

EVIGHETSMASKINER, TIDSMASKINER OCH KVANTDATORER:

OM FYSIKENS GRÄNSER FÖR AVANCERAD TEKNOLOGI

Öppen föreläsning 18 april 2007. Tyvärr saknas illustrationerna här.

Mitt första uppdrag som professionell fysiker var resultatet av en annons i Göteborgs-Posten. Man sökte "en fysiker för beräkningsarbete". Sedan en uppsättning betyg sänts in till den uppgivna adressen, visade det sig att uppdraget bestod i att göra en analys av en ritning till en evighetsmaskin --- en relativt enkelt sak som bestod av några asymmetriska flottörer nedsänkta i vatten. En rimligt praktisk person insåg genast i vilket läge den tänkta maskinen skulle haka upp sig, men det kostade mig en hel del möda att åstadkomma något slags teoretiskt argument för detta. För hederlighetens skull var jag ju tvungen att genomföra argumentet utan att vädja till principen om energins bevarande i ett slutet system. Denna princip är nämligen en direkt konsekvens av antagandet att evighetsmaskiner inte kan byggas. Just "antagandet". Den speciella gren av fysiken som kallas *termodynamik* utvecklar sedan en teori baserad på detta antagande, som visar sig ha vittgående konsekvenser. Vi tror på antagandet inte därför att vi har några övertygande argument för antagandet i sig, utan därför att teorins konsekvenser (som står och faller med antagandet) har stått sig inför empirisk prövning.

Termodynamiken utvecklades i samspel med en dåtida spetsteknologi, nämligen ångmaskinens. En grundide i teorin är att varje tillstånd som ett fysikaliskt system kan befinna sig i kan tillordnas ett bestämt numeriskt värde på sin "energi". Ett fysikaliskt system kan vara ungefär vad som helst, eller åtminstone vad som helst som upptar en ändlig volym. En ångmaskin kan fungera som exempel, en liter vatten eller en klocka går också bra. En del av energin kan vara närvarande som värme, någon annan del kan figurera i form av en uppdragen spiralfjäder. Fjäders kan utvidga sig och sätta igång någon form av rörelse, och rörelsen kan via friktion generera värme. Summan av dessa bidrag till systemets energi förblir konstant, så länge ingen energi flödar ut ur systemet. (Vill man kontrollera utsagan är det alltså lämpligt att stänga in klockan i någon form av termosflaska, som förhindrar allt värmeläckage till omgivningen.) Vi har nu termodynamikens första huvudsats:

1: *Summan av alla energiförändringar är noll.*

En evighetsmaskin av första slaget är då inte bara en maskin som går runt i evighet, någonting som i och för sig inte är principiellt omöjligt --- det finns inga principiella gränser för hur liten friktionen kan göras. En evighetsmaskin måste kunna dra upp en spiralfjäder, utan att själv förlora någon energi. Sedan fjädern dragits upp återgår maskinen till utgångsläget, och kan fortsätta att dra upp nya fjädrar i all oändlighet. Vi antar att detta är omöjligt.

För att få en ångmaskin att dra upp en spiralfjäder måste energi tillföras maskinen i form av värme. En närmare analys visar att situationen är något mer komplicerad än så. En viss

andel av värmets värme läcker ut ur maskinen utan att utföra något nyttigt arbete alls. Och frågan är: hur liten kan denna andel göras? Finns det någon teoretisk gräns för detta?

Vi vet att rörelse restlöst kan omvandlas till värme. Det är vad som händer när en klots som glider på ett bord bromsas upp av friktionen mot bordet. En evighetsmaskin av andra slaget är en maskin som restlöst omvandlar värme till energi; utan tvivel en nyttig maskin att ha, eftersom den skulle kunna driva en bil genom att ta värme från luften, värme som sedan skulle återföras till luften via friktion i axlar och hjul. Termodynamikens andra huvudsats säger att en sådan maskin inte kan byggas. Vanligtvis formuleras påståendet med hjälp av begreppet entropi. Detta är definierat så att en kropp som tillförs värmemängden Q vid temperaturen T ökar sin entropi med beloppet $S = Q/T$ (om värmets avges, blir entropiförändringen negativ). I denna formel måste man använda den korrekta definitionen av begreppet *temperatur*. Utan att gå in på detaljerna kan jag säga att den lämpliga temperaturskalan är den "absoluta" Kelvinskalan, vars nollpunkt är -273 grader Celsius, en gräns som inte kan underskridas. Satsen säger:

