utnyttjas en av kvanteffekterna, superposition. Grundarbetet för att utnyttja den andra viktiga effekten, interferens, görs också. Kvantbitens placering på jordklotet definierar nämligen också den så kallade fasen av dess vågfunktion. Även med en 50/50 superposition var som helst vid ekvatorn är det en skillnad ifall kvantbiten ligger i Afrika eller mitt i Stilla havet. Den ena sidan motsvarar en dal i vågfunktionen och den andra en topp.

När man gör beräkningar med två eller flera kvantbitar kan deras vågfunktioner interferera. Under beräkningens gång sköljer kvantvågorna av de enskilda kvantbitarna över varandra om och om igen, enligt receptet i den kvantalgoritm som kvantdatoren kör. Toppar förstärker toppar, dalar och toppar tar ut varandra. Sluter man ögonen kan man kanske höra kvantbruset av vågor som slår mot varandra i stormen som rasar inne i kvantdatoren! Idén är att öka sannolikheten för att

i slutet mäta rätt svar på bekostnad av sannolikheten av att mäta fel svar. I ett vanligt datorprogram behöver man inte dirigera komplexa vågkollisioner för att få ut rätt svar, i en kvantalgoritm är det en grundförutsättning.

Den tredje kvanteffekten som måste utnyttjas är den ökända ”spöklika fjärrverkan”, *spukhafte Fernwirkung*, som Einstein kallade den. Genom att koppla ihop två kvantbitar på ett speciellt sätt uppkommer ett nytt samband mellan dem, en kvantsammanflätning. Som två garnnystan som trasslat in sina trådar i varandra så pass mycket att de förblir bundna till varandra även då man drar dem isär.

Sammanflätade kvantbitar lever vidare i ett egendomligt förhållande. När deras tillstånd mäts vet man inte på förhand vilket värde man får, det blir som vanligt antingen 1 eller 0. Med rätt sorts sammanflätning kan man ändå försäkra sig om att båda kvantbitarna till exempel ger samma svar.

För sammantrasslade kvantbitar är effekten omedelbar, oberoende av avståndet mellan dem. Även om kvantbit A hölls kvar på jorden och kvantbit B skickades till andra sidan Vintergatan, hundratusen ljusår bort, kommer växelverkan att ske på nolltid. På något sätt håller de två kvantbitarna kontakten och vet om vad som sker med den andra utan dröjsmål. Ifall värdet på kvantbit

A mäts här på jorden med svaret 1, förstår kvantbit B på nolltid att också ge svaret 1 ifall en utomjording skulle få för sig att utföra en mätning där på andra sidan galaxen.

Detta hade Einstein mycket svårt att smälta. Han hade ju visat att universum har en hastighetsbegränsning, ljusets hastighet, som också gäller signaler genom rymden. Det borde alltså ta minst hundratusen år innan kvantbit B har en blekaste aning om vilka experiment vi håller på med på dess nu avlägsna själsfrände kvantbit A. Men fenomenet har demonstrerats, inte på galaktiska avstånd men ändå tillräckligt övertygande för att föräras Nobelpriset i fysik 2022. Einstein förhöll sig dock skeptisk in i det sista. I ett brev skrev han följande om kvantteorin:

Den här teorin påminner mig lite om ett vanföreställningssystem hos en oerhört intelligent paranoid person, ett hopkok av osammanhängande tankeelement. [min övers.]

Albert Einstein (1952)

Eftersom kvantbitarna är sammanflätade, kommer *varje* operation man utför på den ena att på samma gång påverka den andra. Om kvantbit A flyttas lite bort från ekvatorn, kommer kvantbit B också automatiskt att flyttas. I en allmän



kvantalgoritmer ligger de enskilda kvantbitarnas tillstånd utspridda över olika punkter på sina respektive kvantjordglober. Om de är sammanflätade räcker det att styra en kvantbit för att styra dem alla på en gång. Sammanflätning förser faktiskt kvantdatorn med det torraste krutet – utan denna effekt vore exponentiellt snabbare lösningar omöjliga. Där superposition gör det möjligt att utföra en beräkning på en hög input-data samtidigt, möjliggör kvantsammanflätning supereffektiv kontroll av flera kvantbitar på en gång.

