

# TEKNISK PROGNOSES

RAPPORT NR 1 • 2023

---

## TEMA: KVANT

FÖR ATT SE IN I DEN MINSTA VÄRLDEN  
MÅSTE MAN FÖRSTÅ KVANTFYSIKEN

SNART ÖPPNAS PORTEN  
TILL DE OPTISKA AVENYERNA

DRÖMMEN OM ATT SÄTTA  
ETT ATOMUR PÅ ETT CHIP

FILOSOFENS VÄG TILL  
ATT BEGRIPA KVANTFYSIKEN

ANDRA KVANTREVOLUTIONEN  
OCH SVERIGES FÖRSTA KVANTDATOR

**FMV**



# INNEHÅLL

Krönika – Mikael Schönström	4
Göran Johansson bygger kvantdator	8
Kvantvärlden i sina händer	12
Här öppnas porten till de optiska avenyerna	22
Drömmen om att sätta ett atomur på ett chip	26
Stephanie brinner för de magiska vätskorna	32
Forskaren och hans fotoner	38
Kvantfysik för mig är att mäta enskilda fotoner	42
På spaning efter framtida teknik bakom horisonten	48
Kvant i naturen nytt forskningsfält	52
Filosofens väg till att förstå kvantfysiken	54
Kvant på väg att bli del av vardagen	60
Mohamed vakar över familjens hemlighet	64
Mellan ljus och materia	68
Kvantdatorn kan bli ett hot	72



# KVANTMEKANIKEN RUVAR PÅ HEMLIGHETER SOM KAN FÅ STOR MILITÄR BETYDELSE

Atomernas inre döljer sig kvantmekanikens mystiska principer. Vad innebär det om vi kan styra dessa? Kunskapen om kvantmekanikens principer har redan gett oss till exempel halvledare och laser. Tekniker som i sin tur lagt grunden för mängder av tillämpningar inom elektronik och medicinteknik utan att vi tänker på det. Kvantmekaniken ruvar på hemligheter som fortsatt kommer att påverka samhället och mänskligheten i stort.

Kvantmekaniken bedöms även få stor påverkan på framtida militära förmågor. Därför har det varit viktigt att genomföra en teknisk prognos på området. Detta nummer av teknisk prognos fokuserar på de senaste framstegen inom ett antal områden inom det fascinerande området kvantmekanik. Vilka kvanttekniker bör vi satsa på? Vilka möjligheter och hot döljer sig i de minsta partiklarna?

Publikationen har som mål att utgöra en brygga mellan forskning och dess praktiska tillämpningar. Genom att förmedla pågående forskning på ett lättförståeligt sätt, hoppas vi inspirera till vidare diskussion och innovation inom försvarssektorn.

Kvantmekaniken, som studerar materiens och energins fundamentala beteende på subatomär nivå, har under det senaste decenniet tagit enorma kliv framåt. Denna utveckling har lett till banbrytande upptäckter och innovationer. För militära tillämpningar är dessa teknologier särskilt relevanta. Om kvantdatorer blir en realitet kan de hantera enorma mängder data och lösa komplexa problem snabbare än traditionella datorer, vilket kan revolutionera underrättelseanalys och kryptering. Kvantbaserad kommunikation bedöms i framtiden kunna möjliggöra i det närmaste fullständig säkerhet. Kvantssensorer kommer att förbättra navigering och övervakning, vilket ökar effektiviteten och säkerheten i militära operationer.

*»Kvantbaserad kommunikation bedöms i framtiden kunna möjliggöra i det närmaste fullständig säkerhet. Kvantssensorer kommer att förbättra navigering och övervakning, vilket ökar effektiviteten och säkerheten i militära operationer.«*

I arbetet med den tekniska prognosen har vi besökt lärosäten runt om i Sverige för att ta reda på vilka forskarna är, vilka problem försöker de lösa och hur ser företagen på området? Vi har haft som målsättning att avmystifiera kvantmekaniken. Uppfattningen bland gemene man är att det är ett område som är svårbegripligt och som ligger långt fram i tiden. Det är delvis rätt för när man rör sig bland de minsta partiklarna på kvantnivån så är det svårbegripligt och icke-intuitivt. Kvantvärlden är annorlunda mot den makrovärld vi kan uppfatta med våra egna sinnen. Men den är inte omöjlig att förstå, man måste öppna upp för nya perspektiv och acceptera vissa fysiska lagar.

Något som blivit tydligt under åren när vi arbetat med den tekniska prognosen är att framtiden inte alltid är så långt borta. För varje teknikområde vi tittat på så har tekniken tidsmässigt flyttas fram, till att vi plötsligt inser att den redan är här. Kanske inte på bredden men väl hos vissa företag och framför allt på lärosätena. Där är det inte mystik utan högst påtaglig verksamhet. Detta gäller även kvantmekaniken. Applikationer för kvantteleportering ligger förmodligen långt fram, men applikationer för kvantssensorer är redan på gång.

För att bredda vyn utanför de svenska gränserna har även kontakter tagits med Gartner och Massachusetts Institute of Technology, MIT. Vid ett MIT-webinarium presenterade Paolo Capallero, nitrogen-vacancy (NV) center (kvävevaknsentra är en defekt i diamant) som en central teknik, som kan användas i många olika tillämpningar. Dessa har elektroniska och optiska egenskaper som gör dem användbara som kvantssensorer. Kvantssensorer som använder NV-center kan användas inom till exempel läkemedelsforskning, och inom neurovetenskap genom att upptäcka och undersöka magnetfält från enskilda neuroner. Tekniken kan också användas inom materialvetenskapen, till exempel genom att mäta egenskaper i 2D-material som grafen. Men ett område som är av särskild betydelse för militära applikationer är navigering utan hjälp av satelliter, då NV-center är extremt känsliga för magnetiska fält. Genom att mäta förändringar i jordens magnetfält kan dessa sensorer bestämma sin position relativt till jordens magnetiska poler. De kan också användas som ett tröghetsnavigeringssystem. En stor fördel med NV-center är att de fungerar i

rumstemperatur och på grund av diamantens robusthet kan NV-centers användas i extrema miljöer.

Ett bevis på att kvantområdet även börjat intressera marknaden är att den amerikanska analysfirman Gartner följer utvecklingen noga. Gartner delar upp området i tre underområden såsom kvantdatorer, kvantkommunikation och kvantssensorer. Chirag Dekate som är analytiker på Gartner betonar Kinas snabba utveckling på området, och då särskilt landets satsningar inom kvantkommunikation. Ekosystemet av företag som utvecklar olika kvanttekniker växer globalt vilket innebär att vi kommer att se fler och fler tillämpningar. Gartner bedömer också att kvanttekniken kommer att förändra framtidens militära förmågor när de förstärks med funktioner där kvantmekaniken utnyttjas.

Ett kvitto på att forskningen inom kvantmekanik värderas högt är antalet Nobelpris i fysik, inte minst det senaste där Anne L'Huilliers (vid Lunds Universitet) forskning inom laserfysik belönades med det finaste priset.

Det händer således mycket inom detta område, och det är viktigt att vi påbörjar en aktiv diskussion inom vilka förmågor kvantmekaniken skulle kunna innebära en kvantfördel. Vi kan konstatera efter denna tekniska prognos att både kunskap och vilja finns inom landet för att föra in kvantmekaniken i försvarsforskningen. □



**Mikael Schönström,**  
fil.dr. FMV  
mikael.schonstrom@fmv.se  
Projektledare Omvärldsbevakning  
med teknisk prognos.

# En värld – flera tolkningar

Kvantfysik eller kvantmekanik (två ord för samma sak) är den gren av fysiken som handlar om partiklars beteende på kvantnivå eller subatomär nivå, en värld som kan upplevas som mystisk och icke-intuitiv. En värld där klassisk fysik inte lyckas ge en korrekt beskrivning.

## 1. Newton, klassisk fysik och vårt dagliga liv

År 1687 räknas som en av de stora milstolparna inom det vetenskapliga tänkandet. Det är det år Isaac Newtons *Principia* publiceras, ett verk som innehåller Newtons rörelselagar samt klassisk mekanik i sina huvuddrag. Plötsligt kan man förklara och räkna på gravitation, fallrörelse, ballistik och alla makroskopiska fenomen – som exempelvis ballistiska banor och himlakroppars rörelser.

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{a}$$

Newtons andra lag

Newtons mekanik, klassisk termodynamik och James Clerk Maxwells ekvationer kring elektromagnetism var det fundament som förklarade hur världen fungerade fram till 1900-talets början.

## 2. En ny fysik växer fram

Runt förra sekelskiftet börjar dock den gamla klassiska fysiken ifrågasättas. Radioaktiviteten upptäcks 1896 och snart görs flera banbrytande upptäckter.

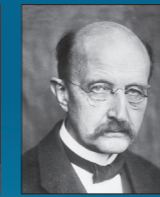
Det står snart klart att den klassiska fysiken är otillräcklig när det gäller att förklara fenomen på atomär nivå.

Under ett par decennier växer en ny gren inom fysiken fram, kallad kvantfysik eller kvantmekanik – en framgångsrik beskrivning av materiens och energins beteende i mikrokosmos.

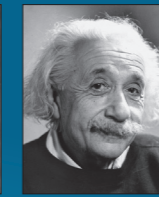
På 1930-talet var teorierna kring kvantmekaniken i princip kompletta, men det tog många år innan dess konsekvenser förstods full ut.



1897 J.J. Thomson  
Elektronen upptäcks



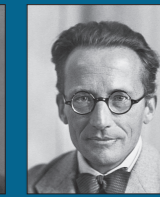
1900 Max Planck  
Lagen om svartkroppsstrålning



1905 A. Einstein  
Introducerar fotonen eller ljuskvantat



1913 Niels Bohr  
Bohrs atommodell



1925 E. Schrödinger  
Schrödingerekvationen

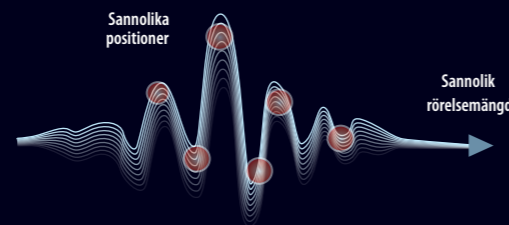
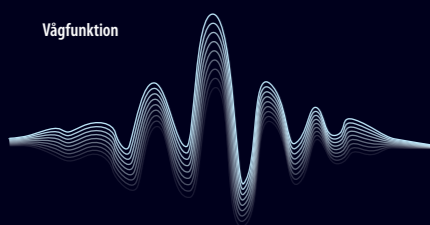
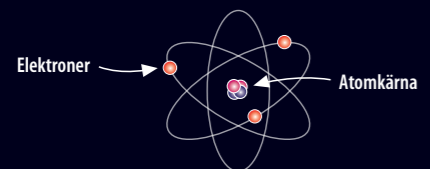


1927 W. Heisenberg  
Heisenbergs osäkerhetsprincip

Under början av 1900-talet formulerar Albert Einstein också sina berömda relativitetsteorier kring rumtid och gravitation vilket också kommer att förändra vårt sätt att förstå vår omvärld. Men Einstein vägrade att acceptera det irrationella, slumpmässiga i kvantfysiken. Det har gjort att han ibland kallats den siste klassiske fysikern.

## 3. Vågfunktion eller partikel – eller både och?

Kvantfysik är alltså fysik för det som är extremt litet. Man talar om kvantpartiklar som exempelvis protoner, elektroner, fotoner eller atomkärnor. En elektron exempelvis, är ju vana att se som en liten prick som snurrar runt en atomkärna som en liten planet runt en sol. Det är dock en alltför förenklad bild.

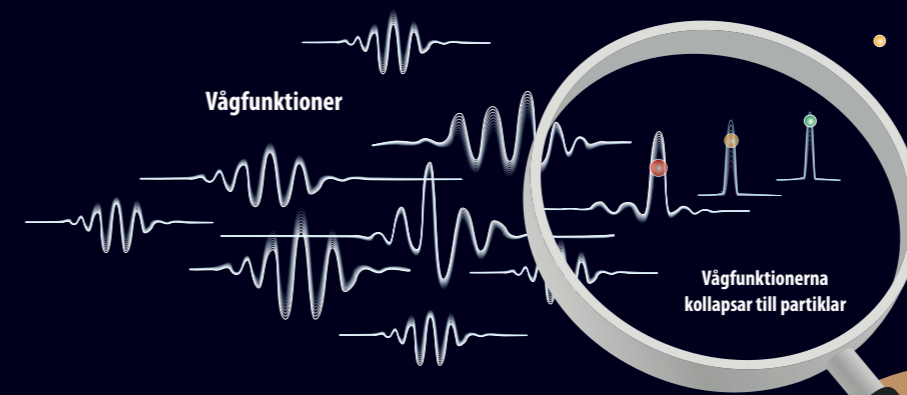


Tänk istället på elektronen som en så kallad vågfunktion, en matematisk beskrivning som representerar de möjliga tillstånd en partikel – som i detta fall en elektron – kan existera i.

Denna "våg" har ingen fysisk existens utan fungerar som ett verktyg för att förutsäga sannolikheten att hitta partikeln i olika positioner eller tillstånd. Denna idé om möjligheter, sannolikheter och osäkerhet är en grundläggande aspekt av kvantmekaniken.

## Schrödingerekvationen och mätproblemet

När Erwin Schrödinger formulerade sin ekvation 1925 fick man ett verktyg för att beskriva dynamiken hos ett kvantmekaniskt tillstånd på motsvarande sätt som Newtons andra lag beskriver dynamiken hos mekaniska system inom klassisk fysik.



$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V(\mathbf{r}, t) \Psi$$

Schrödingers ekvation

### Vågfunktionen kollapsar

Vågfunktioner utvecklas över tid enligt Schrödingerekvationen när de inte observeras eller mäts. Men saker och ting blir intressanta när man utför en mätning.

När vi gör en observation "kollapsar" vågfunktionen till ett specifikt tillstånd. Detta betyder att av alla möjliga tillstånd som partikeln kunde ha befunnit sig i, existerar den nu i ett bestämt tillstånd. Mätningen stör utvecklingen enligt Schrödingerekvationen, och vågformen blir väldefinierad och kan observeras som en partikel.

Det kallas mätproblemet då det är ett oförklarligt fenomen mellan kvantvärlden och vår egen vanliga värld.

Källor: Chalmers tekniska högskola, [https://en.wikipedia.org/wiki/Wave\\_particle\\_duality](https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_particle_duality), [https://en.wikipedia.org/wiki/Measurement\\_problem](https://en.wikipedia.org/wiki/Measurement_problem)



# GÖRAN JOHANSSON BYGGER KVANTDATOR

Kvantfysikens grunder lades redan på slutet av 1800-talet. På 1920-talet var teorierna i stort sett klara och det skulle dröja ett halvsekel innan teorierna kunde bevisas i experiment. Nu är det heta ämnet kvantdatorn. På Chalmers tekniska högskola tar Sveriges första kvantdator form. Göran Johansson är professor i tillämpad kvantfysik, mikroteknologi och nanovetenskap och är en av de ledande i kvantdatorbygget.

**F**ör Göran Johansson började intresset för kvantfysik när han studerade teknisk fysik.

– Dubbelspaltsexperimentet fascinerade mig för jag fattade inte vad som hände. Med tiden doktorerade jag och lärde mig allt om så kallade Josephson-övergångar och små supraledande kontakter. Jag hittade ingen teknologisk tillämpning av vad jag lärt mig så jag lämnade akademien och började på Ericsson. Efter ett tag hörde min gamla handledare av sig och sade att vi har fått EU-pengar för att bygga en kvantdator. Det var för 22 år sedan. Jag tog tjänstledigt från Ericsson och kom inte tillbaka.

## Bara att acceptera

Göran Johansson säger sig inte helt förstå kvantfysiken, men det är få saker inom fysiken som står på så stabil teoretisk grund. Så det är bara att acceptera.

– Kvantfysiken är väldigt väl kartlagd. Det är inte bara sannolikheter. Teorin funkar, vi kan räkna på den. En annan sak är att vi inte kan peka på elektronen, den är utspridd. Man lär sig räkna, men att få intuition för det är svårt. Man kan förstå att elektronen kan åka in i det ena eller andra hålet i berömda experimentet där man skickar elektroner mot en plåt med två spalter. På samma sätt måste man förstå att i en kvantdator kan varje kvantbit vara både ett och noll.

– Man kan hävda att kvantfysiken föddes med den danske fysikern Nils Bohrs atommodell 1912 med positiva och negativa partiklar och allt det där. Före Bohrs atommodell fanns en så kallad russinmodell. Man förstod att det positivt laddade fanns i mitten med elektroner runt omkring. Då kanske det är som ett solsystem där elektronerna går i banor som planeter? Men det stämde inte för om elektronerna strålar ut elektromagnetisk energi så tappar de energi och går in i kärnan och upphör därmed att vara elektroner. I verkligheten fanns ju det som man kallade för elektroner kvar. Det skapades mycket diskussioner

efter Bohrs atommodell. Hur ska man förstå ekvationerna? Vi kan räkna ut saker, egenskaper, men vet inte riktigt hur vi ska tolka det. Då uppkom den så kallade Köpenhamnskolan vars linje var att hålla tyst och acceptera.