2. Summan av alla entropiförändringar är större än eller lika med noll.

Slutsatsen om evighetsmaskiner av andra slaget följer omedelbart. Eftersom maskinen själv går runt i ett kretslopp är dess entropi densamma vid början och vid slutet. Omgivningen däremot har avgett en viss värmemängd och därmed minskat sin entropi. Den totala entropiförändringen blir negativ, vilket är förbjudet.

Den efterlysta teoretiska gränsen för ångmaskinens verkningsgrad är en direkt konsekvens av de två huvudsatserna. Om maskinen tar emot värme vid temperaturen T , och släpper ut värme vid temperaturen t , kommer kvoten mellan utfört arbete och insatt värme alltid att vara mindre än $(1 - t/T)$.

Men skall vi tro på detta? Den svenske uppfinnaren Baltzar von Platen gjorde det inte. Han berättar i sina intressanta, eller kanske till och med häpnadsväckande, memoarer att han redan som sextonåring, uppmuntrad av en telepatisk kontakt med en utomjordisk ande, valde som sin livsuppgift att konstruera en evighetsmaskin av andra slaget. Alla de uppfinningar han sedan gjorde, som det von Platen-Munterska kylskåpet och metoden att syntetisera diamanter, var rena biprodukter av denna verksamhet. Å andra sidan har vi ännu inte sett några evighetsmaskiner, av ena eller andra slaget, i arbete, så om vi i likhet med det amerikanska patentverket kräver att få se en fungerande modell för att tro på saken, kan slutsatsen bara bli en. Dessutom är det så att termodynamiken kan användas för att dra en mängd detaljerade slutsatser om materiaklumpars uppförande vid uppvärmning: hur de ändrar temperatur och tryck, utvidgas, och så vidare. Dessa slutsatser står och faller med de två huvudsatserna, och de har visat sig stämma i varje enskilt fall.

Hur det än kan vara med deras existens, är evighetsmaskinerna av stort principiellt intresse på grund av sitt nära förhållande till centrala naturlagar --- naturlagar som dessutom har en mängd konsekvenser för faktiskt existerande maskiner, som ångmaskiner och kylskåp. Det kan därför vara av intresse att granska några andra principiellt intressanta maskiner, för att se vad vi kan lära oss av dem. Jag tänker ta upp dels tidsmaskiner, dels de principiella gränserna för informationsteknologin, i den

ordningen eftersom vi leds att betrakta de förstnämnda genom att fundera vidare på energibegreppet, och till de senare via entropin. Och energin är lättare att förstå; när allt kommer omkring har vi en minister som ansvarar för energifrågor, medan entropifrågorna lämnas vind för våg.

Så vad kan vi säga mer om energi? Varför finns det en sådan storhet? Det finns ett rimligt svar på den frågan, som går i två steg. Vi börjar med att betrakta all materia som uppbyggd av atomer, atomer som rör sig enligt Newtons mekaniska lagar (eller enligt mer moderna kvantmekaniska principer, det är vilket som vad detta argument beträffar). På så sätt blir vi av med den ena aningen artificiella värmeenergin. "Värme" är helt enkelt en oordnad rörelse hos atomerna, och värmeenergi är en form av rörelseenergi. I mekaniken talar vi därför om bara två slags energi, rörelseenergi och potentiell energi. Den senare är den typ av energi som finns lagrad i en uppdragen spiralfjäder, och kan förstås som en konsekvens av de kraftfält i vilka atomerna rör sig. Det här är inte platsen att gå in på detaljer. Vår fråga är varför energin är bevarad. Den har ett elegant svar, först givet av den tyska matematikern Emmy Noether. *Noethers teorem* säger --- i grov översättning från det precisa matematiska språk i vilket teoremet är formulerat --- att energin är bevarad därför att naturlagarna inte förändras med tiden. Eller om vi så vill, energins bevarande är en direkt konsekvens av det sätt på vilket tiden kommer in i mekanikens lagar.