Nu har vi fastställt de teoretiska ingredienserna för en kvantdator. Men hur ser en kvantdator och en kvantbit ut på riktigt?

Vilket som helst system som kan försättas i en superposition av två olika tillstånd kan i princip fungera som kvantbit. En kvantbit kan exempelvis bestå av en atom. Bara vi är medvetna om att det är en grov förenkling, kan en atom betraktas som ett solsystem i miniatyr, där elektronerna ligger i banor runt atomkärnan. Modellen presenterades av Niels Bohr 1913, under kvantmekanikens turbulenta formuleringsår. Då är det naturligt att elektronbanorna inte kan se ut hur som helst; de är kvantiserade, med elektronerna i medeltal på ett visst avstånd från kärnan. För att förflyttas längre bort, till en annan bana, krävs en specifik

mängd energi. Tillståndet där en viss elektron ligger på en bana närmast kärnan kan markeras som  $|0\rangle$  och tillståndet där elektronen flyttats längre bort som  $|1\rangle$ . Vi är nu bokstavligen på atomnivå, mitt i kvantvärlden. Därmed överraskas läsaren kanske föga av att det faktiskt är möjligt att förmå elektronen att både flytta sig till  $|1\rangle$  och stanna kvar på  $|0\rangle$  samtidigt. Superposition av  $|0\rangle$  och  $|1\rangle$  alltså, första steget i konstruktionen av en fungerande kvantdator.

Kvantbitar kommer i många olika former: atomer, joner, små diamanter och så vidare. I nuläget vet vi inte vilka tekniker framtidens kvantdatorer kommer att basera sig på. Forskare har faktiskt på fullaste allvar spekulerat i möjligheten att utomjordisk intelligens redan nu kunde använda svarta hål i rymden som kvantdatorer. I Finland och Sverige har man utmärkt sig genom att framställa supraledande kvantbitar i världsklass. Supraledande material leder elektricitet utan motstånd, men kräver vanligtvis mycket låga temperaturer. Supraledande kvantprocessorer kyls till ungefär 0,01 grader över den absoluta nollpunkten noll Kelvin. I rymdens stora tomhet och extrema kyla är det trehundra gånger varmare! För att uppnå så låga temperaturer placeras kvantdatorerna i högteknologiska kylskåp, kryostat, i storleken av duschskåp.

Det tog nästan tjugo år innan kvantdatorkonceptet blev verklighet, men 1998 kördes världens första kvantalgoritm på en riktig kvantdator med två kvantbitar – på två olika kvantdatorer faktiskt, i två olika laboratorier. De första kvantdatorerna var två pyttesmå molekyler. Den ena var cytosin, en av de fyra beståndsdelarna i DNA. Den andra var kloroform. Jo, näsdukarna som skurkarna i tv-serier och krimberättelser söver ner oskyldiga offer med är dränkta i ett myller av pyttesmå kvantprocessorer!

Två kvantbitar duger till att demonstrera att man faktiskt kan utnyttja universum och kvantvärlden för att utföra beräkningar på ett helt nytt sätt. Men det är inte tillräckligt för att göra en beräkning snabbare än en vanlig dator. För detta behövs mycket fler kvantbitar. Det har vi nu. Kvantdatorer har utfört beräkningar som skulle ta år, till och med årtusenden för superdatorer att lösa.

Det är knepigt att direkt jämföra beräkningskraften mellan vanliga datorer och kvantdatorer, eftersom de är så olika och utför beräkningar på helt olika sätt. Kvantdatorer kan liknas vid racerbilar. Kvantracerbilarna är snabbare än någon annan bil man någonsin byggt och har redan nu topphastigheter på tusentals kilometer i timmen. Liksom racerbilar är kvantdatorer oerhört effektiva men i en begränsad miljö. Där For-

mel 1-förarna gör banrekord endast på välskötta och för ändamålet byggda banor, så är kvantdatorer bra på att lösa problem som passar just deras speciella kvantegenskaper. En racerbil har inget att göra på en skumpig skogsväg. Oberoende av hur snabb den är, kör den fast i första bästa tallrot. En kvantdator passar precis lika dåligt för att hjälpa till med skattedeklarationen. Skatteverket uppskattar inte slumpmässiga värden i avdragsfälten. För en skogsväg passar en terrängbil, för en excelkalkyl passar en vanlig dator.