## Nils Bohrs atommodell

– Nils Bohr visste att elektronerna var partiklar. Han såg att de de träffade fotografiska plåtar. Men han insåg också att elektronerna hade vägegenskaper och var medveten om att atomen inte kunde modelleras som ett planetsystem.

– Ernest Rutherford som brukar kallas atomfysikens fader hade visat att atomen måste vara uppbyggd av en atomkärna men den är väldigt liten i förhållande till atomen. Han skickade tunga partiklar mot en guldfolie. Ofta gick det rakt igenom folien – det mesta var tomrum – men ibland studsade de tillbaka. Så det måste finnas något väldigt tungt.

– Den brittiske matematikern James Clerk Maxwell beskrev med sina ekvationer elektriska och magnetiska fält. Man visste att det fanns laddade partiklar. Nils Bohr antog att det finns fasta banor och när elektronerna befinner sig i dessa banor strålar de inte ut någon energi. Redan på 1800-talet analyserades ämnen med spektroskopi. Man hettar upp ett ämne i en gas och skickar in ljus och så skickas ljuset ut i linjer som en regnbåge. ▷

*»Göran Johansson säger sig inte helt förstå kvantfysiken, men det är få saker inom fysiken som står på så stabil teoretisk grund. Så det är bara att acceptera.«*



Atomer skickar ut ljus med olika våglängd. En natriumlampa ger inte en regnbåge utan bara en fläck. Det här stämde rätt bra med Bohrs teori om fasta banor. Man visste också att om elektronerna i dessa fasta banor hade en viss hastighet, rörelseenergi så motsvarade det en viss våglängd. Man kan inte ändra våglängd hur som helst om regeln om de fasta banorna ska hållas. Det blir som en gitarrsträng, ska man ändra våglängden får man göra strängen längre.

– Det fanns ingen som hade någon idé om varför elektronerna ska ha en våglängd. Det dök upp en massa teorier. Men hur ska man jobba med teorin om elektronerna? När man tänker på elektroner är det som små bollar, men de har också vågegenskaper. Den som utvecklade det här mycket var Erwin Schrödinger med sina ekvationer och sin katt.

### Grunden i kvantfysik

– Med Max Planck (1858–1947), dyker ordet kvant upp. Planck fick Nobelpris 1918 för sin teori om energikvanta och det som kallas Plancks konstant. Max Planck beskrev svartkroppsstrålning. Vid viss temperatur uppstår ett visst spektrum. Ljus strålar från varma saker. Så dyker ordet foton upp. Med svartkroppsstrålningen är det första gången som man nämner att energin är kvantiserad. Och där kom kvanten. Och nu arbetas det i världen på att förverkliga kvantdatorn.

– För att bygga kretsar måste man förstå hur elektroner rör sig i halvledare. Och då måste man förstå kvantfysik. Elektronerna har vågegenskaper. Elektronen är också en partikel. Kvantfysik är att vi måste behandla elektronerna som vågor och ibland behandla ljuset som partiklar. Det är grunden i kvantfysik till skillnad från klassisk fysik.

– Ett välkänt fenomen inom kvantfysiken är att partiklar påverkas när man mäter på dem. Men det är inte unikt för kvantfysiken. Inom socialvetenskapen är det välkänt att en person som intervjuas påverkas av frågorna och hur de ställs, säger Göran Johansson.



### Bondförnuft och egna sinnen

För Göran Johansson finns kvantfysik överallt. Tillsammans med andra kvantfysiker har han skrivit boken Kvantfysiken och livet. Varför en ödlas kan springa i taket, hur fåglarna navigerar, varför en fågelhona ser attraktionen i en grå fågelhanne.

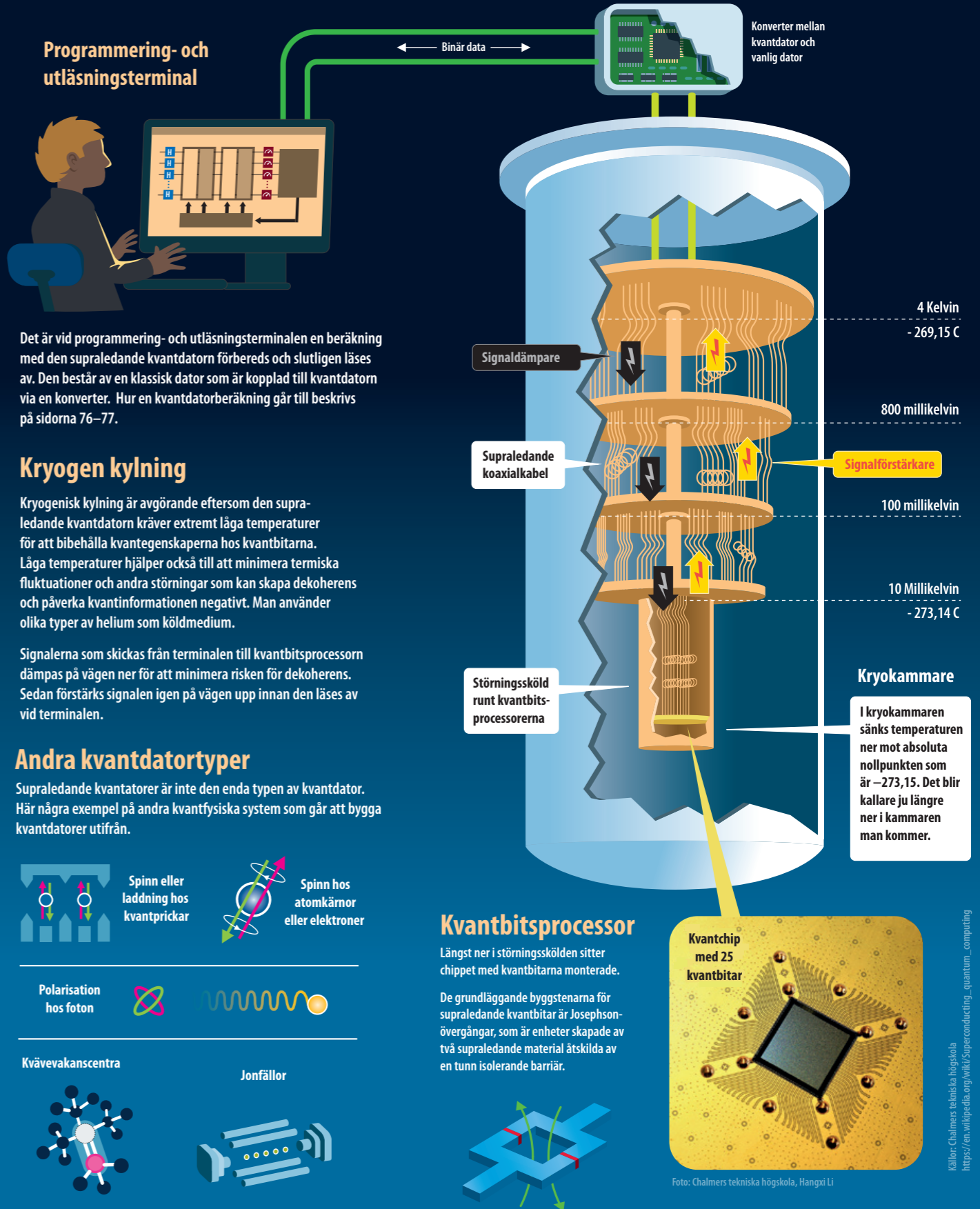
– Kvant och naturen handlar egentligen om sunt bondförnuft och egna sinnen. Djur ser bredare spektrum än vi människor. När vi konstruerar verktyg som ett mikroskop ser vi att det finns en mikroskopisk värld. Med verktygen

kan vi studera atomkärnor. Vi förstärker våra sinnen med experiment och då hittar vi grejer som bryter mot vår vardagsintuition.

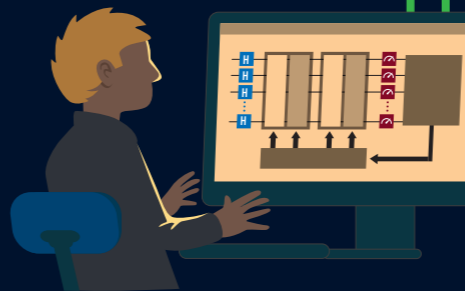
– Idén till boken kom när jag föreläste vid Göteborgs läkarförening om kvantforskarna Serge Haroche och David Wineland som fick Nobelpriset 2012. En av läkarna blev intresserad och insåg att kvantfysik kan vara viktig för att förstå biologiska system. Och det är upprinnelsen till boken. Inte att studera naturen i sig. □

# Den supraledande kvantdatorn

Bilden visar den idag mest populära kvantdatorn, den som bygger på kvantbitsprocessorer som blir supraledande nära den absoluta nollpunkten. Den utgör basen för satsningar hos IBM, Google och Amazon. Även Chalmers tekniska universitet utvecklar en kvantdator av denna typ.



### Programmering- och utläsningsterminal



Det är vid programmering- och utläsningsterminalen en beräkning med den supraledande kvantdatorn förbereds och slutligen läses av. Den består av en klassisk dator som är kopplad till kvantdatorn via en konverter. Hur en kvantdatorberäkning går till beskrivs på sidorna 76–77.

### Kryogen kylning

Kryogenisk kylning är avgörande eftersom den supraledande kvantdatorn kräver extremt låga temperaturer för att bibehålla kvantegenskaperna hos kvantbitarna. Låga temperaturer hjälper också till att minimera termiska fluktuationer och andra störningar som kan skapa dekoherens och påverka kvantinformationen negativt. Man använder olika typer av helium som köldmedium.

Signalerna som skickas från terminalen till kvantbitsprocessorn dämpas på vägen ner för att minimera risken för dekoherens. Sedan förstärks signalen igen på vägen upp innan den läses av vid terminalen.

### Andra kvantdatorer

Supraledande kvantdatorer är inte den enda typen av kvantdator. Här några exempel på andra kvantfysiska system som går att bygga kvantdatorer utifrån.

- Spinn eller laddning hos kvantprickar
- Spinn hos atomkärnor eller elektroner
- Polarisation hos foton
- Kvävevakanscentra
- Jonfällor

### Kvantbitsprocessor

Längst ner i störningsskölden sitter chippet med kvantbitarna monterade.

De grundläggande byggstenarna för supraledande kvantbitar är Josephson-övergångar, som är enheter skapade av två supraledande material åtskilda av en tunn isolerande barriär.

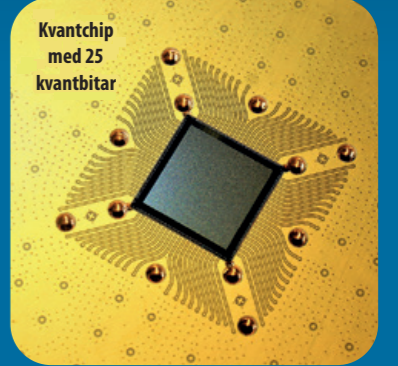


Foto: Chalmers tekniska högskola, Hangxi Li

Källor: Chalmers tekniska högskola [https://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting\\_quantum\\_computing](https://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_quantum_computing)





# KVANTVÄRLDEN I SINA HÄNDER

**Andra kvantrevolutionen är här. En av revolutionärerna är Janka Biznárová. När hon föddes i Bratislava 1995 började jakten på kvantdatoren. Hon har den framtida kvantvärlden i sina händer. Nu är hon doktorand på Chalmers och bygger Sveriges första kvantdator.**

**D**en andra kvantrevolutionen kan definieras som att teknologiskt använda arvet efter pionjärer som Albert Einstein och Nils Bohr, säger Göran Johansson som är biträdande ledare för Chalmers kvantprojekt.

Grundstenarna i den andra kvantrevolutionen är superposition och sammanflätning. 2022 gick Nobelpriset i fysik till Alain Aspect, John Clauser och Anton Zeilinger för experiment med sammanflätning. 2023 gick Nobelpriset i kemi till forskare som studerat så kallade kvantprickar. Det verkar som om kvantfysik är vägen till Nobelpriset. Göran Johansson är inte förvånad.

– Det är naturligt att kvantforskning ger utdelning i form av Nobelpris. Det är den moderna fysiken och det moderna sättet att beskriva verkligheten.

## **Banbrytarna**

Det finns människor som bryter ny mark. Den brittiska matematikern och kodknäckaren Alan Turing utpekades ibland som datorns fader. Han förutsåg en elektronisk maskin som kunde klara det mesta. Han kallade den för universalmaskin. Finns det någon andlig fader till kvantdatoren?

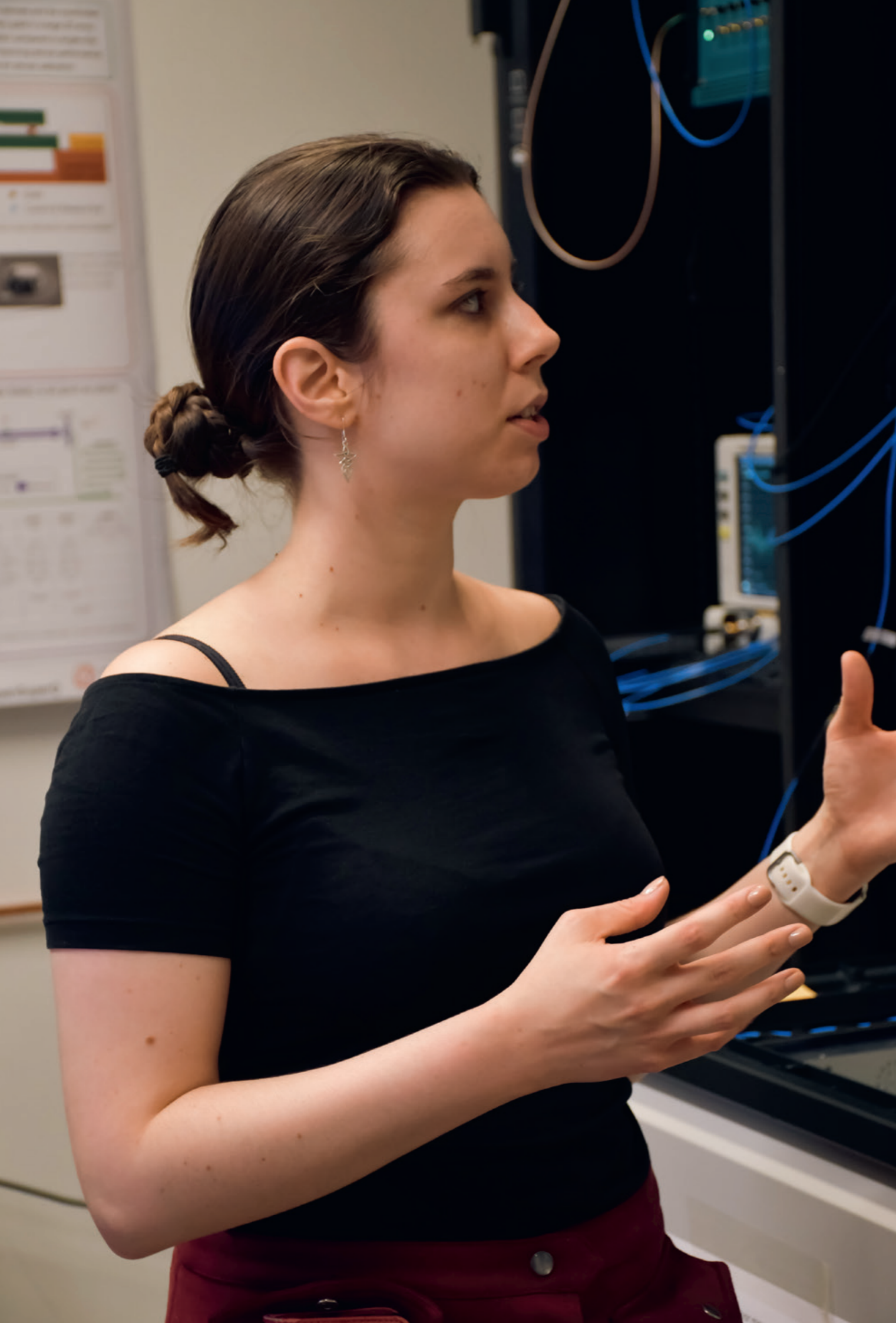
– Ryssen Yuri Manin (1937–2023) var på 1980-talet kanske den som var först med konceptet för en kvantdator, säger Göran Johansson.

Andra banbrytare som Göran Johansson pekar ut är Peter Shor och Richard Feynman.