Men är vi säkra på hur tiden egentligen skall komma in i mekanikens lagar? I ett universum som utvidgar sig från en Big Bang kunde man ju tänka sig att naturlagarna också är stadda i utveckling, och då blir Noethers argument kanske irrelevant? Det ligger i själva verket något i detta. Den bästa teorin vi har för rummets och tidens struktur är Einsteins allmänna relativitetsteori, och denna teori ger inte något enkelt svar på frågan. Jag kan tänka mig att någon slags maskin av kosmologiska dimensioner skulle kunna utmana termodynamikens första huvudsats --- men jag kan inte se att Einsteins teori ger något manöverutrymme åt uppfinnare vars konstruktioner är mindre till omfånget än den galaxhop i vilken Vintergatan är medlem.

Låt oss granska relativitetsteorin från vår speciella utgångspunkt. Kan man bygga en tidsmaskin? Har man läst H. G. Wells' roman har man åtminstone de nödvändiga begreppen för att starta diskussionen. Vi börjar med att tänka oss ett *rumtidsdiagram*, det vill säga en "karta" över tid och rum, med tiden utlagd längs en fjärde "koordinataxel". Varje ting i tid och rum motsvaras nu av en *världslinje*, en kurva i den fyrdimensionella rumtiden. Av pedagogiska skäl ritas vi bara ut två av axlarna, nämligen x och t . Hur mycket tid förflyter nu mellan två punkter på en given världslinje? Regeln i Newtons mekanik är att den förflutna tiden helt enkelt anges av hur långt världslinjen har kommit i t -axelns riktning. Vår ursprungliga fråga spricker elegant i två. Kan vi bygga en evighetsmaskin av första slaget, som tar oss bakåt i tiden, eller en av andra slaget, som tar oss framåt i tiden? Det är svårt att se från kartan hur en evighetsmaskin av andra slaget skulle kunna existera. Saken hänger naturligtvis på hur fort tiden går längs en världslinje. Regeln i Newtons mekanik är att klockan helt enkelt visar hur långt fram i tidsled som världslinjen har kommit, och tidsmaskiner av andra slaget blir därmed omöjliga. Däremot kan man lätt tänka sig en världslinje som böjer sig och börjar gå baklänges i tiden. Vid närmare eftertanke ser saken inte så enkel ut. En världslinje kan inte ändra lutning utan att accelerera (med hjälp av raketmotorer, eller på annat sätt), och

accelerationens storhet kan läsas ut av diagrammet. En mer fullständig analys visar att accelerationen blir oändlig i de punkter där världslinjen byter riktning tidsmässigt. Och det ser inte lovande ut.

Saken ser emellertid helt annorlunda ut i den *speciella relativitetsteori* som utvecklades av Einstein och Minkowski för hundra år sedan. Min poäng just nu är att Einsteins speciella relativitetsteori är precis vad man landar i, om man insisterar på att tidsmaskiner av andra slaget skall vara möjliga.

Enligt den speciella relativitetsteorin har ljusets hastighet en mycket speciell ställning. Ljuset rör sig alltid med 300 000 km/sekund, oberoende av hastigheten hos det objekt från vilket det sändes ut. Det gör det praktiskt att anpassa de längd- och tidsenheter som vi använder på våra koordinataxlar. Låt oss räkna tid i år, och längd i ljusår. Världslinjen för ett ljusknippe blir då en linje som lutar 45 grader i vårt diagram, eftersom ljushastigheten nu är 1 ljusår/år.

Nu kommer nästa påstående från teorin: Det är fortfarande sant att den upplevda accelerationen längs en världslinje kan läsas ut från diagrammet, men nu blir accelerationen oändlig i de punkter där lutningen uppnår 45 grader. Ett annat sätt att säga samma sak är att man aldrig kan accelerera ett stillastående föremål upp till ljushastigheten. Och tidsmaskinen av det första slaget ser ännu mer omöjlig ut.