Även om kvantdatorers tillämpningsområden är begränsade, är deras potentiella beräkningskraft revolutionerande. En kvantdator med ungefär 50–60 perfekta kvantbitar kan utföra beräkningar som inte ens världens snabbaste superdator klarar av. I skrivande stund ligger rekordet i antal kvantbitar strax över tusen. Trots detta kan de inte tävla i prestanda ens med en gammal mobiltelefon för att lösa något av praktisk nytta. De beräkningar de hittills löst snabbare än superdatorer är alla artificiella, utan någon som helst praktisk nytta, förutom att demonstrera den latent potentialen i kvantberäkning.

Orsaken är att kvantdatorerna kraschar alldeles för tidigt. Kvanttillstånden i kvantbitarna är oerhört känsliga. De minsta störningar från omgivningen gör att deras kvanttillstånd försvin-

ner, på liknande sätt som en observation förstör kvanteffekterna. Superposition och kvantsammanflätning suddas ut. Man kan säga att det är ungefär lika svårt att upprätthålla ett kvanttillstånd som det är att balansera ett mynt på kant på toppen av antennen av ett radiotorn. Minsta lilla vindpust gör att myntet trillar ner och landar antingen som krona eller klave, ett eller noll.

Kvanttillstånden försvinner alltså blixtnabbt. Bokstavligen. Supraledande kvantdatorer lyckas hålla liv i sina kvantbitar i högst en mikrosekund, som också råkar vara tiden som en kamerablixt lyser till. Under denna korta tid *hinner* kvantdatorn helt enkelt inte göra någon avancerad beräkning. Bränslet i vår kvantracerbil tar slut efter bara en meter eller så. Maskineriet kan inte heller startas om från där vi blev, eftersom kvanttillstånden, longituden och latituden för kvantbitarna, inte kan läsas ut och sparas. Vi får bara ut en massa ofärdiga, halvgräddade ettor och nollor.

Kvantdatorer kan heller inte styras vidare bra, i alla fall i jämförelse med binära datorer. När en operation utförs på en kvantbit, som att flytta den 20 grader mot öst, lyckas detta endast med en viss sannolikhet. För tillfället kommer man upp till lite mer än 99,9 procents tillförlitlighet. Det låter kanske inte så illa, men det betyder att

en på tusen operationer misslyckas. Så även om kvantbitarna inte skulle tappa sin superposition på en mikrosekund, kan vi ändå inte utföra särdeles komplicerade beräkningar eftersom datorn börjar räkna fel. Detta i kontrast till vår spelkonsol i första kapitlet, som under mikrosekunden som kvantberäkningen hålls i gång har utfört 10 miljoner beräkningar, och fortsätter att göra så helt felfritt tills vi stänger av den.

Stabilitetsproblem är något som hör ny teknik till. Det är fullständigt möjligt att lösa dem och framställa tillräckligt pålitliga kvantdatorer. Det kan ta sin tid, till de otåligas förtret, men de kommer!

## KAPITEL |11⟩ – VAD RÄKNA?

Det ursprungliga tillämpningsområdet för kvantdatorer var kvantfysiken själv. Därmed simuleras också naturfenomen som direkt bygger på kvantmekanik effektivt med kvantdatorer. Tillämpningsområdet har vuxit markant under åren. En tillräckligt kraftfull kvantdator skulle förnya så gott som all forskning och produktutveckling som använder sig av, eller kunde tänkas använda sig av, beräkningsmässig modellering. Låt oss ta en titt på några möjliga tillämpningar.

Generellt är kvantdatorer väl ägnade för optimeringsproblem, för då söks ofta den bästa, eller i alla fall nästan bästa lösningen. Det så kallade handelsresandeproblemet används ofta som illustrativt exempel. Den enklaste versionen av problemet går ut på att hitta den kortaste ruten som förenar ett antal städer som handelsresanden ska besöka. Matematiskt sett är detta ett mycket invecklat problem. Antalet alternativ exploderar med ökande antal städer. Mer formellt stiger den som  $(n-1)!$  där  $n$  är antalet städer och utropstecknet säger att vi ska räkna ut fakulteten, alltså produkten av alla heltal från 1 upp till och med  $n-1$ . För fyra städer finns det då alltså  $3! = 1 \times 2 \times 3 = 6$  olika alternativ. Detta är lätt att övertyga sig om med papper och penna. Prova! För tio städer finns det redan  $9! = 362\,880$  olika alternativ – helt omöjligt för papper och penna, men fortfarande lätt för en dator. Med tjugo olika städer finns det  $19! = 121$  *biljarder* olika alternativ. Nu börjar redan superdatorn hosta.

