

Kvantteknologi

– populärvetenskaplig beskrivning

1 Kvantfysik, från teori till pågående revolution

I början av 1900-talet gjordes observationer som inte stämde med den traditionella, klassiska fysiken. Till exempel kunde forskare konstatera att varma, svarta föremål sände ut elektromagnetisk strålning vid andra våglängder än förväntat, och att atomer enbart kunde sända ut och absorbera ljus av bestämda frekvenser.

För att förklara avvikelserna föreslog fysikern Max Planck år 1900 att ljuset sänds ut i små, odelbara "paket" – alltså att det är kvantiserat. Det var startskottet för kvantfysiken som beskriver världen på atomnivå. Tidens skarpaste fysiker, bland andra Niels Bohr och Albert Einstein, ledde vidareutvecklingen. De insåg snabbt att de var ett paradigmskifte på spåret, snarare än en justering av den klassiska fysiken. På 1930-talet var kvantteorin i princip komplett, även om många av dess konsekvenser förstods först långt senare.

Kvantfysiken har haft en enorm inverkan på samhället. Genom att utnyttja kvantfysiska egenskaper hos ljus och material har forskare uppfunnit såväl lasern som transistorn. Uppfinningarna ligger till grund för hela den informationsteknologi – datorer, internet och mycket mer – som i stor utsträckning formar dagens samhälle. Det var den första kvantrevolutionen.

Men även om man lärde sig att utnyttja vissa kvantfysiska egenskaper sågs det länge som omöjligt att kontrollera enskilda kvantsystem, till exempel individuella atomer, elektroner eller ljuspartiklar (fotoner). Först på 1980-talet lyckades forskare utveckla metoder för att mäta och styra enstaka atomer och fotoner, vilket belönades med Nobelpriset år 2012. Parallellt utvecklade andra forskare elektroniska komponenter av halvledare och supraledare, där de kunde manipulera enstaka elektroner.

Kontrollen av individuella kvantsystemen har öppnat dörren för en andra kvantrevolution, med helt nya möjligheter. Idag ser man mål som extremt snabba datorer, helt avlyssningssäker kommunikation och hyperkänsliga mätmetoder.

Efter många år av grundforskning börjar tillämpningarna komma inom räckhåll, och forskare såväl som beslutsfattare och företagsledare börjar inse att den kommande kvantteknologin har potential att kraftigt förändra vårt samhälle. Det satsas nu stort på kvantteknologi i hela världen. EU sjsätter en tioårig satsning på en miljard euro år 2019. Minst lika stora program finns i Nordamerika, Asien och Australien. It-företag som Google, IBM, Intel och Microsoft gör också betydande satsningar på kvantteknologi.

2 Kvantteknologins centrala fenomen

Många av kvantfysikens förutsägelser strider mot vår intuition. Men kvantteorin har hittills visat sig vara korrekt på alla punkter man kunnat kontrollera. Kvantteknologi syftar till att utnyttja kvantfysikens häpnadsväckande fenomen för att göra helt nya saker möjliga. Nedan beskrivs de viktigaste fenomenen.

2.1 Superposition

I vår vardag har saker och ting bestämda egenskaper – de kan till exempel bara vara på ett ställe samtidigt. Men i kvantfysikens värld råder osäkerhet och slump: Elektroner som snurrar kring atomkärnor kan samtidigt vara både här och där, och en ljuspartikel (foton) kan på samma gång färdas längs två olika vägar. Sådana sammansatta tillstånd kallas för *superpositioner*. Först när en mätning görs blir partikeln intvingad i ett av de möjliga alternativen, slumpen avgör vilket. Begreppet superposition är generellt och gäller även för andra egenskaper som energi, elektrisk laddning och hastighet.

Superposition gör det möjligt att lagra och behandla enorma mängder information, läs mer i stycke 3.1 Kvantdatorer.

2.2 Sammanflätning

Sammanflätning (på engelska *entanglement*) är en superposition som sträcker sig mellan två eller flera partiklar. Intressant nog kvarstår sammanflätningen av partiklarnas tillstånd även när de separeras på mycket stora avstånd.

Exempel: Ljuspartiklar, fotoner, kan polariseras antingen horisontellt eller vertikalt. Vi försätter två fotoner i ett sammanflätat tillstånd, som är en superposition av ett tillstånd där båda fotonerna är horisontellt polariserade och ett tillstånd där båda är vertikalt polariserade. Fotonernas polarisering är alltså obestämd, dock har de alltid samma polarisering. Sedan skickar vi iväg den ena fotonen till månen. När vi mäter den andra fotonens polarisation här på jorden får vi slumpmässigt resultatet horisontellt eller vertikalt. Och genast antar fotonen på månen samma polarisering, trots att den befinner sig så långt bort utan någon kommunikationskanal till jorden. Einstein var mycket skeptisk och kallade det för ”spöklik avståndsverkan”, men experiment har bevisat att det stämmer.