Däremot har tidsmaskinen av andra slaget plötsligt blivit en möjlighet. Mer än så, sådana tidsmaskiner har redan byggts, låt vara att ingen har lyckats färdas så särdeles långt fram i framtiden med dem. Vi kommer till den slutsatsen genom att observera att relativitetsteoriens antaganden vid första påseendet ser självmotsägande ut. Hur kan samma ljusknippe röra sig med 300 000 km/sekund relativt två observatörer som själva befinner sig i relativ rörelse? Svaret är egentligen värt ett eget kapitel. För ögonblicket räcker det med att säga att en nödvändig konsekvens av svaret är att den tid som förflyter längs ett segment av världslinjen ges av längden på detta segment --- med det viktiga tillägget att för att beräkna denna längd måste man använda sig av en ny och oväntad version av Pytagoras' sats: *Kvadraten av längden av en världslinje är skillnaden mellan kvadraterna på avstånden i tids- och rumsled.* Detta blir meningsfullt tack vare att vi har en fundamental naturkonstant med sorten hastighet, vilket gör att vi kan jämföra avstånd i tid med avstånd i rum med varandra; det vill säga att man egentligen skall dividera avståndet i rumsled med ljushastigheten innan man tar kvadraten, något som jag kunde ignorera därför att jag valde enheter i vilka ljushastigheten är lika med ett. Använder vi kilometer och sekunder som enheter måste man dividera avståndet i rumsled med 300000 innan man tar kvadraten. Man ser då att för "vanliga" hastigheter kommer resultatet knappast att skilja sig från det Newtonska.

Vi tänker oss nu ett rymdskepp på väg till Vega, som ligger 26 ljusår bort. Låt det röra sig med 87 procent av ljushastigheten relativt jorden, vilket gör att resan beräknas ta 30 jordår. Astronauterna åldras nu med ett belopp som ges av den nya versionen av Pytagoras' sats. En enkel räkning visar att detta blir 15 år; $(30 \text{ i kvadrat}) - (26 \text{ i kvadrat}) = 224$, vilket blir hårsmånen mindre än (15 i kvadrat) . Än så länge är detta inte en särskilt upprörande slutsats, eftersom det inte går att jämföra klockorna på jorden och i skeppet på något direkt sätt. Om man från jorden skickar ut en ljussignal med ett meddelande om

att 30 år har gått, tar det 26 år för signalen att nå fram, och vid det laget är dess innehåll inte längre så upphetsande. Men låt oss säga att förhållandena på Vega är förskräckliga, så att skeppet vänder och far tillbaka till jorden med samma hastighet som det höll under utfärden. När astronauterna kommer tillbaka till jorden har de blivit 30 år äldre (och förhoppningsvis lika mycket klokare). Men på jorden har 60 år förflutit. Astronauterna har alltså använt 30 år för att färdas 60 år in i framtiden. De har befunnit sig i en tidsmaskin av andra slaget.

Om vi ändrar resan till Vega till en resa till månen, och använder oss av en Apollokapsels hastighet, blir resultatet ett hopp fram i framtiden med någon miljondels sekund. Detta går att mäta med lämpliga klockor, men är knappast värt priset för resan. Effekten är emellertid av teknologiskt intresse i alla fall, och måste medräknas för att det så kallade GPS-systemet för positionsbestämningar skall fungera med den önskade precisionen. GPS-systemet bygger nämligen på ytterst noggranna tidsbestämningar av signaler som utväxlas mellan rörliga satelliter.