Av alla möjliga rutter är endast den (nästan) kortaste ruten av intresse för handelsresanden. Hen vill inte veta vilken av alla rutter som är den en miljonte bästa. Detta demonstrerar väl vilken typ av problem kvantdatorer är bra på: att identifiera ett bra alternativ bland flera dåliga. Nämnas bör att för denna enkla version av handelsresan-

dens problem har man ännu inte utvecklat någon särdeles bra kvantalgoritm. I stället har man utvecklat riktigt effektiva klassiska algoritmer som rätt så snabbt hittar nästan rätt lösning.

Det finns flera andra optimeringsproblem, som i motsats till handelsresandens problem inte har några effektiva klassiska algoritmer. Ett av dessa är elektronstrukturproblemet, alltså Schrödingers vågekvation. Här optimeras distributionen av alla de elektroner som fungerar som lim mellan atomerna i all materia, från läkemedel till solpaneler, så att systemet blir så stabilt som möjligt, något det naturligt strävar efter. Elektronstrukturen bestämmer alla egenskaper i molekyler och material, såsom bindningsstyrkan till ett enzym, effekten av en katalysator eller verkningsgraden för att fånga upp solenergi. Också här måste vi beakta att dagens superdatorer, i allt högre grad i kombination med artificiell intelligens (AI), ofta är mycket bra på att hitta ungefärliga, användbart goda lösningar till detta problem – inte för alla tänkbara material och molekyler dock.

AI-modeller är riktigt skickliga på att imitera och kombinera sådant som de blivit utsatta för tidigare. Därför kan de skapa trovärdiga fotografier av sådant som aldrig hänt eller skriva ett övertygande manifest över varför pizzan absolut bör ha ananasfyllning. Men de klarar sig faktiskt rätt så



dåligt inom områden som går utanför deras upplevelsevärld.

Ett problem som är på väg att bli kritiskt för vårt samhälle är hur övergången till naturvänlig energiförbrukning ska lösas. Batterier för elbilar, kemiska katalysatorer och vindkraftverk behöver alla olika sällsynta jordartsmetaller, alltså grundämnen. Flera av dem är redan bristvara, och gruvdriften motverkar den ekologiska nyttan som de i slutändan för med sig. Anledningen till att man använder dessa metaller är att de förändrar elektronstrukturen i material på ett fördelaktigt sätt. Utan dem fungerar till exempel batterierna sämre eller inte alls.

Med hjälp av kvantdatorer kan man möjligen lösa detta genom att konstruera material som besitter samma egenskaper men som består endast av grundämnen som det finns tillräckligt av på jorden, exempelvis järn. Man skulle alltså slippa vara beroende av sällsynta grundämnen. Detta skulle kräva att man pålitligt kan modellera elektronstrukturen för både nuvarande material för att förstå varför de fungerar bra och även gå igenom en massa möjliga alternativa material, bestående av olika sammansättningar av vanliga grundämnen, tills man hittar ett som passar in. En sådan sökning vore alldeles för svår för klassiska superdatorer; inte ens elektronstrukturen

av de nuvarande materialen kan räknas ut med tillräcklig noggrannhet för att få en utgångspunkt för själva sökningen. AI kan knappast heller hjälpa, då det vi söker efter faktiskt inte liknar någonting som existerar.

Övergången till grön och förnybar energi samt elbilar för också med sig ett annat nytt optimeringsproblem som man inte hittills behövt bekymra sig för. Stamnätet för elkraft kommer nämligen att utsättas för mycket större fluktuationer i både elförbrukning och elförsörjning. Med växande vind-, vatten- och solkraft växer variationen i elproduktion betydligt. Det märks redan nu i kraftigt varierande priser på elbörsen, där vindstilla dagar ofta betyder högre priser. Gällande elförsörjningens stabilitet är problemet akutare. Europeiska unionens nuvarande mål att så småningom helt stoppa försäljningen av bilar som går på fossila bränslen innebär också en påtaglig tillväxt av elbilar som måste laddas på ett mer eller mindre oregelbundet vis, både i tid och rum. Antalet variabler och faktorer som måste beaktas för att elnätet ska kunna optimeras och göras robust mot störningar kommer att stiga avsevärt under de följande decennierna. Runt om i världen forskar man därför intensivt i hur kvantdatorer kunde hjälpa att hålla korthuset stående.