– Peter Shor visade att en kvantdator kan dela upp stora tal i faktorer >







vilket skulle betyda att den vanliga koden RSA kunde knäckas. Som jag förstått det reagerade det amerikanska försvaret snabbt. Den som bygger en kvantdator skulle förmodligen kunna knäcka de metoder som idag anses säkra för kommunikation. Nästa fråga blir då hur svårt det är att bygga en kvantdator och jag antar att det bästa sättet att besvara den här frågan är att försöka bygga en. Det här var 1994 och därmed hade Peter Shor gett upphov till ett nytt forskningsfält och det är det som vi ser resultatet av nu. Försvarsmakter över hela världen som rekommenderar säkra sätt för kommunikation måste nu noga bevaka teknikutvecklingen. Hur länge är dagens metoder säkra?

En annan banbrytare är Richard Feynman som fick Nobelpriset i fysik 1965. Han hävdade att klassiska datorer är dåliga på att räkna på kvantsystem och menade att det borde gå att göra en dator som bygger på kvantfysik.

#### **Chalmers kvantdator**

– Jag har jobbat med kvantdatorer och kvantbitar sedan år 2000 men då hade jag ingen tanke på att verkligen bygga en kvantdator. För det krävs resurser i form av pengar och personer.

Projektet att bygga en kvantdator började 2018 och löper fram till 2030. Målen är dels att bygga en kvantdator och dels att bygga svensk kompetens för den andra kvantrevolutionen.

Totalt arbetar cirka 60 personer i kvantdatorprojektet varav cirka 30 är engagerade i själva byggandet.

– Det är många doktorander och doktorer som arbetar här. Men de kommer och går och vi har nu fastanställt forskare.

Projektet som omfattar cirka 1,5 miljarder kronor finansieras till stor del av Knut och Alice Wallenbergs stiftelse som lagt grunden för Wallenbergs centrum för kvantteknologi, WACQT vid Chalmers. I detta centrum arbetar cirka 150 personer. Vid sidan av Wallenbergs finansiering finns också universiteten och industrin.

– Projektet är uppdelat i fyra perioder och vi får söka pengar för varje period.

Det är tydliga ramar. Vi känner att vi är på rätt spår. Över oss finns ett vetenskapligt råd som bedömer vår forskning ur ett internationellt perspektiv. Hittills har rådet varit nöjt.

– Nu har vi kommit halvvägs. Vi har visat att vi kan bygga en kvantdator och vi har lovat att när projektet är klart ha byggt en dator med hundra kvantbitar. Men vad jag vet har vi inte lovat exakt hur bra de kvantbitarna är.

Den minsta informationsbäraren i dagens vanliga datorer kallas bit. En sådan bit kan ha värdet 0 eller 1. Kvantdatorns kvantbit kan befinna sig i så kallad superposition vilket betyder att den kan ha värdet 0 och 1 samtidigt.

– Vi har gjort ett chip med 25 kvantbitar. Det krävs en styrelektronik som kan hålla ordning på alla kvantbitar samtidigt. IBM har 127 kvantbitar per chip och har utvecklat chip med över 400 kvantbitar.

– Vi har full kontroll på den mikroskopiska omgivningen och bra kontroll på hur man tillverkar bitarna. Däremot är operationerna relativt långsamma – 200 nanosekunder. Vi kan göra cirka tusen sammanflätade operationer mellan två kvantbitar innan det blir för mycket fel. Vi kör så länge det går.

#### **Genombrott**

– Man kan aldrig veta om det kommer ett genombrott. Teorin för artificiell intelligens och neurala nätverk var i stort sett klar på 1980-talet. Men det krävdes starkare datorer och tillgång till stora datamängder för att det skulle ske ett genombrott. Det kanske kan ske ett motsvarande genombrott på kvantsidan.

– När jag började höll vi på med två kvantbitar år efter år. Undermedvetet kanske vi överskattade svårigheterna att göra fler kvantbitar. Så slog Google till med ett chip på 54 kvantbitar. Att helt enkelt skala upp verkade vara den rätta vägen.

Att kunna bygga en kvantdator är som en kedja med länkar. Kedjan är inte starkare än den svagaste länken. Det är många länkar på en kvantdatorkedja. Att bygga hårdvaran är en. Att skriva

bra algoritmer en annan. Att hitta bra uppgifter för kvantdatorn att öva på en tredje. Pengar och kompetens är exempel på andra länkar.

#### **Vad en kvantdator är bra på**

En kvantdator är som en dator med en liten trätt. Man kan inte stoppa i så mycket. Men det som går in i datorn ska ha många möjliga kombinationer.

– Det väckte stor uppmärksamhet när en klassisk dator var bättre på Go än elitspelare. Datorn hade lärt sig analysera spelade partier. Det skulle en kvantdator inte vara bra på. Om man däremot gav kvantdatorn spelreglerna skulle den vara bättre än en klassisk dator, säger Göran Johansson och tar exemplet med handelsresanden som inte vill åka i onödan. Det är ett begränsat antal orter och vägsträckor som matas in i datorn. Tillsammans ger dessa uppgifter ett stort antal kombinationer och kvantdatorn borde kunna räkna ut det bästa alternativet. Logistikföretaget Jeppesen säljer sina lösningar till flygbranschen. Var ska planen vara? Vilka är besättningarna? Det är ett problem som påminner om vår handelsresande och vi har en industridoktorand som kollar hur en kvantdator skulle hjälpa. Kemi nämns som en annan lämplig uppgift för kvantdatorn. Några få molekylar som tillsammans kan ge upphov till så många kombinationer att en vanlig dator kroknar.

#### **Från idé till algoritm**

Chalmers kvantdator används av forskarna. Nu ska det göras en kopia av datorn som blir tillgänglig för forskare och företag. Här ska kunder få hjälp med att gå från idé till algoritm. Chalmers ställer upp med experterna. Syftet är att höja kompetensnivån inom kvantteknologi i Sverige och sänka tröskeln för att använda kvantdatorer. □

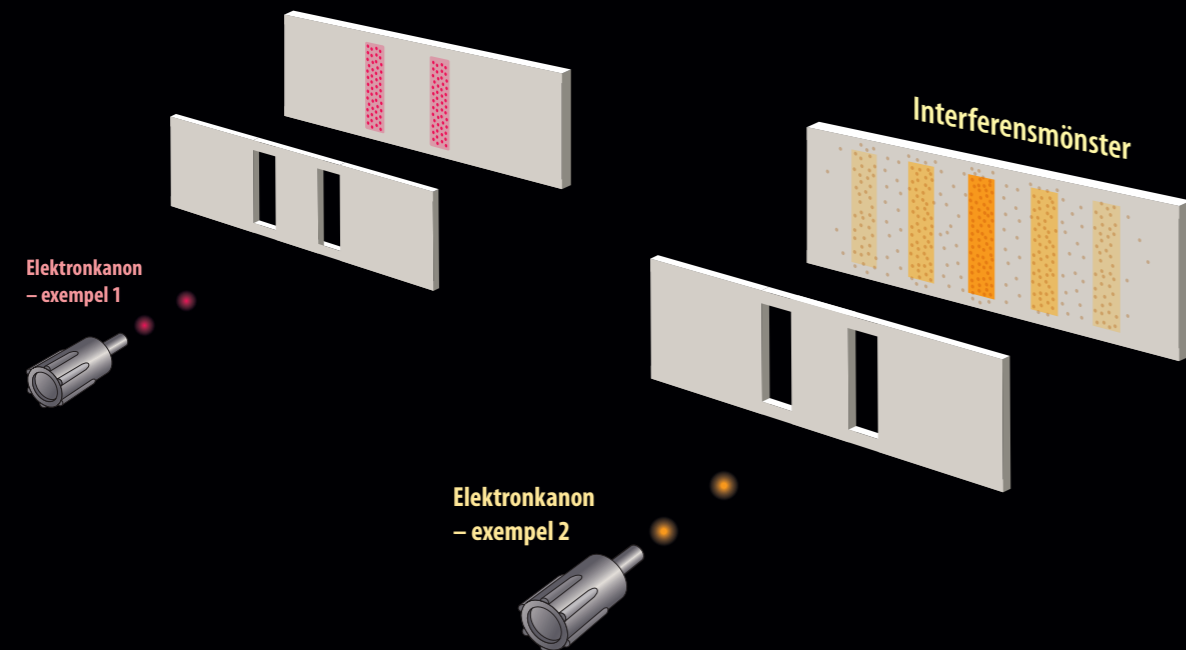


# Dubbelspaltexperimentet

Elektroner eller fotoner har dubbla naturer. Dom betar sig som vågfunktioner fram till dess du mäter dom. Då uppträder dom plötsligt som partiklar. Denna mystiska våg-partikeldualitet kan studeras i det berömda dubbelspaltexperimentet.

1. Tänk dig en liten elektronkanon som skjuter elektroner mot en vägg med två öppningar. Man skulle kunna tänka sig att elektronerna passerar antingen genom den ena eller den andra öppningen innan de mäts på en fluorescerande skärm och att ett mönster likt det nedan uppstår.

2. Men märkligt nog byggs det upp ett mönster av flera linjer istället för endast de två som man kanske kunde förvänta sig. Linjerna är dessutom starkare i mitten än ut mot sidorna. Mönstret är ett interferensmönster och är något som endast uppstår när vågor är inblandade.



## Så vad är det som händer?

Det som händer är att elektronen som vågform går genom båda öppningarna samtidigt. Därefter interfererar de två vågformerna med varandra, samma vågformseffekt som uppstår då man släpper två stenar brevid varandra på en vattenyta. Där vågorna förstärker varandra ökar sannolikheten för att en elektron ska registreras på den bakre väggen. Omvänt gäller att där vågorna tar ut varandra blir sannolikheten mycket låg.

## Enskilda elektroner vet sin plats

Vad händer då om man kraftigt sänker intensiteten på elektronkanonen och endast skickar en elektron åt gången? Förbluffande nog börjar de också i detta fall att punkt för punkt bygga upp samma interferensmönster. Det är som om varje partikel vet om att den är en del av en potentiell vågrörelse och är skyldig att interferera med alla andra partiklar. Eller kanske interfererar den med sig själv?

## Mätbarriären

Nu räkar det finnas en teknik där man kan mäta genom vilken spalt varje elektron går igenom.

Det som händer nu är att när tillräckligt många märkta partiklar träffat den bakre väggen så blir resultatet som i det första exemplet. Märkningen gör att interferensmönstret försvinner. Vågfunktionen kollapsar innan interferensmönstret hinner uppstå.

Att mäta och interagera med kvantsystem påverkar alltså kvantsystemen. Detta är ett av flera mystiska fenomen hos elementarpartiklar som öppnat möjligheter för kvantmekaniska tillämpningar.

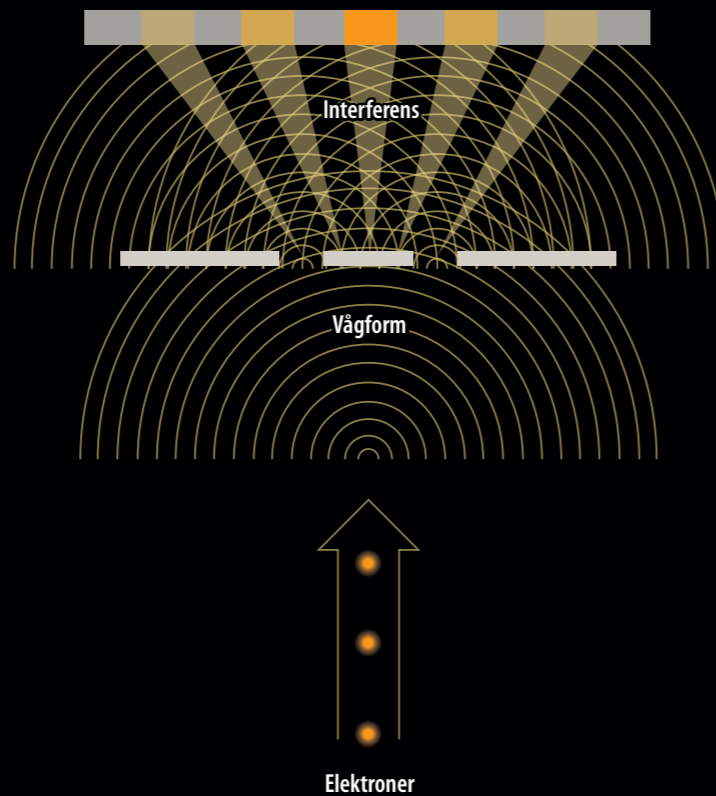


Foto: Getty Images; Yamada Taro

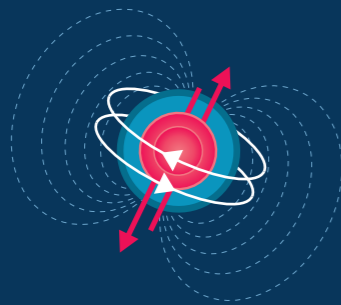


# Några viktiga kvantfenomen

Våg-partikeldualitet och många andra av kvantfysikens påstående strider kanske mot vår intuition. Men kvantteorin har hittills visat sig vara korrekt på alla punkter man kunnat kontrollera. Kvantteknologi syftar till att utnyttja kvantfysikens häpnadsväckande effekter för att göra helt nya saker möjliga. Nedan beskrivs några av de viktigaste fenomenen.

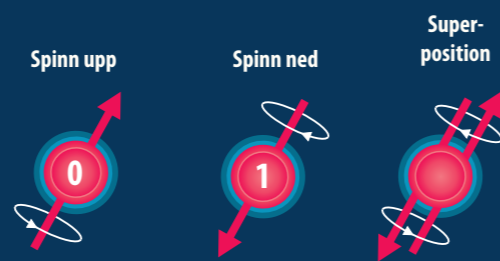
## Superposition och spinn

Inom klassisk mekanik är saker som position eller momentum alltid väldefinierade. Men kvantfysikens värld bygger på sannolikheter, osäkerhet och slump. En elektron kan – som vi såg i dubbelspaltexperimentet – på samma gång färdas längs två olika vägar och kan runt en atomkärna vara på flera ställen samtidigt. Det kallas superposition och är en av de grundläggande principerna inom kvantmekaniken.



Ett sätt att förstå superposition är att titta på ett kvantfenomen som kallas spinn.

Spinn är en grundläggande egenskap man hittar hos subatomära partiklar som exempelvis elektroner. Trots sitt namn har kvantspinn hos partiklar inget med vanlig rotation att göra utan syftar på en hypotetisk egenrotation. Detta är i sin tur kopplat till att vissa material är magnetiska.

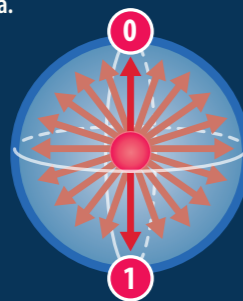


Elektroner kan med hjälp av mikrovågor manipuleras till olika tillstånd av spinn. Spinnen kan vara medurs eller moturs vilket kan motsvara 0 och 1 i en vanlig dator. Men med mikrovågor kan man också få elektronen att försättas i superposition vilket är båda tillstånden (0 och 1) samtidigt och en av förutsättningarna för att bygga kvantbitar och i förlängningen kvantdatorer.

## Kvantbitar och dekoherens

För att bygga kvantdatorer krävs kvantbitar. En kvantbit (kallas även qubit) kan visualiseras med en pil som pekar i en tänkt tredimensionell sfär. Bitar i en vanlig dator kan bara ha lägena ett eller noll. Även kvantbitar har denna förmåga, pekar pilen upp är det en nolla, pekar den ner motsvarar det en etta.

Kvantbit i superposition



Men till skillnad från vanliga bitar i klassiska datorer har kvantbitar också förmågan att befinna sig i en kombination av 0 och 1. Det kan liknas vid att den imaginära pilen befinner sig i samtliga riktningar i sfären samtidigt. Kvantbiten är i superposition.

När man gör en mätning på en kvantbit måste den bestämma sig för ett av tillstånden 0 eller 1, men innan mätningen görs kan kvantbiten alltså vara i ett kombinerat läge av både 0 och 1. Detta fenomen är en av förutsättningarna för att få en kvantdator att fungera. Mer om kvantbitar och kvantdatorns funktion på sidan 11 samt 76–77.

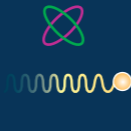
Elektronspinn



Elektrontillstånd i atomer



Fotonpolarisering



Inte enbart elektroner kan försättas i superposition och användas som kvantbitar. Det fungerar även med atomkärnor som kan anta två kärnspinn samtidigt eller fotoner som kan polariseras i olika vinklar.

## Dekoherens



Superpositionstillstånd är mycket känsliga för störningar vilket får tillståndet att avta och till slut kollapsa – och då försvinner de kvantfysiska egenskaperna. Det kallas dekoherens och kan orsakas av värme, olika typer av strålning eller andra främmande partiklar.