Men hur färdas bakåt i tiden? Skall vi ge upp tanken? Inte nödvändigtvis. Einsteins allmänna relativitetsteori har mycket mer att säga om rumtidens struktur, och vi kan ännu inte överblicka alla dess konsekvenser. Det finns lösningar av ekvationerna som beskriver tänkbara universa i vilka tidsmaskiner av första slaget alldeles avgjort är möjliga, men dessa lösningar har egenskaper som drastiskt skiljer dem från det universum som vi ser omkring oss. Det har under senare år gjorts stora ansträngningar för att bringa reda i dessa frågor. Själv tillhör jag dem som anser det troligt att teorin har en inbyggd mekanism som säger att världslinjer som korsar sig själva inte kan uppstå om de saknades under universums tidiga skede --- vilket skulle innebära att tidsmaskiner av första slaget inte kan uppfinnas i vårt universum. Det förefaller nämligen som om bildandet av slutna världslinjer, i ett universum som inte har dem inbyggda från början, skulle kräva att energin fördelas på ett sätt som inte verkar fysikaliskt rimligt. Sista ordet är inte sagt om detta, men förhoppningen är att vidare analyser skall leda till en fördjupad förståelse av relativitetsteorin själv. Det mer praktiska utförandet av tidsresor kan vi tills vidare lämna därhän.

Låt oss istället återvända till termodynamiken, och mer speciellt till entropibegreppet. Detta har nämligen med begreppet *information* att göra, och därmed någonting att göra med vårt tredje och sista ämne. Nu har vi inte längre för avsikt att undvika begreppet värme, vi tänker tackla det mer rätt på, så att säga. Kom ihåg att värmeenergi påstods bestå av mikroskopiska rörelser hos atomerna --- rörelser som undandrar sig vår detaljerade kontroll. När det vi kallar rörelseenergi omvandlas till värme via friktion, är det egentligen så att rörelseenergin sprider sig till nya frihetsgrader som vi inte längre kan kontrollera. De allmänna dragen i situationen är välkända för varje barnfamilj. Man börjar dagen med alla leksaker, Pokemonkort, med mera förvarade i väl definierade och etiketterade lådor. Vid slutet av dagen har de spridit sig till ett otal platser. I detta fall är det inte fundamentalt omöjligt att återsamla dem på deras ursprungliga platser, men i praktiken räcker vår förmåga ofta inte till. Ett precist svar på frågan vad entropi är blir någonting i stil med "längden av det kortaste meddelande som talar om exakt var leksakerna befinner sig".

Vad som händer när arbete omvandlas till värme är att energi som har funnits samlad i

väl kontrollerade frihetsgrader, som till exempel genomsnittshastigheten för atomerna i en klots, sprider sig ut i de enskilda atomernas rörelser --- och när klotsen innehåller i storleksordningen en miljon miljon miljon miljon atomer innebär det att vi har förlorat alla möjligheter att utöva någon detaljerad kontroll över dem. När entropin väl har ökat, kan vi inte få den att minska igen.

Vi går tillbaka till leksaksexemplet. Svaret på frågan vad entropin är kan verka tvetydigt. Antag att varje låda innehåller 27 fack, och att det inte räcker med att de första 27 leksakerna ligger i första lådan, vi måste också tala om i vilket fack varje leksak ligger. Innebär det att entropin blir större? Svaret är väsentligen "ja", men nu har vi definierat om entropin. I motsats till energin är entropin inte bara en egenskap hos det fysikaliska systemet, den är också avhängig hur vi väljer att beskriva systemet, vilket i sin tur avspeglar den grad av kontroll som vi har över situationen. Entropi har med information att göra.

Vi börjar närma oss vår tredje och sista fråga: Vad har fysiken att säga om de yttersta gränserna för informationsteknologin? En första observation är att ju snabbare datorer man vill ha, ju mindre måste man göra dem, helt enkelt därför att ljushastigheten sätter en gräns för hur snabbt signaler kan skickas mellan datorns olika delar. Men som en grov tumregel gäller att ju mindre ett föremål blir, ju mer relevant blir det att fråga om det är nödvändigt att tillgripa kvantmekaniken, snarare än Newtons mekanik, för att beskriva det. I alla fall vill jag säga några ord om hur kvantmekaniken kan påverka svaret på vår fråga; och framförallt om hur kvantmekaniken eventuellt kan utvidga gränserna för vad som är teoretiskt möjligt.