Sammanflätade tillstånd kan användas för att skicka helt avlyssningssäkra meddelanden.

2.3 Klämda tillstånd

En av hörnstenarna inom kvantfysiken är Heisenbergs osäkerhetsprincip. Den innebär att det finns en gräns för hur noggrant det går att samtidigt känna till positionen och hastigheten för ett objekt. Samma sak gäller för andra sammanlänkade variabler, till exempel frekvens och tid.

Normalt fördelar sig osäkerheten lika mellan de två variablerna. Men genom att manipulera kvantsystemet kan man få osäkerheten att främst belasta den ena variabeln. Det kallas för ett *klämt tillstånd*. I ett sådant tillstånd är det möjligt att mäta den andra variabeln med oerhört hög precision, vilket kan utnyttjas för att konstruera ytterst känsliga mätinstrument.

2.4 Dekoherens

Superpositionstillstånd (se stycke 2.1) är mycket känsliga för störningar. Störningar får superpositionen att avta och till slut kollapsa – och då försvinner de kvantfysiska egenskaperna. Processen kallas *dekoherens* och är en av de största utmaningarna att hantera inom kvantteknologin. Det finns en nämligen en inneboende motsägelse mellan att isolera systemet från omgivningen för att undvika dekoherens och behovet av att kunna manipulera systemet.

Ju större systemet är, desto svårare blir problemen med dekoherens. Men stora framsteg har gjorts de senaste 20 åren och system med tiotals kvantbitar (definierat i stycke 3.2 Kvantdatorer) kan nu kontrolleras väl.

3 Kvantteknologins fyra områden

Kvantteknologi bygger på förmågan till precis kontroll av enskilda kvantsystem för att kunna utnyttja de ovan beskrivna fenomenen. Tillämpningarna finns inom säker kommunikation, ytterst känsliga mätmetoder och beräkningskraft som vida överstiger dagens superdatorer.

Kvantteknologin delas ofta in i fyra områden: kvantdatorer, kvantsimulatorer, kvantkommunikation och kvantsensorer. De två sistnämnda är mycket nära kommersialisering och produkter har redan börjat dyka upp.

3.1 Kvantdatorer

I dagens datorer är den minsta informationsbäraren en så kallad bit som kan ha värdet 0 eller 1. Men den kvantfysiska motsvarigheten, en så kallad kvantbit, kan genom superposition ha både värdet 0 och 1 på samma gång. Två kvantbitar kan anta fyra värden samtidigt – 00, 01, 10 och 11 – och varje ytterligare kvantbit fördubblar antalet möjliga tillstånd. Det innebär att en kvantdator med 300 kvantbitar skulle kunna representera fler värden än vad det finns partiklar i hela universum. Och för att överträffa beräkningskraften hos dagens superdatorer räcker det med 50–60 kvantbitar.

De första idéerna om att utnyttja kvantsystem för beräkningar kom på 1980-talet, men i början ansågs de sakna praktisk betydelse. Dels saknades användbara algoritmer (kvantdatorer kan inte programmeras på samma sätt som vanliga datorer) och dels visste ingen hur man skulle rätta till de fel som ofrånkomligen skulle dyka upp i en kvantdator.

Situationen förändrades drastiskt år 1994 när Peter Shor publicerade en kvantalgoritm som mycket snabbt hittar primtalsfaktorer i stora tal, vilket är en nyckel för att kunna knäcka dagens krypteringskoder (se 3.3 Kvantkommunikation). Året efter visade han hur särskild felkorrigeringskod kan hantera de fel som uppstår i en kvantdator. Därmed väcktes intresset för att bygga en kvantdator bland forskare världen över. En kvantdator med många kvantbitar är enligt många det ultimata målet inom kvantteknologin.

De mest lovande teknikerna för att bygga en kvantdator är jonfällor och supraledande kretsar. I en jonfälla utgörs kvantbitarna av svävande joner som hålls på plats av elektriska

och magnetiska fält, och manipuleras med laserljus. Rekordet i en jonfälla är för närvarande 14 fullt kontrollerade kvantbitar.

Supraledande kvantbitar består av elektriska kretsar utan elektriskt motstånd (=supraledande), där energin växlar mellan att vara elektrisk och magnetisk. Kretsarna manipuleras med mikrovågor. Eftersom kretsarna är placerade på ett mikrochip är det relativt rättframt att skala upp till ett stort antal kvantbitar. En stor begränsning har varit kort dekoherenstid (se stycke 2.4), men genom idogt utvecklingsarbete har den kunnat förlängas dramatiskt under de senaste 20 åren. It-företag som Google, IBM och Intel har alla startat forskningsprojekt på supraledande kvantdatorer. Hösten 2017 lanserade IBM den hittills största processorn med 16 kvantbitar, och Google har annonserat att de arbetar på en 49-kvantbitarsprocessor.