## Sammanflätning

Sammanflätning är en speciell typ av superposition som innebär en stark korrelation mellan två eller flera partiklar. Konstigt nog kvarstår sammanflätningen även om partiklarna separeras över mycket stora avstånd.



Fotoner exempelvis kan polariseras antingen horisontellt eller vertikalt.

Om vi försätter två fotoner i ett sammanflätat tillstånd innebär det att de hamnar i en superposition av att vara både horisontellt och vertikalt polariserade samtidigt. Fotonernas polarisering är på så sätt obestämd innan en mätning görs, de har dock alltid samma polarisering. En foton får stanna på Jorden medan den andra skickas till Saturnus.



När vi mäter fotonens polarisation här på Jorden får vi slumpmässigt resultatet horisontellt eller vertikalt. Det som händer på Saturnus är att fotonen ögonblickligen tar samma polarisering trots att den befinner sig 1300 miljoner km bort utan någon kommunikation med Jorden.

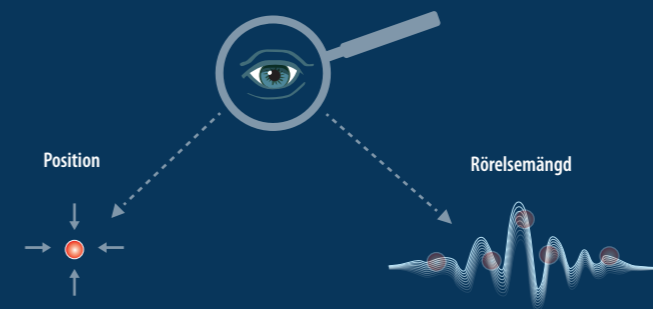
## Klämda tillstånd (Heisenbergs osäkerhetsprincip)

Heisenbergs osäkerhetsprincip innebär att det finns en gräns för hur noggrant det går att samtidigt mäta vissa par av komplementära storheter hos vågfunktioner.

Komplementära storheter kan vara position gentemot rörelsemängd, eller energimängd gentemot en specifik tidpunkt.

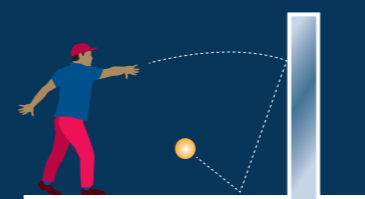
Normalt fördelar sig osäkerheten lika mellan de två variablerna. Men genom att manipulera kvantsystemet kan man få osäkerheten att främst belasta den ena variabeln.

Då uppstår ett så kallat klämt tillstånd där det är möjligt att mäta den andra variabeln med oerhört hög precision. Detta bland annat kan utnyttjas för att konstruera ytterst känsliga mätinstrument.

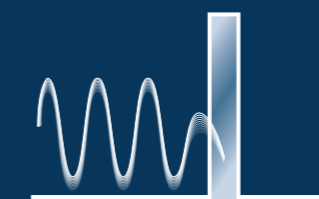


## Kvanttunnling

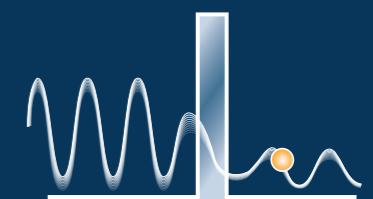
Kvanttunnling är ett fenomen som innebär att kvantmekaniska partiklar har en förmåga att passera genom hinder på ett sätt som är omöjligt inom den klassiska fysiken. Det beror på att kvantpartiklar inte har en tydligt definierad position. De är vågfunktioner som beskriver sannolikheten för var en partikel befinner sig.



Kastar man en boll mot en vägg eller annat hinder så studsar den tillbaka, inget konstigt med det.



Men en vågfunktion som möter en barriär uppstår inte som en boll. Dess energi avtar visserligen när den möter barriären...



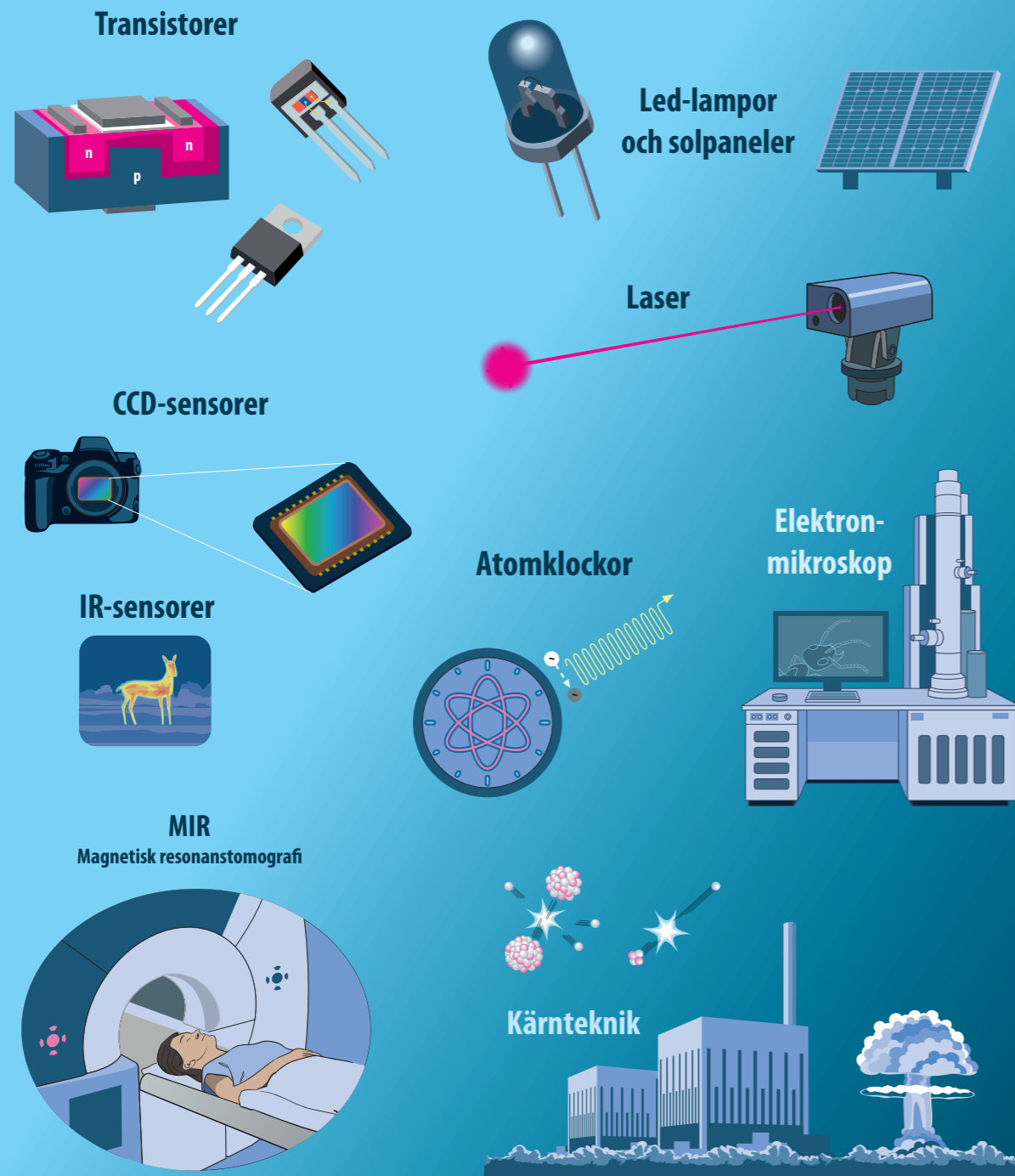
...men som vågfunktion kan den fortsätta över till andra sidan vilket gör att det finns en viss sannolikhet att en partikel dyker upp vid en mätning.

Källor: Chalmers tekniska högskola, [https://en.wikipedia.org/wiki/Spin\\_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Spin_(physics)), [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_tunneling](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_tunneling)



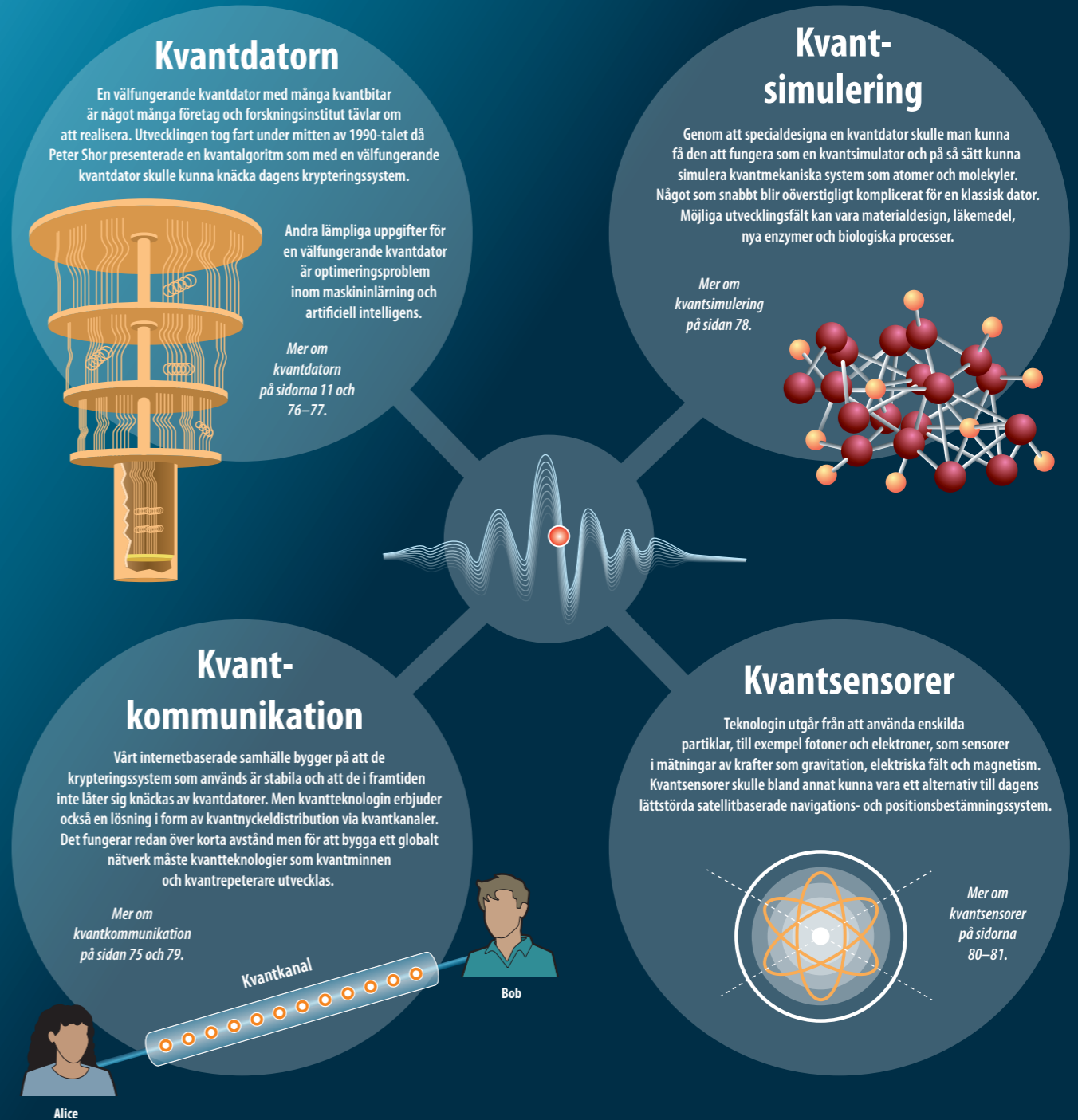
# Första kvantrevolutionen

När kvantmekaniken växte fram under början av 1900-talet lärde sig forskare med tiden att utnyttja kvantmekaniska fenomen för helt nya tillämpningar hos vissa lämpliga material. Under 1950-talet kommer de första kommersiella transistorerna och tillsammans med utveckling av nya teknologier – som laser, mikroprocessorer, kärnteknologi och avancerad medicinsk diagnostik – formas det moderna högteknologiska samhället, man talar om den första kvantrevolutionen.

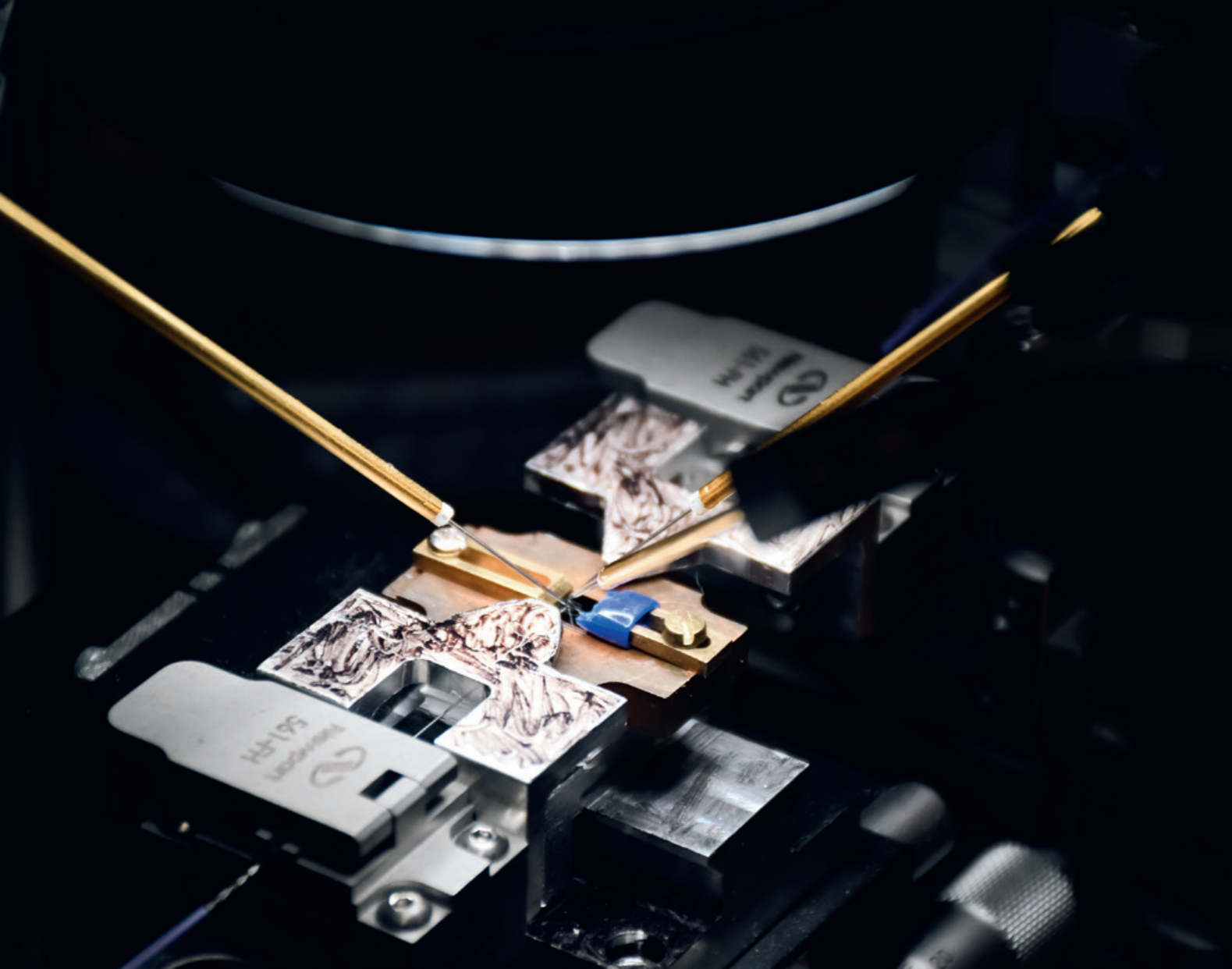


# Andra kvantrevolutionen

Den andra kvantrevolutionen innebär att man nu inte bara kan kontrollera och utnyttja olika kvant-tillstånd utan att man nu även börjar lära sig styra de kvantfysikaliska tillstånden hos enskilda atomer och fotoner på ett sätt som tillåter helt nya kvantmekaniska system och helt nya tillämpningar.







# HÄR ÖPPNAS PORTEN TILL DE OPTISKA AVENYERNA

**Victor Torres Company kommer från Valencia i Spanien. Det var i USA som han mötte ljuset. Hans professor hade börjat med ett nytt projekt – en så kallad frekvenskam som är en typ av laser. Oj, det här var framtiden menade Victor Torres Company. 2012 kom han till Sverige och är biträdande professor vid avdelningen för fotonik på Chalmers. Målet är att sätta frekvenskammen på ett chip. Då öppnas optiska avenyer, säger han.**

**D**et tog några år att utveckla tekniken, men nu är vi den bästa gruppen i världen. Inte bara på att tillverka fotoniska chip utan även att göra det med låga förluster.