En annan typ av optimeringsproblem hittas i bank- och försäkringsbranschen. Finanshus är ofta bland de första att utforska nya datorteknologier, och så är fallet också med kvantberäkning, av goda skäl. Om man kan minska risken i en aktieportfölj med 0,4 procent är det genast en vinst. Om man kan effektivisera robohandlaren så att den förstår att sälja en aktie på fall en bråkdel av en sekund före konkurrenten, vinner man – eller i alla fall förlorar man mindre.

Kvantberäkning kan också direkt kombineras med artificiell intelligens och maskinlärning. Speciellt här är det troligt att kvantfördelen kommer i form av bättre resultat, i stället för nödvändigtvis snabbare resultat. Vi vet att AI-modellerna redan är mycket effektiva, till och med till en kuslig grad. Fördelen med att ympa in kvantberäkning kan komma från att kvantdatorn av nödvändighet räknar på ett helt annat sätt än en klassisk dator. Att träna upp en AI-modell för att till exempel spela schack eller kunna föra en övertygande diskussion är också ett slags optimeringsproblem, ett mycket komplicerat sådant. Med hjälp av kvantdatorer kan modellerna möjligtvis bli noggrannare och pålitligare om än inte nödvändigtvis snabbare.

Kvantdatorer kan också hjälpa i situationer där det är viktigt att snabbt få en pålitlig ana-

lys av en pågående situation, som exempelvis i kortfristiga väderprognoser. Högre noggrannhet i regionala regnprognoser hjälper jordbruket. Förmågan att tillförlitligt kunna identifiera inledningsskedet för en orkan och dess framfart eller början till en skogsbrand från analys av satellitdata i realtid kan rädda både liv och leverne.

Ett av de mest kända tillämpningsområdena för kvantdatorer presenterades av Peter Shor 1994. Primtal är tal som är jämnt delbara enbart med sig själva och 1, till exempel 3, 5 och 17. Shor visade hur man med en kvantalgorithm och en tillräckligt kraftfull kvantdator kunde faktorisera stora heltal till deras primtalsfaktorer. Alltså räkna ut att exempelvis 15 fås om man multiplicerar primtalen 3 och 5. Shors algoritmer fungerar också för riktigt stora tal, vilket har en direkt koppling till säkerheten på internet.

En stor del av dagens telekommunikation är skyddad av så kallad asymmetrisk kryptering. Denna typ av chiffer används till exempel för bankförbindelser, näthandel och hälsodata. Krypteringen bygger på obalansen i svårigheten att lösa en viss matematisk uppgift i motsatta riktningar. Att multiplicera två primtal med varandra är ingen konst för en dator, även om primtalen skulle vara mycket stora. I RSA-2048, en av standardmetoderna för kryptering, är talen över

300 siffror långa. Deras produkt har då över 600 siffror. Säkerheten kommer från att den omvända processen är fullständigt omöjlig till och med för de snabbaste superdatorerna. Att lista ut vilka två primtal som multiplicerats för att få ett givet 600 siffror långt heltal skulle ta miljarder och åter miljarder år. Om man inte har en kvantdator som kör Shors algoritm alltså.

Kvantdatorer kommer i något skede att vara så kraftfulla att de kan knäcka asymmetrisk kryptering. Det här leder oss naturligt in på en diskussion om etik. Vad får man räkna? Naturligtvis *borde* man inte få använda kvantdatorer för att till exempel avlyssna krypterad nättrafik, meddelanden och samtal. Det är olagligt redan nu i största delen av världen. Ett förbud kommer ändå inte att stoppa kriminellt beskaffade från att försöka. Det vore också naivt att tänka att inte exempelvis statsaktörer skulle lyssna på telekommunikation oberoende av förbud. Krigstida tillämpningar katalyserade ju också kraftigt de elektroniska, klassiska datorernas utveckling.