Vår utgångspunkt blir den minsta informationsbärande enheten i en dator, en *bit*, vilket är någon form av fysikaliskt system som kan anta ett av endast två möjliga tillstånd, "på" eller "av". Har man tillräckligt många bitar kan man koda vilken information som helst, till exempel genom att översätta det svenska alfabetet till Morse-alfabetet (punkter och streck), eller arabiska siffror till binära ettor och nollor. Och nu är poängen att så enkla system överhuvudtaget inte kan definieras inom kvantmekaniken. Det enklaste fysikaliska system som kan tänkas är någonting som numera kallas en *qubit*, och vår första uppgift blir att förstå vad som menas därmed.

Låt oss betrakta en klassisk bit som ett fysikaliskt system som kan svara ja eller nej på en enkel fråga. Om vi har ofullständig kunskap om systemet kan vi bara förutsäga sannolikheten för att svaret är ja (eller nej), men ett av de två möjliga svaren erhålls alltid vid en direkt fråga, och det finns inga andra frågor som systemet kan svara på.

I kvantmekaniken är situationen mer komplex. Ett exempel på ett system som är så enkelt som möjligt ges av en silveratom, en atom som är utrustad med en liten magnetisk dipol som gör att den böjs av i en av två möjliga riktningar när den passerar genom ett lämpligt inhomogent magnetfält. Detta är det berömda Stern-Gerlach-experimentet från år 1921, vilket var möjligt att genomföra endast genom en för den tiden mycket avancerad detektionsteknik (man blåste cigarr-rök på den skärm som träffades av silveratomerna). I vårt språkbruk ger systemet ett av två möjliga svar på en fråga. Det är möjligt att preparera atomen så att den alltid böjer av åt ett bestämt håll; det är nämligen så att en atom som redan har avvikit åt höger vid ett tillfälle, kommer att avvika åt höger igen om

försöket upprepas. Situationens komplexitet blir synlig om vi har flera möjliga riktningar att välja mellan. Om atomen med nödvändighet viker av åt höger om frågan ställs i x-axelns riktning, så är sannolikheterna för de två möjliga avvikelserna i y-led lika stora (vilket man i princip kan kontrollera genom att genomföra experimentet många gånger). Men när atomen viker av åt något håll i y-led, tappar det minnet av hur det skall vika av i x-led, och sannolikheten för de två möjliga svaren blir nu lika om man följer upp y-ledsmätningen med en ny mätning i x-led. Detsamma gäller alla vinkelräta par av riktningar.

Det finns nu många frågor som systemet kan svara ja eller nej på, en för varje riktning i rummet. För varje fix riktning i rummet bär sig atomen åt som en klassisk bit. Men *det är principiellt omöjligt att preparera atomen så att man med säkerhet kan förutsäga svaret för mätningar i fler än en riktning*. Att jag valde silveratomen som exempel här berodde helt enkelt på att "frågorna" var enkla att beskriva i det fallet, men det finns en uppsjö av andra exempel på qubitar, de flesta av större praktiskt intresse.

Vi kan visualisera skillnaden mellan de enklast tänkbara klassiska och kvantmekaniska systemen genom att tänka oss det förra som två punkter, och det senare som en sfär. Två antipodiska punkter på sfären svarar mot de två punkterna i den klassiska biten. Denna bild är bättre än vad man skulle kunna tro, och avståndet mellan två punkter på sfärens yta svarar direkt mot sannolikheten för att systemet skall svara "ja" på den ena frågan, givet att den med säkerhet svarar "ja" för den andra. Ligger punkterna antipodiskt är avståndet maximalt och den nämnda sannolikheten noll.

Antag nu att vi har en bit vars tillstånd är okänt. Vi kan enkelt ta reda på det okända tillstånd helt enkelt genom att se om man får svaret ja eller nej på sin fråga. Men för qubiten är saken inte så enkel. Antag att vi har en silveratom som har preparerats så att den viker av åt något håll i någon riktning --- en för oss okänd riktning. Hur skall vi finna ut vilken denna riktning är? Vi kan pröva med att mäta avvikelserna i x-led, och får en avvikelse åt höger. Det enda vi då med säkerhet vet är att atomen inte var preparerad att vika av åt vänster i den riktningen. Alla andra sätt att preparera atomen ger åtminstone någon sannolikhet för den avvikelse som vi faktiskt observerade.