I gruppen finns forskare från Island, Nepal, Kina, Mexiko och Italien. Gruppens resultat har väckt internationell uppmärksamhet. Arbetet är grundforskning. Det är svårt att få frekvenskammen som idag är en stor låda att rymmas på ett chip. Här längst ute på forskningsfronten hamnar man i kvantfysiken.

– Om det lyckas öppnas den optiska avenyn mot framtiden, säger Victor Torres Company.

– En vanlig laser har bara en frekvens och en ljusfärg. Men alla lasrar är inte likadana. Det finns några lasrar som avger ljus i en perfekt ström av pulser. Spektrum av denna typ av lasrar, bildas av flera diskreta frekvenser eller färger. Beroende på tekniken kan man få upp till tiotusentals olika färger. Varje färg motsvaras av en liten stapel på ett diagram. En kurva som vid en första anblick ser ut att vara jämn visar sig bestå av massor olika hack. Ett hack för varje frekvens och färg. Och det här är som kvantfysiken kommer in. För att se hacken måste man använda kvantfysik.

– I stället för att mäta avståndet mellan taggarna kan man mäta frekvenser, säger Victor Torres Company. Nu har vi fått en frekvenskam som kan göra en massa olika saker som en vanlig laser inte kan. Vi kan använda kammen för att studera fenomen i den klassiska fysiken, makroskopi och tidmätning. Vi forskar på om kammen kan användas till kvantklockor.

**Broar mellan fysiska världar**  
Elektroner och halvledare kan förstås med klassisk fysik. Fotoner hör mer hemma i kvantfysiken. En frekvenskam kan betraktas som en bro mellan den klassiska fysiken och kvantfysiken. På bron kan man gå från den ena världen till den andra.

– Det är oerhört intressant. Man kan

gå från mikrovåg till optiska frekvenser och tvärtom. I stället för mikrovåg kan man ha en optisk referens. När det går för fort för elektroniken hänger optiken med. Det forskas mycket på hur övergången till ljusets värld ska se ut. Hittills har man använt halvledare för detta. Frekvenskammen kan visa på andra lösningar, säger Victor Torres Company.

– Ljuset är framtiden, verkligen. Det gäller att hitta ett sätt där elektronikens värld och ljusets värld möts. Kanske en övergång till en ny värld? Elektroniken kommer inte att försvinna. Informatioken kommer alltid att vara ettor och nollor som far fram på optiska avenyer.

En frekvenskam, eller mikrokam, kan beskrivas som en optisk stämgafläpp eller en ljuslinjal. Kammen skapas av en laser och en så kallad optisk mikroresonator. Ljuset skickas in i en resonanslåda och ut kommer kammen med en massa taggar som representerar olika färger och frekvenser. Taggarna separeras och så får man markeringarna på ljuslinjalen. Victor Torres Companys grupp har gjort en ny typ av frekvenskam på ett chip som använder två mikroresonatorer istället för en. Det ökar energieffektiviteten tio gånger jämfört med dagens teknik.

## Som att sjunga i en katedral

Eftersom nästan alla optiska mätningar kan kopplas till ljusfrekvenser kan mikrokammen göra nytta i många olika sammanhang:

- minska energianvändningen i datacenter för fiberoptiska kommunikationssystem.
- mäta avstånd med hög precision till exempel i självkörande fordon.
- kalibrera mätinstrument i rymdobservatorier som används för att försöka upptäcka planeter utanför vårt solsystem.
- exakta atomur och mobilappar nämns som andra områden där mikrokammen öppnar nya möjligheter. Den skulle till exempel kunna analysera vår utandningsluft för att tidigt upptäcka sjukdomar.

– Ljusets hastighet beror på intensitet

och ljus. Ibland behöver man kraftigt ljus för att modifiera ljusets hastighet. För att få nya färger behövs så kallad icke-linjär optik. Resonansen skapar mer ström än vad som skickas in. Det blir en förstärkning som när man sjunger i en katedral. Man jagar material som kan ge mycket kraft med lite resonans. Vi använder ljuset i klassisk fysik. Det intressanta är att detta är icke-linjär optik. Frekvenserna har osäkerheter som man bara kan förstå med kvantfysik, säger Victor Torres Company.

– Våra kunder förstår inte linjär och icke-linjär optik, men vi kan skicka en design till dem. En doktorand har gjort ett bibliotek av komponenter. Som legodelar. Vi fungerar som ett designhus.

– Vi drömmer om chip. Hur långt borta ligger det? Det är grundforskning när det gäller teknik. Hur kan man kombinera olika halvledare? Att utveckla ett chip för laser ger inte bara frekvenskamar utan kan användas för till exempel meteorologi, sensorer och kvantoptik, säger Victor Torres Company. □

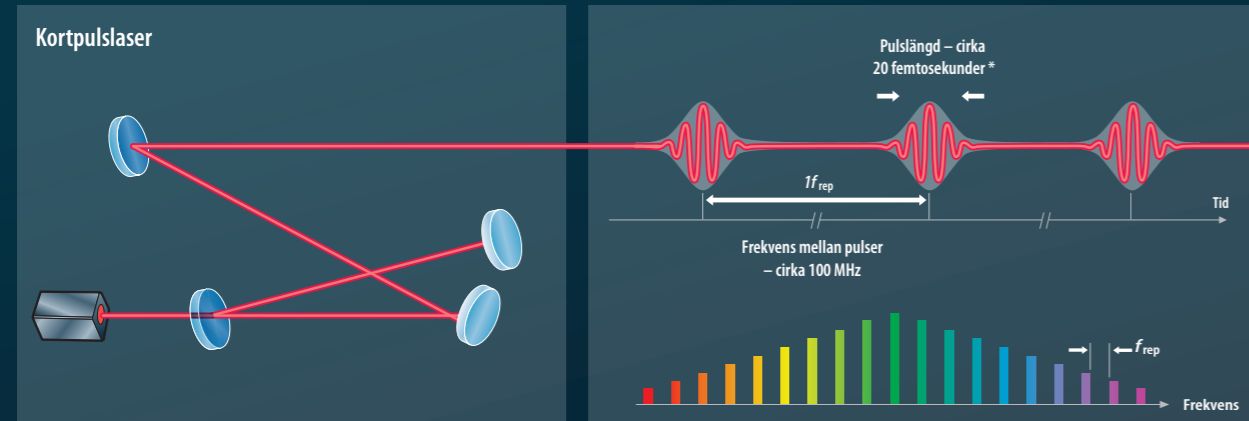




# Den optiska frekvenskammen

En optisk frekvenskam är ett mycket exakt verktyg för att mäta olika färger – eller frekvenser av ljus. Framsteg inom ultrasnabb laser gör det idag möjligt att mäta fler frekvenser med större noggrannhet än tidigare. Optiska frekvenskammor används redan inom många tillämpningar.

## Frekvenskammens grundprincip



1. En laserstråle avger ett kontinuerligt tåg av mycket korta, tätt placerade ljuspulser. Laserstrålen hårbärger potentiellt miljontals olika frekvenser.
2. De extremt korta pulserna är endast 20 femtosekunder. Frekvensen mellan pulserna är cirka 100 MHz. Frekvenskammen uppstår när de två frihetsgraderna – frekvensseparationen mellan linjer och frekvensavståndet till noll – kontrolleras.

\* En femtosekund motsvarar en miljonedel av en miljarddel av en sekund.

## Kan både mäta och generera frekvenser av ljus

En bra laserkam bygger upp flera hundra tusen frekvenser (eller tänder) vilket möjliggör flexibla, exakta mätningar eller exakta genereringar av frekvenser för en rad, vitt skilda applikationer.

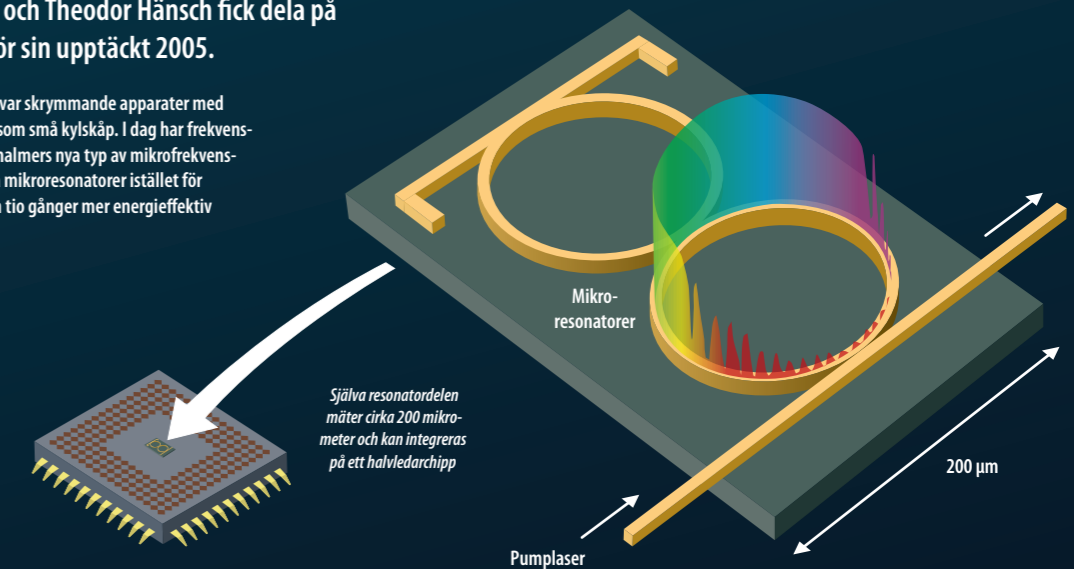


Källor: Chalmers tekniska högskola, Nature Photonics, Communication Physics

# Optisk mikrofrequenskam på ett chip

Frekvenskammorna utvecklades under 1990-talet. Forskarna John Hall och Theodor Hänsch fick dela på Nobelpriset i fysik för sin upptäckt 2005.

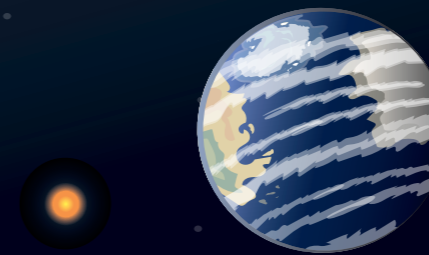
De första frekvenskammorna var skrymmande apparater med all kringutrustning lika stora som små kylskåp. I dag har frekvenskammorna miniatyriserats. Chalmers nya typ av mikrofrequenskam på ett chip, använder två mikroresonatorer istället för tidigare endast en. Det gör den tio gånger mer energieffektiv och mer flexibel än tidigare.



## Fler tillämpningar

### Upptäckt av exoplaneter

Kan användas för att kalibrera mätinstrument i rymdobservatorier som används för att försöka upptäcka exoplaneter.



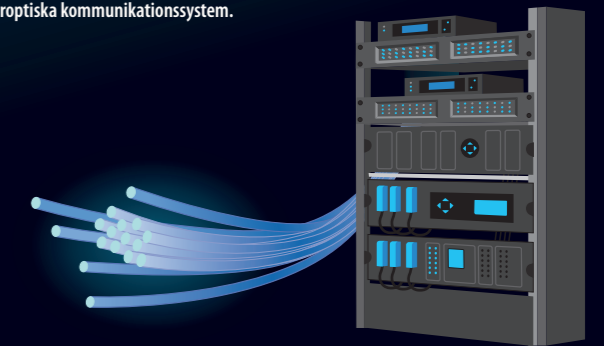
### Sjukdomar i utandningsluft

Kan användas för utveckla instrument som snabbt kan diagnostisera och övervaka sjukdommar genom att analysera utandningsluft.



### Optiska kommunikationssystem

Minskar energianvändningen i datacenter för fiberoptiska kommunikationssystem.



### Självkörande fordon

Kan användas i självkörande fordon genom att tillåta mätning av avstånd med hög precision.







**P**å skrivbordet står två stora skärmar. På ett sidobord lite utrustning. Det är hans laboratorium. Han tar fram en plastpåse med industri-diamanter från Kina. Han har gjort en prototyp med den lilla diamantskivan i mitten. Det ser inte mycket ut för världen – vilket är finessen.

Haitham El-Ella arbetar tio timmar om dagen. Han har växlat från den renodlat akademiska karriären till att vara entreprenör och forskare. Ett sätt att få forska självständigt, säger han. Hans dröm om en atomklocka på ett chip börjar nu att delas av andra. Under sommaren kom beskedet att investera-re ställer upp med 9,2 miljoner.

– Nu kan vi fortsätta utveckla vår patentskyddade diamantteknologi och leverera våra toppmoderna atomur

baserade på diamantkvantteknologi. Med denna investering kommer vi att kunna skala vår produktleverans och förverkliga vår vision om att erbjuda konkurrenskraftig och omedelbart användbar hårdvara för kvantteknik, säger Haitham El-Ella som nu kanske kan anställa. En ingenjör och en verksamhetschef står högst på listan.

#### **Internationell forskningsvärld**

Almi Invest investerar 3 miljoner kronor i AdamantQ. Investeringen är en del av en finansieringsrunda på 9,2 miljoner kronor och sker tillsammans med Industrifonden och Navigare Ventures. Almi Invest stödjer svenska innovatörer. Almi Invest är ett riskkapitalbolag inom Almi-koncernen och delfinansierat av EU:s strukturfonder.

– AdamantQ är ett imponerande exempel på en innovativ kvantteknik-startup med betydande marknadspotential. Företagets klockor base-

rade på diamantteknologi har redan lockat internationella kunder, säger Faten Mustafa på Almi Invest.

Haitham El-Ella kan sägas vara ett exempel på den internationella forskningsvärlden. Han är född i Köpenhamn, uppvuxen i Malmö och gjorde sin doktorsavhandling i Cambridge 2012. Området var halvledarteknik och kvantsystem. Sedan gled det över från halvledare till kristaller.

– Jag jobbade hårt fem år med detta och hoppades att mina resultat skulle tala för sig själva. Men det blev ingen klapp på axeln och jag körde in i väggen 2019. Jag arbetade i åtta månader för Stefan Kröll här i Lund, men det blev tyvärr ingen fortsättning. Så kom jag 2021 i kontakt med några som arbetade med diamantbaserade kvantsensorer. Vi forskade och utvecklade prototyper, men inte heller där blev den en fortsättning, säger Haitham El-Ella. ▷

## **DRÖMMEN OM ATT SÄTTA ETT ATOMUR PÅ ETT CHIP**

**Miljarderna rullar när de stora teknikföretagen satsar på kvantdatorer. I andra ändan av forskningsfronten sliter den ensamma forskaren med sitt enmansföretag och drömmer om att erövra världen. Korridorerna i Vetenskapsparken Ideon i Lund är fulla av startup-företag. I ett litet rum sitter Haitham El-Ella med sitt företag AdamantQ. Hans dröm är att sätta ett atomur på ett chip.**





– Jag hade min akademiska bakgrund, hade publicerat resultat och kände folk i branschen. Så varför inte omsätta mina kunskaper i ett företag? Men jag hade ingen erfarenhet av företagande. Av en slump fick jag höra talas om Ideon.

#### En oslipad diamant

Ideon startades 1983 som Sveriges första vetenskapspark. Ideon Innovation säger sig vara med på hela resan från start-up till ett färdigt företag. Nu är 400 företag knutna till verksamheten. Totalt sedan starten handlar det om 1 200 företag. Områden som man satsar på är bland andra smarta städer, transporter, smarta material och teknik för hälsovården.

– Jag fick presentera min idé. Det blev nog en väldigt akademisk föreläsning. Vi förstår ingenting, sa de. Men du klarade testet.

Det var i december 2021. Företaget var en oslipad diamant. I januari 2022 började det ljusna. De första kunderna hörde av sig i. Och så på sommaren kom finansieringen.

– Alla akademiker vill arbeta självständigt. Entreprenörskapet kan vara ett sätt att göra detta. Det har varit många hinder på vägen, men jag har haft tur att träffa rätt människor vid rätt tillfälle och jag är glad över var jag hamnat. När jag gick in i det här hade jag inga förväntningar, säger Haitham El-Ella.

Han säger att det är lättare för start-ups i kvantsektorn i länder som USA, Storbritannien och Tyskland.

– Investerare där inser att det här är något att satsa på. Inte förvånande med tanke på att forskningen till stor del har skett i dessa länder. Man ligger i allmänhet längre fram än i Sverige.

Diamanter spelar en stor roll inom kvantfysiken. Diamanter är det hårdaste som finns och har också det största

elektroniska så kallade bandgapet.

– En stor fördel är att det finns potential att krympa system till att få plats på ett chip. Detta lilla chip kan bli en spelplan för många olika kvantsystem, säger Haitham El-Ella. Vår metod är kostnadseffektiv. Det är inte kvantdatorerna. Det är vårt budskap till kunderna.