I stället för att förlita sig på förbud måste man lägga resurser på att minska möjligheten för missbruk. I fallet med kryptering är lösningen att byta krypteringsalgoritmerna, något som borde påbörjas så snabbt som möjligt. Det finns redan algoritmer som inte ens kvantdatorer kan

knäcka. Även om det skulle ta femtio år innan en kvantdator som kan bryta krypteringen har byggts, så finns det hemligheter som är delikata under en betydligt längre tid. Har man sänt information över nätet, finns risken att någon har kopierat den. Om informationen är intressant nog, finns det aktörer som gott kan vänta några decennier för att kunna läsa det hemliga innehållet.

Missbruk av kvantdatorer är inte begränsat till att knäcka kryptering och hemliga koder. Något slags reglering måste därför fås till stånd, även om det är svårt att stoppa specifika beräkningar. Datorer generellt är så mångsidiga att samma teknik kan användas för allt från goda till irrelevanta eller onda syften. Det går inte att i förväg hindra en dator från att utföra olagliga beräkningar, i alla fall inte vattentätt. Möjligtvis kan man stoppa vissa typer av beräkningar med hjälp av automatiserad förhandsanalys av datorprogrammet, på samma sätt som viruskydd analyserar filer vi laddat ner från nätet. Att analysera ett mer generellt program kommer troligen ändå att vara nästan omöjligt. Hur skulle man skilja på en beräkning som försöker hitta molekylstrukturen för ett cancerläkemedel från en beräkning som försöker hitta strukturen för ett nervgift?

Just nu går diskussionen het kring ämnet, föranledd av AI-modellernas enorma framfart. Helt

utan hjälp av kvantdatorer kan chattrobotar skriva skoluppsatser som åtminstone ger intrycket av att författaren vet vad hen skriver om. AI-modeller kan generera målningar av solrosor som en amatör omöjligt kan skilja från en äkta van Gogh, eller foton av politiker i komprometterande situationer. Redan nu kan vem som helst göra videosnuttar där man själv håller ett tal med sin egen röst, men på ett språk man inte själv förstår, och där munnens rörelser passar perfekt med de ofattbara läten som kommer ur munnen. Värre blir det när denna teknik används i bedrägliga syften, till exempel för att skapa interaktiva videosamtal som felfritt imiterar personer du känner.

När AI används till profilering går det ibland oundvikligen fel. Är det rätt att en bank får avvisa din låneansökan bara för att en parameter i modellen som utvärderar din kreditvärdighet inte uppvisar rätt värde? Frestelsen för ännu mer olycksbådande profilering i samhället stiger också med möjligheterna. Hur ska en vanlig medborgare kunna påvisa att något gått fel, då inte ens programmerarna av modellerna längre förstår vad som försiggår i det komplexa artificiella neuronnetet? Får ett försäkringsbolag neka dig en hälsoförsäkring om en avancerad modell helt rätt räknat ut sannolikheten för att just du drar på dig en sjukdom som är dyr att behandla?

Även om reglering inte är perfekt, blir det svårare, eller i alla fall mindre lockande, för till exempel företag att använda sig av oetiska databehandlingsmetoder. Därför är det viktigt att diskussionen nu kommit i gång. Den pågående övningen med att på ett vettigt sätt reglera användningen av AI ger en god grund för den kommande diskussionen om hur man borde reglera den ofantliga beräkningskraft som kvantdatorer för med sig.

Här är det alltså viktigt att aktivera sig i tid. AI-revolutionen överraskade ett samhälle som inte hade spelreglerna klara. Kvantrevolutionen kan komma lika plötsligt, likt bakterierna som övertog sjön på ett par dagar: kvantdatorernas kapacitet växer också exponentiellt, varje tilläggskvantbit fördubblar i princip kvantdatorns kapacitet.

Det är också oerhört viktigt att brett engagera olika aktörer i samhället. Den kommande förändringen är potentiellt så pass omvälvande att allas röst måste ges en chans att bli hörd. Diskussionen kan inte föras av enbart politiker, lobbyister och teknologiskt insatta medlemmar av samhället.