Innan vi börjar fundera på vad som händer med en dator som är uppbyggd av qubitar i stället för bitar, måste vi fundera på vad som händer om vi har fler än en qubit. Har vi två klassiska bitar är allt klart: Det är möjligt att preparera systemet så att det ger ett bestämt svar på båda frågorna. Det är också möjligt att preparera det så att det ger samma svar på båda frågorna, även om det är obekant vad själva svaret är. Korrelationen mellan de två svaren är då känd. Man kan alltid komplettera sin kunskap så att man kan förutsäga också de enskilda svaren. Men har man två qubitar är situationen igen mer komplex. För en qubit är det själva poängen att det är omöjligt att preparera systemet så att man med säkerhet känner svaret på mer än en fråga, och givet vilken preparation som helst finns det alltid frågor där sannolikheterna för de båda svaren är lika stora. För två qubitar är det möjligt att preparera systemet så att all säker information handlar om korrelationer mellan de två svaren, och så att sannolikheten för varje enskilt svar för varje enskild fråga som ställs till varje qubit för sig är 50 %. Och detta är en fullständig specifikation, i den meningen att varje försök att förbättra förutsägbarheten om de enskilda mätningarna resulterar i en förlust i förutsägbarheten om korrelationerna. Korrelationerna kan vara

både fler och starkare i kvantmekaniken --- det hela är nu större än sina delar --- så jämförelsen med det klassiska systemet går ihop.

Sammanfattningsvis: *I kvantmekaniska system finns det alltid mer information att hämta än ur motsvarande klassiska, men å andra sidan är det i stor utsträckning omöjligt att specificera denna information i förväg.* Vidare kan kvantmekaniska system korreleras på ett sätt som saknar klassisk motsvarighet; fenomenet kallas *snärjelse*. Kan detta utnyttjas praktiskt?

När jag ställer den frågan, menar jag en av två saker. Antingen menar jag detta bokstavigt (i samma mening som ångmaskinen måste anses ha haft ett praktiskt intresse), eller också menar jag detta i en mer filosofisk mening (studiet av ångmaskinens möjligheter ledde till upptäckten av viktiga naturlagar). Naturligtvis har jag ingenting emot om kvantinformationsfenomenen skulle visa sig vara praktiskt användbara i båda bemärkelsen.

I nuläget är svaret, i den första meningen, ett försiktigt ja. Det finns kommersiellt tillgängliga krypto-system, låt vara av begränsad användbarhet, som bygger på qubitarnas speciella egenskaper. Naturlagarna står faktiskt som garantier för att dessa krypto-system är principiellt omöjliga att dechiffrera, inom rimliga gränser förstås --- som att ingen spion får titta sändaren över axeln när meddelandet skickas. Svaret på frågan om hur de yttersta gränserna för vad datorer kan uträtta flyttas av kvantmekaniken är mer oklart. Rent teoretiskt sätt är svaret troligen att de inte flyttas, men däremot att kvantmekaniska datorer kan konstrueras som är kvalitativt mycket snabbare än klassiska datorer, i en mening som kan göras precis. (Det finns algoritmer för kvantdatorer som alltid vinner över sina klassiska motsvarigheter.) Det finns goda argument för att det av praktiska skäl kommer att förbli omöjligt att faktiskt bygga sådana kvantdatorer --- men det intressanta är att dessa argument har blivit avsevärt försvagade under senare år, så det är inte helt otänkbart att de kommer att undanröjas helt, kanske ganska snart.

I den andra meningen är svaret ett betydligt mindre försiktigt ja. Sedan dessa frågeställningar började tas på allvar, för knappt femton år sedan, har vår förståelse för kvantmekaniken som sådan ökat dramatiskt, men det är ännu inte klart vart utvecklingen leder oss. Kanske kommer de så småningom att leda oss bortom kvantmekaniken. Det är slående hur ofta det är omöjligt att till fullo förstå en fysikalisk teori, om man inte kan se hur den passar in i någonting ännu bättre.