– Nu jobbar vi med kvantsensorer för tidsmätning. Det finns atomur på många ställen i världen. De är hopkopplade och ger en sorts medeltid som i sin tur används för tidskritiska system som i flygplan för navigering och satellitnavigering. Men det behövs lokala exakta klockor. Här kommer chipet in. Generellt vill man komma bort från att förlita sig på globala system för att få rätt tid. Det är svårt att få rätt tid i störda miljöer som till exempel i rymden eller i militära sammanhang eftersom man är beroende av atomurens nät.

#### Den hajpade kvantdatoren

Haitham El-Ella säger att det finns en avvägning mellan olika faktorer som kostnad, kraft, storlek och exakthet i mätningen.

– Vårt system med att utnyttja diamantens egenskaper är bättre än den metod som används i dagens atomur. Men det handlar inte bara om exakthet utan även om stabilitet. Och där är vi inte än på samma nivå vad gäller precision.

Haitham El-Ella tror på sina diamanter. Däremot är han skeptisk till kvantdatoren.

– De stora satsningarna på att bygga en kvantdator handlar till stor del om teknologisk kapprustning. Ingen vill av nationella säkerhetsskäl riskera att halka efter. Det är mycket hajp kring kvantdatoren. Den är övervärderad. Man måste förstå begränsningarna. □



»Nu jobbar vi med kvantsensorer för tidsmätning. Det finns atomur på många ställen i världen. De är hopkopplade och ger en sorts medeltid som i sin tur används för tidskritiska system som i flygplan för navigering och satellitnavigering. Men det behövs lokala exakta klockor.«

»Jag fick presentera min idé. Det blev nog en väldigt akademisk föreläsning. Vi förstår ingenting, sa de. Men du klarade testet.«

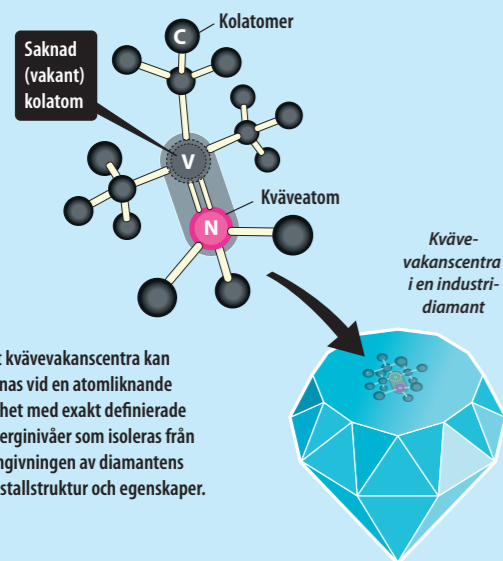


# Atomklocka på ett chip

Exakt tidtagning är nyckeln till många moderna tekniker, från positionerings- och navigationssystem till de protokoll som får internet att fungera. Men atomklockor kräver en komplex infrastruktur. En portabel precisionsatomklocka på ett chip skulle vara användbar i många mobila applikationer och kunna hålla tiden när GPS-signaler är blockerade eller förvrängda.

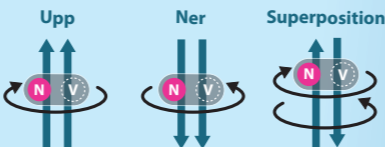
## Defekta diamanter

1. En lovande teknikstrategi för att tillverka en precisionsatomklocka på chip är att använda diamanndefekter i kommersiella industri-diamanter. Det finns många olika slags defekter i diamanter, en av de mer lättillgängliga kallas kvävevakanscentra och består av en kväveföreningssatom som sitter bredvid en saknad kolatom.

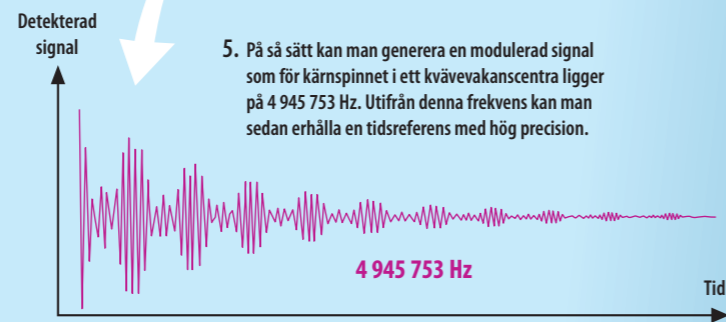


2. Ett kvävevakanscentra kan liknas vid en atomliknande enhet med exakt definierade energinivåer som isoleras från omgivningen av diamantens kristallstruktur och egenskaper.

3. Kärn- och elektronspinn i dessa defekter kan anta tre olika magnetiska tillstånd var, och 3 x 3 kombinerade magnetiska tillstånd (gäller för isotopen <sup>14</sup>N). Målet är att manipulera och läsa ut två av dessa kombinerade tillstånd.



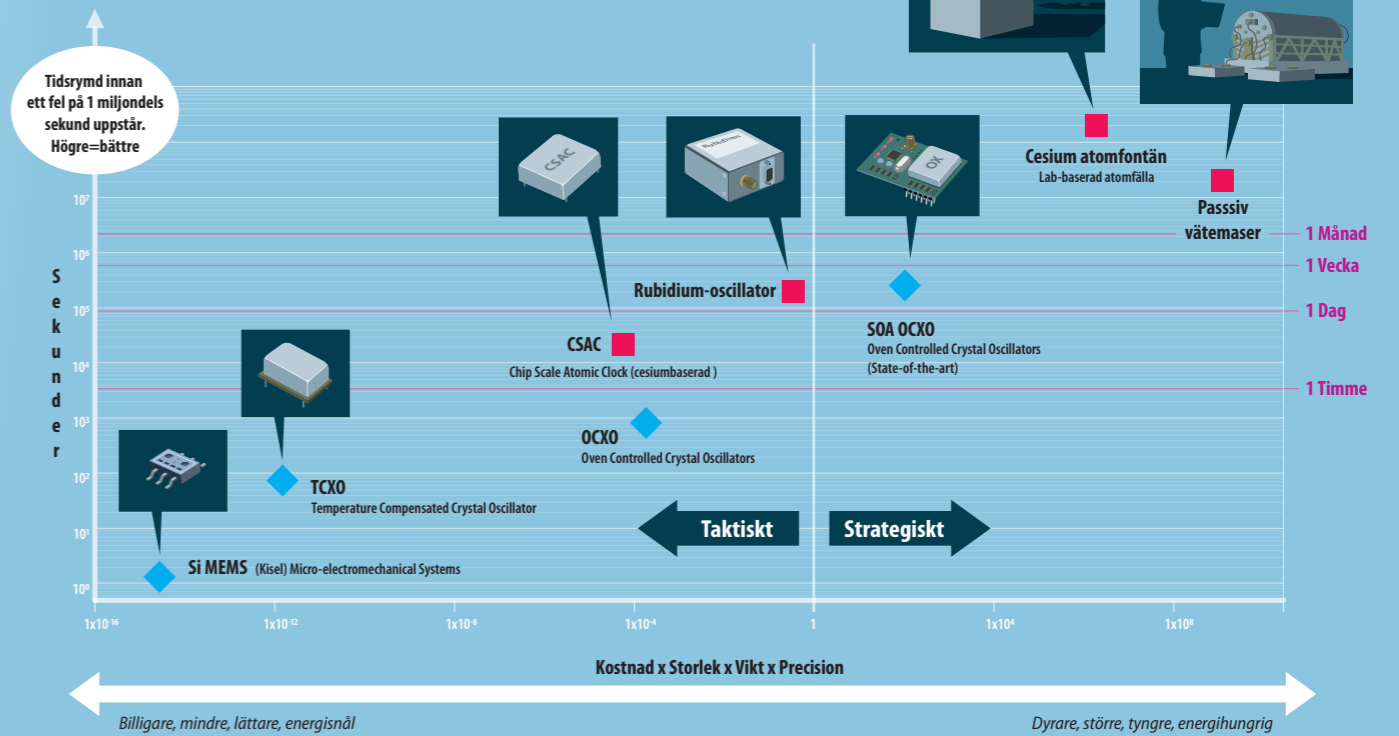
4. Spinntillstånden kan förberedas, styras och avläsas med en kombination av grönt laserljus samt radio- och mikrovågsstrålning. Spinntillstånden avläses sedan genom ändringar i den röda ljusemissionen från kvävevakansen när den exciteras av den gröna lasern.



5. På så sätt kan man generera en modulerad signal som för kärnspinn i ett kvävevakanscentra ligger på 4 945 753 Hz. Utifrån denna frekvens kan man sedan erhålla en tidsreferens med hög precision.

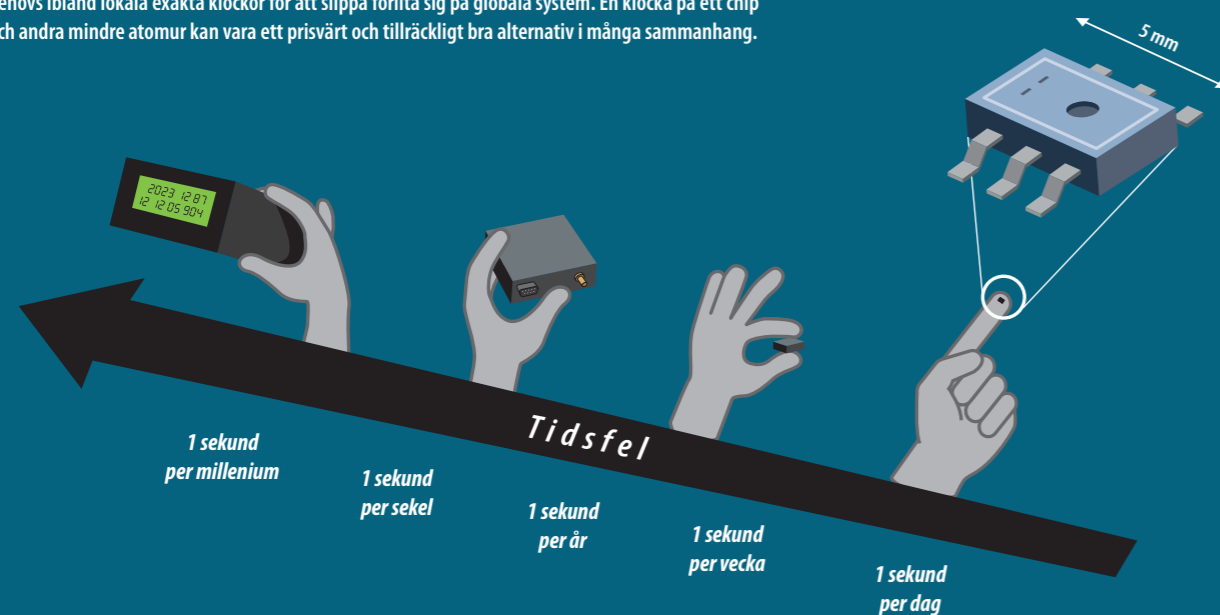
# Taktisk eller strategisk tidsmätning

Samspel mellan tidsfel och (volymen x kostnad x vikt x energiförbrukning), som i sin tur avgör om referensen är mer taktisk eller strategisk



## Ibland är bra tillräckligt bra

De bästa atomklockorna idag fyller hela rum och drar sig någon sekund på 100 miljoner år. De ingår i ett nätverk för att räkna ut en gemensam medeltid för de globala positioneringssystemen. Men det behövs ibland lokala exakta klockor för att slippa förlita sig på globala system. En klocka på ett chip och andra mindre atomur kan vara ett prisvärt och tillräckligt bra alternativ i många sammanhang.



## Internets ryggrad (strategiskt)

Ryggraden för det globala positions- och navigeringssystemet bygger idag på de atomklockor som finns i de GNSS-satelliter som kretsar runt jorden – tillsammans med ett nätverk av cirka 250 stationära atomklockor i laboratorier runt om i världen.



## Lokala precisionsklockor (taktiskt)

Skulle GNSS-signalerna från ryggraden blockeras eller förvrängas, kan lokala klockor fungera som primära tidkällor för viktiga samhällsfunktioner till dess kontakt återfås.







# STEPHANIE BRINNER FÖR DE MAGISKA VÄTSKORNA

**Redan som ung började Stephanie Reimann intressera sig för naturvetenskapen. Efter två års tragglande på universitetet öppnade sig en helt ny värld – kvantfysiken. Att förstå atomkärnan och atomstrukturer är fortfarande lika spännande, säger hon.**

**S**tephanie Reimann har bott i Sverige sedan många år och är nu teoretisk fysiker, eller mer formellt professor vid avdelningen för matematisk fysik. Hennes stora intresse är kvantvätskor eller supervätskor. Vägen fram till dessa magiska vätskor ha tagit forskningen mer än hundra år.

När en gas övergår till vätska bildas ett kondensat. När fuktig luft avkyls på en kall yta bildas kondens. Satyendra Nath Bose, fysiker i dåvarande Pakistan, skrev en fyrsidig artikel 1924. Den fick så stor betydelse för forskningen att en typ av partikel, bosonen, uppkallades efter honom. Hans artikel handlade inte om partiklar utan om statistik och ljus. Albert Einstein tittade på artikeln och två år senare presenterades det som idag kallas Bose-Einsteins-statistik.

– Bose-Einstein räknade fram att om man kylar ned en gas av bosoniska atomer så kan alla dess atomer hamna i samma kvanttillstånd. Sedan tog det drygt 70 år till innan man i experiment med hjälp av lasrar och magneto-optiska fällor kunde visa att teorin stämde. Bose-Einstein-kondensat kan finnas i naturen, till exempel i rymden, men inte i trädgården. Det nya är att vi sedan

*»Spiller man ut kaffe flyter det på och stannar. En supervätska skulle fortsätta att rinna. Häller man vätskan i en ring så kan den fortsätta att flyta friktionsfritt.«*

1990-talet kan skapa sådana kvantmekaniska system i labbet, säger Stephanie Reimann.

## **Kvantvätska i gyro**

Som "makroskopiskt" betecknas ofta fenomen eller objekt inom fysiken som följer den klassiska fysikens lagar.

– Det som intresserar mig just nu som mest och som jag tror kommer att bli allt viktigare i framtiden är kvantvätskor. Kvantvätskorna kan bildas när ultrakalla kvantgaser kondenseras. När detta realiserades i magneto-optiska fällor vid ultralåga temperaturer utvecklades ett nytt område i atomfysiken. Vi har fått helt nya möjligheter att titta på kvantfysik i makroskopiska tillstånd. Kondensatet är så spännande för att man kan ändra på den ultrakalla gasen så att den uppför sig som en supervätska. Det är kvantprocesserna som stabiliserar vätskan och det är mitt forskningsområde.

Stephanie visar med kaffemuggen hur det går till.

– Spiller man ut kaffe flyter det på och stannar. En supervätska skulle fortsätta att rinna. Häller man vätskan i en ring så kan den fortsätta att flyta friktionsfritt. Dessa egenskaper gör att man kan använda sig av sådana system för att mäta kvantinterferens. Vi kan forma vätskan så att den får den önskade egenskapen och använda vätskan för att mäta rotation och acceleration och göra gyrometrar. Vilket i sin tur kan användas för navigation utan satelliter. Hur långt bort ligger ett färdigt gyro? Kanske tio till tjugo år. Man måste ned i storlek. Ändå är det inte så svårt. Det är inte omöjligt.

– Vi arbetar med nya kvantvätskor som man inte observerat tidigare. Man kan omvandla gasen och få ett stabilt tillstånd med nya egenskaper. Med ett magnetfält kan man ändra växelverkan mellan atomerna i gasen så att den ▷



ändras från gas till vätska. Vätskorna är lite roliga. Om man tillför energi, så kan det hända att atomer sedan spottas ut från vätskan för att vätskan vill behålla sitt superkalla kondensattillstånd.

– Den fantastiska matematiska apparaten beskriver naturen på ett bra sätt. Passar matematiken förstår man att man är på rätt spår, säger Stephanie Reimann och tar fram kaffemuggen igen för att förklara kvantmekaniken. Stoppar man ned en partikel i muggen och rör om går det ganska bra att beskriva dess rörelse, likaså om muggen är en så kallad kvantbrunn och partikeln till exempel en elektron. Är det hundra partiklar – klassiska eller kvantmekaniska – så är det inte lika självklart. Då blir det mer komplicerat att beskriva detta teoretiskt, och i synnerhet, kvantmekaniskt. Att teoretiskt förstå och modellera växelverkande mångpartikel-system inom kvantmekaniken kräver mycket beräkningsfysik.

#### Den sannolika pennan

All materia omkring oss är ju egentligen uppbyggt av sådana kvantpartiklar – atomer, och deras nukleoner och elektroner – och att teoretiskt förstå hur dessa partiklar samverkar är fortfarande en av de stora teoretiska frågeställningar i den teoretiska fysiken.