Kvantrevolutionen kommer troligen att komma över oss lite smygande. I början kommer kvantdatorer att förse vissa typer av beräkningar med en moderat försnabbning, som dock är



så pass betydande att man redan nu utreder hur man ska programmera en kombination av superdator och kvantdator. De riktigt stora genombrotten i datorkraft kommer då vi uppnått miljoner, kanske miljarder av välfungerande kvantbitar. Det är en lång väg dit från dagens tusen rätt så felbenägna kvantbitar. Men vi minns att på femtio år har antalet transistorer i klassiska datorchipp ökat miljardfalt. Det finns naturligtvis ingen garanti för att motsvarande svindlande utveckling kommer att ske med kvantdatorer, men det finns heller ingen uppenbar orsak till varför det inte kunde ske.

Redan nu utförs ny vetenskap på kvantdatorer. Att köra en kvantalgoritm innebär att man bearbetar kvanttillstånd på kvantprocessorn för att få svar på en matematiskt formulerad fråga. Kväntdatorer fungerar för att man lyckats tämja den bångstyriga kvantvärlden, i alla fall för korta ögonblick innan dess vilda natur återigen tar över. Därmed har man på sidan om sitt datorbygge konstruerat ett avancerat kvantlaboratorium. Samma teknik som används för att köra datorinstruktioner kan användas för att manipulera kvantvärlden.

Forskare har skapat exotiska nya tillstånd som till exempel tidskristaller och en sorts maskhål på kvantprocessorer. Där vanliga kristaller har

en struktur som upprepas i rummet, som bordsalt med sitt gitter av turvis staplade natrium- och kloratomer, så uppvisar tidskristaller ett repeterande mönster i tiden. Maskhål används flitigt som transportmedel i science fiction, där de förbinder två avlägsna platser men är verklighetsförankrade via Einsteins relativitetsteori. Maskhål kan knyta samman svarta hål, alltså supermassiva astronomiska fenomen med så starka gravitationsfält att de suger i sig allt, till och med ljus som kommer för nära. Också pyttesmå svarta hål har i en form framställts på kvantprocessorer.

I sådana här tillämpningar suddas gränsen mellan datorsimulering och verklighet ut. På klassiska superdatorer kan vi modellera allt från kosmiska strukturer till vattenmolekyler, men vi gör det via matematiska ekvationer och deras lösningar. Företeelserna i sig är inte mer verkliga än racerbanan som spelkonsolen ritar upp; en klassisk processor fungerar inte som en fabrik för varken svarta hål eller nya molekyler. Men med kvantdatorer kan man ibland framkalla det faktiska fenomen som man vill studera. Via rätt konstruerade kvantdatorexperiment kan också själva kvantvärlden studeras på ett helt nytt sätt. Förhoppningsvis leder detta så småningom till tillfredsställande svar på de mer filosofiska aspekterna av kvantmekaniken.

Vilka stora problem kan vi tänka oss att lösa när kvantdatorernas muskler i framtiden vuxit till sig riktigt ordentligt och vi har fått våra etiska kompasser rätt riktade? Här kan vi förstås bara spekulera – troligen kommer kvantdatorer liksom de flesta andra teknologier att tillämpas på helt oförutsägbara sätt. Låt oss ändå avsluta med ett exempel: modellering av den mänskliga hjärnan.

Hjärnan är ett komplicerat organ, och på samma gång en otroligt kraftfull dator, i alla fall för vissa typer av problem. Den är inte heller alltid så pålitlig. Det låter väl bekant! Det har faktiskt redan en tid spekulerats kring möjligheten att hjärnan använder kvanteffekter, att den åtminstone delvis är en kvantdator. Debatten går i vågor, och har fått ny vind i seglen efter en färsk experimentell studie som visade tecken som tolkades som kvantsammanflätning i hjärnor. Nåväl, även om kvantsammanflätning faktiskt skulle ske i våra huvuden betyder det inte att det är kopplat till beräkning. Hur som helst är hjärnan ett så pass komplicerat system att vi troligen *måste* ha en extremt kraftfull kvantdator för att hoppas på att kunna simulera hjärnans funktion. Lyckas vi med det, öppnas portarna till ett äkta science fiction-samhälle.

Om vi kan simulera hjärnans funktion tillförlitligt betyder det att vi kan modellera medvetan-

de. Inte *artificiell* intelligens, utan äkta kreativ mänsklig intelligens. Detta skulle vara enormt, i skala möta-utomjordingar-på-bakgården. Möjligt kunde vi också få ett svar på vad medvetande egentligen är. Detta är dock inte säkert, vi förstår inte ens längre hur dagens AI-algoritmer ”tänker”.