En viktig men svår del är att implementera koder för att begränsa effekten av de fel som, precis som i alla datorer, oundvikligen uppstår. Ett alternativ är att låta varje logisk kvantbit representeras av flera fysiska kvantbitar som läses ut fyra åt gången för att kontrollera om ett fel har uppstått. Ett annat alternativ är att även koda kvantinformationen i mikrovågor.

En kvantdator lämpar sig för att lösa problem som involverar ett stort antal olika möjligheter, till exempel optimeringsproblem inom maskininläring och artificiell intelligens. Den är också lämpad för beräkning av egenskaper hos stora molekyler, till exempel för att utveckla nya läkemedel eller material.

3.2 Kvant simulatorer

En kvantsimulator är en specialdesignad kvantdator som konstruerats för att simulera en viss process. Den kan därmed bara lösa ett begränsat antal problem. Om man vill lösa andra problem måste man bygga en ny kvantsimulator, utformad för att lösa just dem.

Ett antal enklare exempel på kvantsimulering har redan demonstrerats, men har ännu inte överträffat klassiska datorer. Utvecklingen går emellertid snabbt och forskare förbereder sig för att skala upp till den nivå som krävs för att demonstrera så kallad kvantfördel (på engelska *quantum supremacy*), vilket innebär att lösa ett problem som är utom räckhåll även för den mest kraftfulla klassiska datorn. Användbara tillämpningar av kvantsimulering förväntas inom fem år.

3.3 Kvant kommunikation

Vårt internetbaserade samhälle med internet-banker, digitala vårdjournaler, webbaserad handel med mera, bygger på säker överföring av information. Idag används kryptering som är baserad på förmodat beräkningstunga problem, till exempel att hitta primtalsfaktorerna i mycket stora tal.

Men när kvantdatorn gör sitt intåg blir det en enkel match att knäcka dagens kryptering. Dock erbjuder kvantteknologin också en lösning – säker överföring av krypteringsnycklar med hjälp av kvantkommunikation. Det är den enda kända lösningen som kan garantera att en utomstående inte kan läsa det krypterade meddelandet.

Krypteringsnyckeln är den kod som mottagaren behöver för att kunna avkoda det krypterade meddelandet. Sändaren använder enstaka fotoner för att skicka över krypteringsnyckeln till mottagaren. Eftersom det inte går att göra en mätning på en foton utan att den påverkas kan man vara säker på att upptäcka om en utomstående försöker stjäla krypteringsnyckeln.

Idag finns det kommersiella system som kan överföra kvantkrypteringsnycklar genom en obruten optisk fiber över avstånd på cirka 100 kilometer, dock med ganska låg hastighet.

För att garantera säkerheten i nästa generations kommunikationssystem måste ett globalt kvantnätverk, som snabbt och säkert kan överföra av krypteringsnycklar mellan många olika punkter, utvecklas. Kvantfenomenet sammanflätning (se stycke 2.2) spelar en nyckelroll när det gäller att förstärka och vidarebefordra kvantsignaler i ett stort nätverk.

3.4 Kvantensensorer

Människans kunskap om världen och våra tekniska framsteg begränsas av vad vi kan mäta, och hur noggrant. Forskare håller nu på att lära sig att använda enskilda partiklar, till exempel fotoner och elektroner, som sensorer i mätningar av krafter, gravitation, elektriska fält etc. Därmed pressas mätförmågan långt bortom vad som tidigare varit möjligt. Till exempel har forskare demonstrerat mätteknik som kan mäta krafter lika svaga som gravitationskraften mellan två personer på varsin sida av den amerikanska kontinenten.

Heisenbergs osäkerhetsprincip (se stycke 2.3) begränsar hur noggranna mätningar det går att göra. I de flesta fall är osäkerheten så oerhört liten att den kan försummas. Men på mycket liten skala, om man till exempel vill mäta på en enstaka elektron, är osäkerhetsprincipens begränsningar reella. Kvantteknologin tillhandahåller verktyg för att öka precisionen i den storheten vi vill mäta genom att förskjuta osäkerheten till en annan variabel (ett så kallat klämt tillstånd, se stycke 2.3). Den ger också möjlighet att skapa specialdesignade kvanttillstånd för specifika mätuppgifter som gör att mätningarna blir okänsliga för de starkaste bruskillorna.

Utvecklingen av kvantsensorer kommer att leda till kraftfullare instrument för att mäta elektriska och magnetiska fält såväl i vår omgivning som inuti våra kroppar. Vi kan också räkna med instrument som kan mäta lokala variationer i gravitation för att finna mineral, vatten eller nergrävda eller inbyggda rörledningar och utvecklade varningssystem för jordbävningar och vulkanutbrott.