– Här kommer experimentet in. Här testas teorin. Problemet med kvantmekanik är att du oftast förstör kvanttillståndet när du mäter. Man kan bara beskriva sannolikheter och då kommer det in många saker som spökar. Sammanflätning är ett exempel.

– Att förstå kvantmekanik handlar i grunden om synen på determinismen. I determinismen är en penna en penna. Om jag kastar den här pennan vet jag var den hamnar. I kvantfysiken vet jag inte det. Men det finns en sannolikhet för var den hamnar. Ju mer vi lär oss om kvantmekaniken desto mer kan vi förstå av världen.

– Vi vet i nuläget inte hur långt man verkligen kommit än med kvantdatoren – ibland sker saker inte i första hand på universiteten utan inom - eller igenom – kopplingar till industrin. Mina kolleger som utvecklar algoritmer för kvantdatoren tror att den ska bli verklighet. Man vet inte än vilket system

man ska satsa på. Och man måste ha stenkoll på utvecklingen.

– Min uppgift är, utöver forskningen, att undervisa studenter i kvantteori så det finns experter när det är dags. Undervisningen är tyvärr kroniskt underfinansierad, och man borde satsa större på utbildningen i detta kunskapsområde med framtiden i åtanke. En stor del av min tid i dagsläget går tyvärr åt till att skriva anslagsansökningar, för att forskning som mest finansieras med externa medel. Det svenska systemet fungerar tyvärr inte riktigt bra, och värdefull arbetsro slösas ofta bort med för mycket centralisering och administration vid lärosätena. Utbildningen är en viktig del av verksamheten och det

*»En filosofisk tanke är förstås att om det krävs så mycket räknande för att få teorin att stämma borde man leta efter en annan teori.«*

gäller att behålla de unga forskarna. Jag arbetar mycket även med datorvetenskap och beräkningsfysik och industrin plockar folk direkt när de är utbildade.

#### I huvudet på Einstein

Teorier, experiment, formler. Hur tänker man? Pionjärer som Einstein hade papper och penna och teorin i huvudet.

– Det stora problemet är att det är så komplicerat att man alltid måste approximera, säger Stephanie Reimann. Pionjärerna fick approximera mer och de kom inte lika nära verkligheten. En filosofisk tanke är förstås att om det krävs så mycket räknande för att få teorin att stämma borde man leta efter en annan teori. Den teori vi har idag gör det väldigt komplicerat så fort vi får fler än tre partiklar, men det blir också superintressant för man stöter på fenomen som till exempel den här supervätskan. Problemet med en ny teori är att den ska kunna förklara

bakåt. Teoretikern måste tänka i bilder och ekvationer.

#### Läser en teoretiker ekvationer som en musiker läser noter?

– Det är ofta så komplicerat att man måste stoppa in ekvationen i en dator. Jag ville i början av mina studier egentligen bli cellist, men det gick inte - man måste träna muskelminnet så många timmar om dagen, repetera och repetera inför konserternas ödesmoment. Den insikten gjorde nog att jag hellre blev kvantfysiker, säger Stephanie och skrattar. I forskningen däremot är det nya saker att upptäcka hela tiden.

#### Vilken väg tar forskningen?

– Kvantoptik med ultrakalla atomära gaser är ett enormt forskningsfält

i Europa, USA och Kina. Sverige är fantastiskt på vissa områden inom kvantoptik, men däremot har Sverige inget experimentellt på ultrakalla gaser. Jag fattar det inte. Hur kan man utsluta ett så viktigt och fundamentalt forskningsområde, som nu även har fått stor betydelse inom framtida kvantteknologier?

Då och då kommer Stephanie Reimann in på Rydberg. Vem var då denne Rydberg? Janne Rydberg (1854–1919) var en forskare i Lund som lade grunden till kvantmekaniken. Han utvecklade Rydbergs konstant och hans forskning bidrog till att den danske forskaren Nils Bohr kunde presentera sin berömda atommodell. Så det finns traditioner i atomfysikens Lund. □



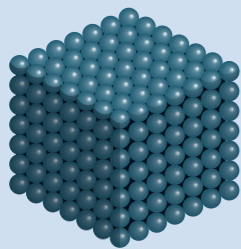


# Bose-Einstein-kondensat

## – ett av flera aggregationstillstånd

Aggregationstillstånd är de olika tillstånd ett ämne kan befinna sig i beroende på temperatur och tryck. De tre klassiska tillstånden – fast materia, vätska och gas – är tillsammans med plasma de fyra aggregations-tillstånd vi stöter på i vardagen. Ett femte aggregationstillstånd är det så kallade Bose-Einstein-kondensatet som kan uppstå hos vissa kvantpartiklar vid extremt låga temperaturer.

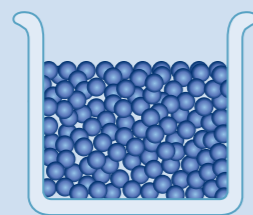
### Fast materia



Partiklar i fast materia kan inte röra sig fritt på grund av att krafterna emellan dem är för starka.

Har bestämd volym och en stabil, avgränsad form.

### Vätskor

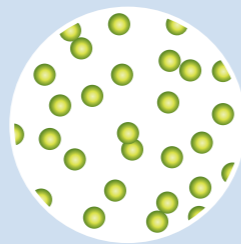


Partiklarna har tillräckligt med energi för att röra sig relativt fritt i relation till varandra.

Formen avgörs av behållaren i vilken vätskan befinner sig.

Vätskor har ytspänning.

### Gaser

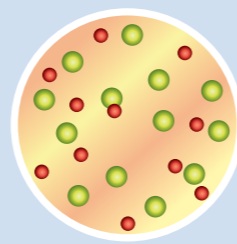


Partiklarna har så mycket rörelse-energi och avstånd till varandra, och krafterna mellan dem är så svaga så att de nästan kan röra sig fritt.

Har ingen bestämd form.

Gaser fyller hela den behållare de befinner sig i.

### Plasma



Är joniserad gas, som existerar vid mycket höga temperaturer (flera tusen grader Celsius).

Elektronerna lämnar atomerna vilket resulterar i fria elektroner.

Plasman leder ström och reagerar starkt på elektromagnetiska fält.

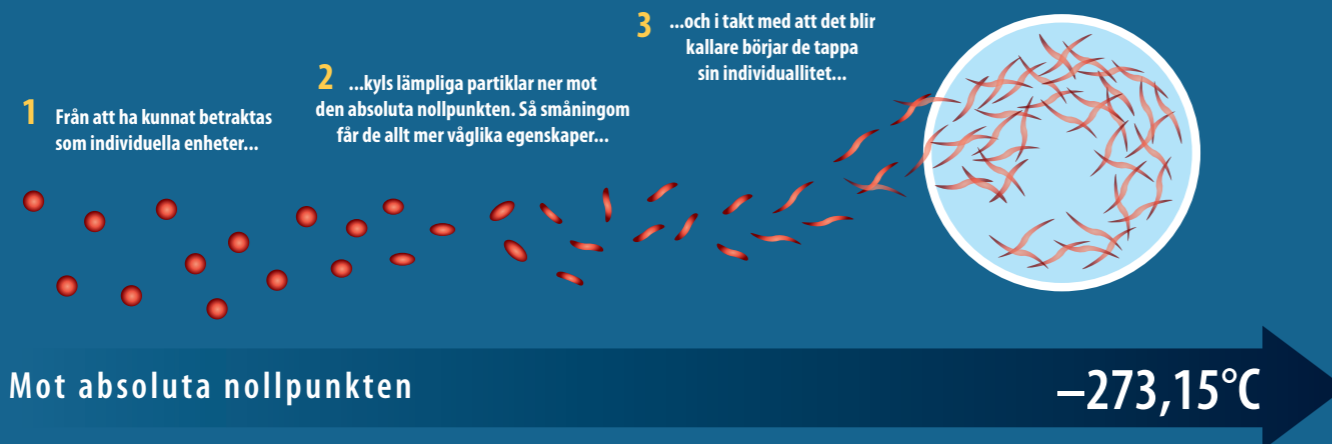
Exempel på plasma är vanlig eld.

## Bose-Einstein-kondensat

1924 skickade en indisk fysiker vid namn Satyendra Bose sitt senaste arbete till Albert Einstein som blev imponerad och insåg att Bose var något på spåren.

Einstein jobbade vidare på Boses beräkningar och kom fram till att strax över den absoluta nollpunkten skulle det vara möjligt att skapa en helt ny typ av materia som följer kvantfysiska lagar. Det tog 70 år men 1995 lyckades man framställa detta speciella kondensat för första gången.

Det nya aggregationstillståndet bygger på att kyla speciella kvantpartiklar, kallade bosoner, till extremt låga temperaturer där alla partiklar går samman och uppför sig som ett enda sammanhängande kvantsystem.



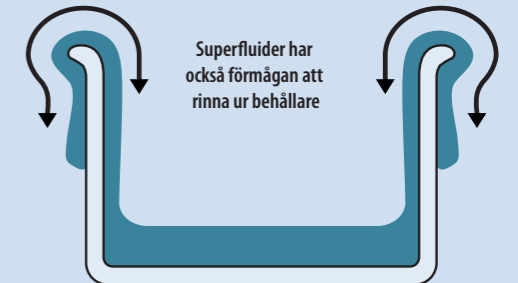
## Ultrakalla kvantvätskor

Vätskor som uppvisar kvantmekaniska effekter på makroskopisk nivå samlas under namnet kvantvätskor. Hit hör superfluider (såsom flytande helium, vissa bosoniska vätskor eller supraledare) och nya supersolider i dipolära kvantvätskor. Sådana system kan experimentellt framställas med ultrakalla atomära kvantgaser i kvantoptiska fällor.

### Supervätskor

En superfluid eller supervätska karakteriseras av att den är en vätska helt utan viskositet. Vid omrörning kan den till exempel rotera i all oändlighet. Den kan bilda virvlar som antar speciella värden vilka bestäms genom diskreta kvanttal.

Superfluiditet uppstår ofta samtidigt med Bose-Einstein-kondensering som när man kylar ner isotopen helium-4 till nära nollpunkten.

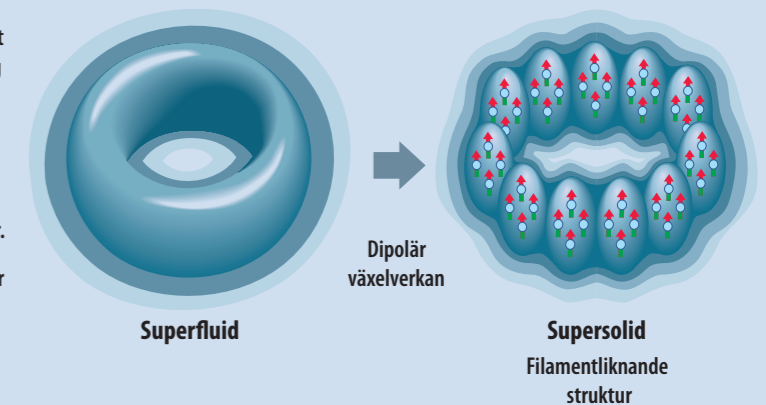


### Supersolider

Forskare har länge letat efter ett sätt att skapa supersolider, ett speciellt kvanttillstånd där partiklar är ordnade i en kristallin struktur som vanlig fast materia – men där de också kan flyta med noll viskositet, som en supervätska.

Efter många fruktlösa försök med helium gjordes nyligen experiment med atomer som krom, dysprosium och erbium vilka har ett starkt så kallat dipolmoment vilket gör att de kan uppföra sig som små magneter.

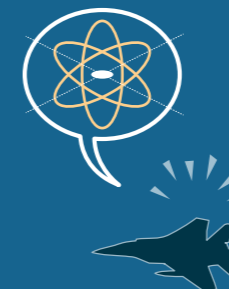
De kan bilda små filamentliknande strukturer som liknar de spikmönster som kan bildas i ferrofluider i ett yttre magnetfält. Strukturerna kan sammanflätas till den länge eftersökta supersolida kvantvätskan.



## Tillämpningar

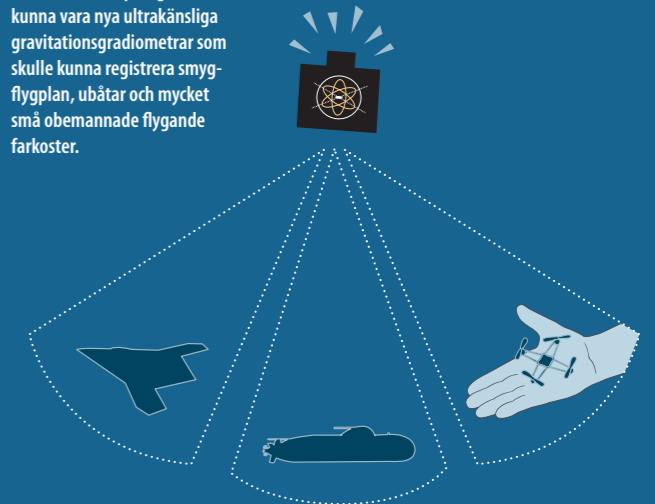
### Atominterferometer

Med hjälp av supervätskor och supersolider skulle man med nya typer av atominterferometer kunna mäta rotation och acceleration och göra superkänsliga gyrometrar. Vilket i sin tur kan användas för navigation utan satelliter.



### Gravitationsgradiometer

En annan tillämpning skulle kunna vara nya ultrakänsliga gravitationsgradiometer som skulle kunna registrera smygflygplan, ubåtar och mycket små obemannade flygande farkoster.



Källor:  
Stephanie M. Reimann et al., Lunds Universitet  
<https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.107.063316>  
<https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.103.013313>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/State\\_of\\_matter](https://en.wikipedia.org/wiki/State_of_matter)



# FORSKAREN OCH HANS FOTONER

När professor Val Zwiller började sin bana fanns knappast Kina på forskningskartan. Jag besökte ett universitet i Kina 1995 och det fanns nästan ingenting. Förra året var jag i Hongkong och där ligger man nu före oss. Om jag kan sätta en doktorand på ett projekt så kan en grupp i Kina anställa 20 doktorander. Samtidigt har storföretag som Philips i Nederländerna och Bells i USA kraftigt minskat sin forskning, säger Val Zwiller.



**V**al Zwiller är professor i tillämpad fysik, kvantnanofotonik vid Kungliga tekniska högskolan, KTH. Han är född i Frankrike och kom 1995

till Sverige som student och gjorde sin avhandling i Lund. Forskningen tog honom till Tyskland och Schweiz. Han var tio år i Nederländerna för att återkomma till Sverige 2015.

– Gemensamt för våra projekt är att vi kan detektera enstaka fotoner. Jag började med detta i Nederländerna. Vi samarbetar med länder som Australien, Singapore, Taiwan och USA. Skicka bara ett mejl så får ni 250 000 dollar för att samarbeta med Naval research lab.

Som exempel på forskningsprojekt nämner Val Zwiller hur man kan stjäla information från fiberkablar, laserradar, lidar för att studera gaser samt kvantkommunikation. Till sin hjälp har han unga forskare som doktoranden Theodor Staffas (se sid 42–47) och Carlo Svensson som nyss tog sin masterexamen i teoretisk fysik.

### Tjuv och polis och fiber

Carlo Svensson berättar om hur man kan stjäla information från optisk fiber utan att det märks.

– Vi testar tjuv och polis fast med vanlig information. Fibrerna läcker. Antingen kan vi ta det som läcker. Eller så kan man böja dem lite grann och då läcker det. Det räcker med en enstaka foton för varje bit av information för att kunna avlyssna. Försök i laboratorium tyder på att man kan plocka information utan att röra fibern.

–Varje bit som skickas (exempelvis vid en videoöverföring) innehåller miljarder fotoner. Tar man en foton ser man att den biten är en etta eller nolla. Det märks inte att en foton fattas. Informationen kommer ofta i pulser som en avancerad morsekod. För att kunna avlyssna måste man sno en del av varje puls. Det är svårt att göra med en fiber som ligger nedgrävd under gatan, men det går med

undervattenskablar. Så det har pågått länge, men inte på kvantnivån.

Det går en 17 km lång optisk fiber från KTH till Ericsson i Kista.

– Vi skickar en foton per bit, säger Val Zwiller. Om någon avlyssnar fibern så försvinner fotonen. Det är första

*»Vi har många ekvationer, men jag har ingen bild av vad som sker. Jag kan inte säga att jag begriper kvantfysiken. Men jag accepterar den.«*

gången som vi har ett krypto som är baserat på fysik och inte matematik. Många forskare sysslar med det här, men Kina ligger först och vi har många kinesiska doktorander här i Sverige. Kina har en kvantsatellit och Europa diskuterar och ligger minst tio år efter Kina som satsar mycket på informationsöverföring och bedömer området som viktigare än kvantdatorer. Kina gick från botten till toppen på bara tjugo år. Det är otroligt. I Asien har man ett annat tidsperspektiv. Medan vi tänker i kvartal kan asiaterna se tjugo år framåt. Tidigt insåg asiaterna halvledarnas betydelse och nu satsar man på kvantteknologi. Det kommer att ta tid, men man har tålamod. Nu fungerar kvantkommunikation. När jag började min doktorandtjänst 1995 sa alla att kvantdatoren kommer om fem eller sex år. Vi väntar fortfarande.