När vi skapat ett äkta medvetande får de etiska aspekterna ny fart. Det kommer att vara mycket svårt att övertygande argumentera för att det nyskapade medvetandet inte är verkligt, utan bara ett datorprogram. Får vi då experimentera på den digitala tvillingen till en människohjärna? Påverkas svaret om vi genom experiment på ett virtuellt medvetande kunde bota eller lindra sjukdomar relaterade till ”riktiga” hjärnor? Diskussionen om hur vi ska behandla digitala hjärnfunktioner kommer att ta lång tid, och vi behöver börja fundera på saken på allvar i tid.

Jag hoppas att denna lilla bok lyckats förmedla en känsla för att vi har en fascinerande framtid framför oss. Kvantdatorer kommer förhoppningsvis att bidra till att hitta svar på några av de stora utmaningar som mänskligheten står inför. I *Vetenskapen och förnuftet* (1986), ett verk fyllt av visdom, ställer sig filosofen Georg Henrik von Wright skeptisk till teknologins möjligheter att lösa våra problem. Han hade i stället ett

hopp om att vår livsstil kunde bli mer naturlig och förnuftig. Men kan vi verkligen omskapas som människosläkte? Kan våra samhällsstrukturer reformeras så radikalt att en närmast revolutionerande förändring mot ett mer hållbart leverne förverkligas?

Faktum är att vi nog behöver både den mer naturmedvetna och den teknologiska livsformen. En tillräckligt stor del av människorna måste övertygas om att börja agera mer naturvänligt, men vi klarar oss inte längre utan teknologiska genombrott för att motverka effekterna av vår livsstil. För att konstruera till exempel kraftfulla kvantdatorer *behövs* en hög grad av teknologisträvan. I rätta händer kan kvantdatorer hjälpa till att lösa flera viktiga problem i samhället, särskilt relaterat till just en hållbar övergång till ett mer ekologiskt levnadssätt. Det viktiga nu är att garantera att det faktiskt finns tillräckligt många rätta händer i framtiden. Oberoende av kvantdatorernas vara och inte vara, måste vi aktivt uppmuntra och stödja fortsatt nyfikenhet hos de nya generationerna.

## LITTERATUR

- Aaronson, Scott, *Quantum Computing since Democritus*, Cambridge: Cambridge University Press 2013.
- Feynman, Richard P., "Simulating Physics with Computers", *International Journal of Theoretical Physics* 21, 1982:6/7, s. 467–488. <https://doi.org/10.1007/BF02650179>
- Gribbin, John, *In Search of Schrödinger's Cat. Quantum Physics and Reality*, Toronto & New York: Bantam Books 1984.
- Jansson, Tove, *Muminpappans Bravader. Skrivna av Honom Självt*, Helsingfors: Schildts 1950 .
- Mermin, N. David, "Could Feynman Have Said This?", *Physics Today* 57, 2004:5, s. 10–11. <https://doi.org/10.1063/1.1768652>
- von Wright, Georg Henrik, *Vetenskapen och förnuftet*, Helsingfors: Söderströms 1986.

Boken utges med stöd av Christian och Constance Westermarcks fond  
inom Svenska litteratursällskapet i Finland.

Denna bok är nummer 2 i serien Värt att veta och utges gemensamt  
av Svenska litteratursällskapet i Finland och Appell Förlag.

© Författaren och Svenska litteratursällskapet i Finland 2024. Detta verk  
är licensierat under [Creative Commons Erkännande-Ickekommersiell-  
IngaBearbetningar 4.0 Internationell \(CC BY-NC-ND 4.0\)](#).

Pdf-utgåva

Omslag och grafisk formgivning: Antti Pokela

Typsnitt: Vinyl, Chronicle

ISBN 978-951-583-605-2 (tryckt utgåva, Finland) [sjs.fi](https://sjs.fi)

ISBN 978-91-988150-6-1 (tryckt utgåva, Sverige) [appellforlag.se](https://appellforlag.se)

ISBN 978-951-583-632-8 (epub),

<http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-583-632-8>

ISBN 978-951-583-633-5 (pdf),

<http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-583-633-5>

Värt att veta

ISSN 2984-0899 (tryckt)

UDK 004.38