### Kvant surfar på lidar-trend

Lidar är radar med ljus. Det kan vara objektet som reflekterar, men också gasmolekyler. Med lidar kan man se hur mycket koldioxid det finns i atmosfären. För att göra det behövs detektorer som utvecklas på KTH. I princip skulle man kunna mäta på ett gasmoln på månen. Varje molekyl har en egen signatur. Det gäller bara att identifiera molekylerna. Med den gamla metoden kunde man bara detektera från en plats. Nu kan man skicka upp detektorn i en drönare och

till exempel flyga in och undersöka ett misstänkt moln av giftgaser. Räckvidden är fram till horisonten. KTH ser en möjlighet till samarbeten på detta område med till exempel Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI.

Lidar blir mer och mer populärt och kvantlidar är en del av denna trend. Lidar kan detektera ubåtar på flera hundra meters djup. Andra militära tillämpningar är väderobservationer, luftfuktighet och vindhastighet. Tack vare dopplereffekten kan man med enstaka fotoner se hur partiklar rör sig eftersom våglängden ändras.

Val Zwiller forskar på enskilda fotoner. En foton kan vara både en partikel och en våg.

– Det är konstigt men så är det. Vi har många ekvationer, men jag har ingen bild av vad som sker. Jag kan inte säga att jag begriper kvantfysiken. Men jag accepterar den. □



# KVANTFYSIK FÖR MIG ÄR ATT MÄTA ENSKILDA FOTONER

För Theodor Staffas är kvantfysik att mäta enskilda fotoner. Han är doktorand vid Kungliga Tekniska Högskolan, KTH på avdelningen för tillämpad fysik. Hans avhandling handlar om tillämpningar av supraledande enfotonsdetektorer.

Min ambition är att göra bra mätinstrument som man kan ta ut ur labbet och använda i verkligheten, säger Theodor Staffas.



»Avståndet kan vara upp till en mil. Man skickar ut en miljard fotoner i en puls och hoppas att åtminstone en ska komma tillbaka.«

**A**lla mina projekt handlar om att använda detektorerna som professor Val Zwiller har utvecklat under tjugo år. Vägen till att bli doktorand började med att jag tyckte att fysik var det intressantaste ämnet i skolan. Det var naturligt att fortsätta på KTH och studera fysik. Jag och en kompis fick ett sommarjobb i ett labb på KTH och lärde oss mer om labbet och utrustningen. Vi pushade varandra. Sommarprojektet växte till ett masterprojekt och nu har jag klarat av ungefär en fjärdedel av min doktorsavhandling.

## Lidar och optiska fibrer

Theodor Staffas forskning handlar främst om två områden – lidar och optiska fibrer. Lidar är en sorts radar som använder ljus istället för radiovågor.

Lidar kan användas för avbildning. För att kunna göra detta måste man exakt kunna mäta avstånd.

– Lidar är inget nytt, men med hjälp av enskilda fotoner kan man göra bättre mätningar. Avståndet ökar och precisionen blir bättre. Vi kan bygga tredimensionella bilder till exempel av ett gasmoln.

– Avståndet kan vara upp till en mil. Man skickar ut en miljard fotoner i en puls och hoppas att åtminstone en ska komma tillbaka. Skulle man använda den kvantfysiska metoden sammanflätning skickar man ut endast en foton. Det kan fungera i elektronikfabrikernas laboratoriemiljö på korta avstånd. Men mätningen tar dagar istället för sekunder som nu. Det blir en avvägning mellan användarvänlighet och ökad precision.

Att skicka ut och ta emot fotoner i det fria är komplicerat. Då är det enklare att pumpa in fotoner i en optisk fiber som i praktiken fungerar som en vägledare.

– Det är mycket svårt att skicka in enstaka fotoner. Det finns inte en liten manick med en knapp att trycka på. Det är ett stort forskningsfält att generera enstaka fotoner. ▷



# Lidar

## – Light detection and ranging

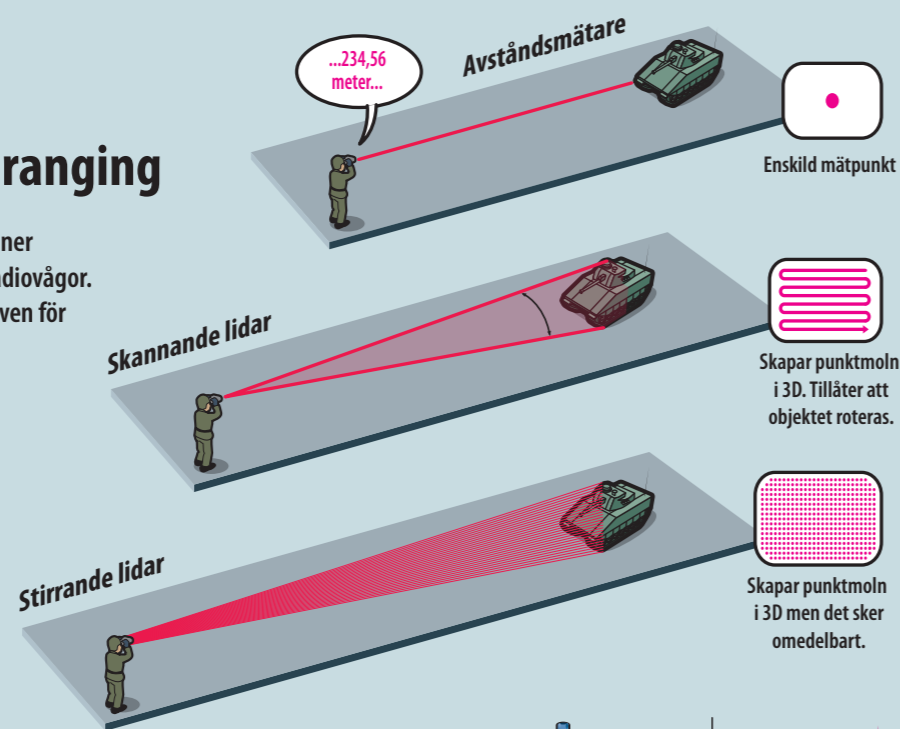
Lidar är ett optiskt mätinstrument som påminner om radar men som använder ljus istället för radiovågor. Det kan användas som avståndsmätare men även för att avbildning eller för att upptäcka andra egenskaper hos avlägsna föremål.

### Många fotoner ut

#### – många fotoner in

Det vanliga är att man skickar stora mängder fotoner med sin lidar mot ett mål och att reflekterande fotoner också fångas upp i stora mängder med den detektor som används.

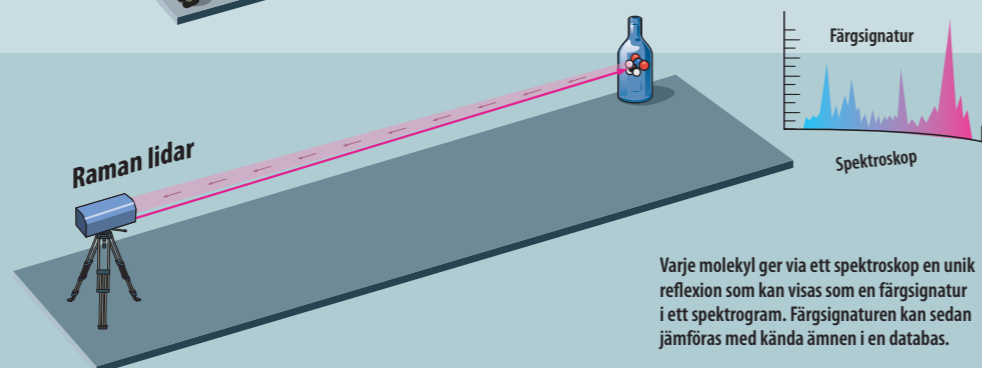
- Mäter avstånd
- Avbildning av fasta föremål, aerosoler mm.



### Många fotoner ut

#### – ramanspridning in

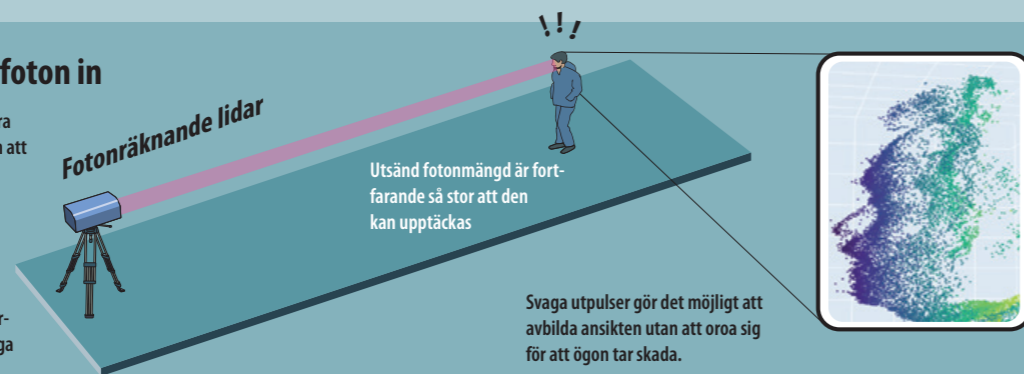
Med laser belyser man ett fast föremål, vätska eller gas. Det mesta av laserljuset sprids åt olika håll men en liten del reflekteras tillbaka till instrumentets sensor och har förändras enligt ramanspridningseffekten.



### Många fotoner ut – en foton in

Även en fotonräkande lidar skickar ut stora mängder fotoner, men bygger på principen att alla reflekterande fotoner har samma information om avstånd och att det därför räcker med att en enda foton kommer tillbaka för en mätning.

Det gör det möjligt att maximera parametrar såsom räckvidd och styrkan på laserpulserna. I princip vill man använda så svaga laserpulser som möjligt.



### En foton ut – en foton in

Här befinner sig lidar-teknologin vid den ultimata kvantgränsen vilket gör att det i praktiken är omöjligt för målet att upptäcka att det blir undersökt.

Problemet är att förluster i atmosfären och i själva reflektionen, ger låg sannolikhet för att signalen når både fram och tillbaka.



Källor: Kungliga Tekniska Högskolan, FMV, FOI, <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>

Man skickar laserpulser och filtrerar och hoppas att få kvar en enstaka foton. En annan väg att gå är att bygga nanostrukturer som påminner om en väteatom. Då har man fått en så kallad kvantprick. Den är som en glödlampa – ljuset strålar åt alla håll. Men hjälp av kvantprickar kan vi i vårt laboratorium skicka enstaka fotoner. Vi har en bra nanostruktur som ger en bra koppling in i en optisk fiber.

### Inte sant men duger bra

I teorin är det omöjligt att dolt avlyssna en optisk fiber. I praktiken är det lite annorlunda. Fibern läcker ljus. En svårighet för den som vill avlyssna informationen är att göra något vettigt av det ljus som läcker ut.

– Vi har en fiberkabel här i Albano till Ericsson i Kista. Det är ett avstånd på sjutton kilometer. Endast 8 procent av kommunikationen försvinner på vägen. Det är ganska lätt att sno enskilda fotoner, men svårare att göra det på ett förutsägbart sätt och kunna skapa informationen.

Då är det relativt enklare om man kan komma åt själva fiberkabeln och utnyttja fenomenet att en fiber som böjs läcker ljus.

– Men då blir den en förlust i fibern och det vill man som avlyssnare inte ha. Då är det bättre att trycka till på fibern på ett litet ställe och få en mikroböjning. Då kan man lätt sno ett par procent av ljuset utan att det blir några märkbara förluster i fibern som avslöjar att någon varit framme.

– För mig är kvantfysik att kunna mäta enskilda fotoner, säger Theodor Staffas. Mina mätningar följer den klassiska fysiken. Jag vill vara säker på att jag inte påverkar mätningen. För att göra bättre mätningar är det enklaste sättet att använda sammanflätning (entanglement). Enligt formeln roten ur två blir det en liten förbättring. Man mäter med en foton och har den andra som referens. Förbättringen är liten och frågan är om det är värt det. Vill man offra tid och användbarhet för att få den lilla förbättringen?

»Det är mycket svårt att skicka in enstaka fotoner. Det finns inte en liten manick med en knapp att trycka på. Det är ett stort forskningsfält att generera enstaka fotoner. Man skickar laserpulser och filtrerar och hoppas att få kvar en enstaka foton.«

För att förstå kvantfysik måste man vara noga med begreppen. En del säger att man måste kunna hitta ett eget kvantspråk och kunna skapa bilder i huvudet. Hur ser det ut i huvudet på Theodor Staffas?

Det är en intressant fråga, säger han och ritat på tavlan.

– Jag har bilden av ljus som studsar fram inne i fibern. Bilden fungerar för det mesta, men jag vet att den inte är sann. När bilden inte räcker till får jag gå till den moderna teorin och föreställa mig ett tvärsnitt av fibern som jag tittar in i och betrakta fibern som en vägledare. Då blir fotonen ett energifält i tunneln och energin en vågrörelse. Fördelen med enkla, om än inte helt sanna, modeller är att de är lättare att lära ut. Jag har undervisat gymnasister i kvantfysik och då duger den enkla bilden bra.

### Korridorer av obegripligheter

Att gå omkring på lärosäten som KTH, Chalmers och Lund är som en vandring mellan formler. Tavlor i korridorer fulla med obegripligheter. Långt från Einsteins enkla ekvation som förändrade världen. I rummet där vi träffar Theodor Staffas finns naturligtvis också en tavla med obegripliga formler. Här behöver man inte skämmas för sin okunnighet.

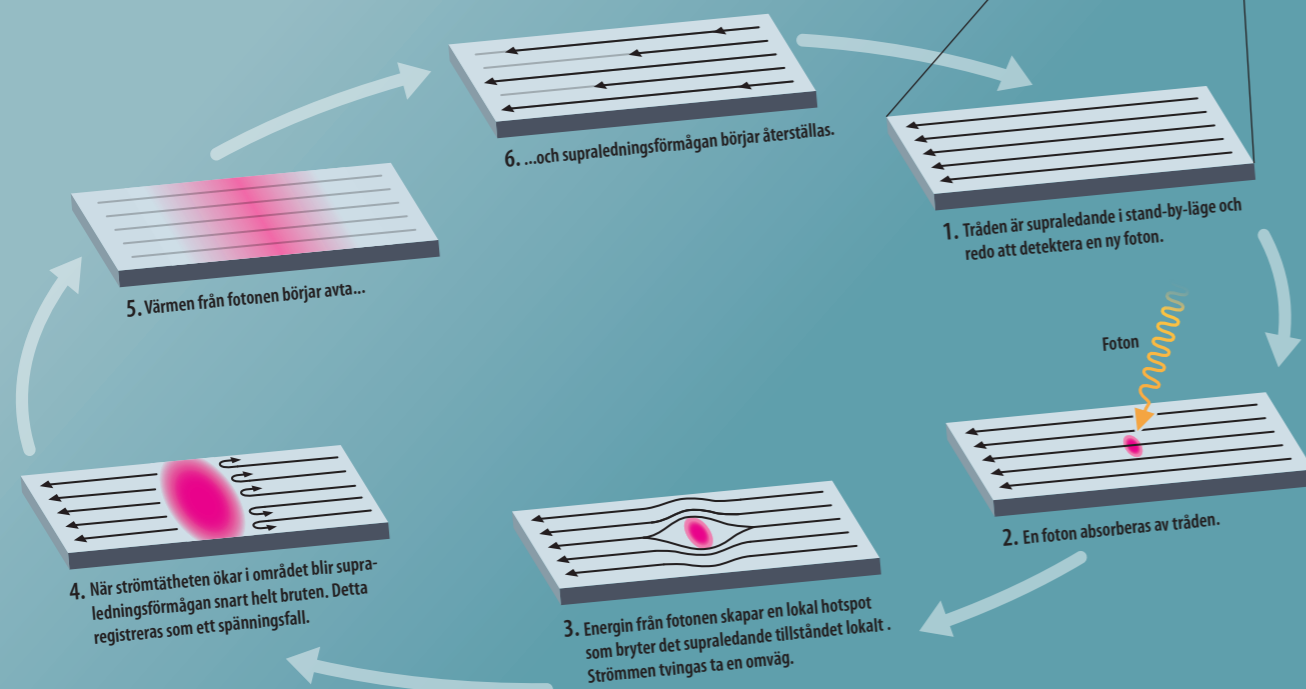
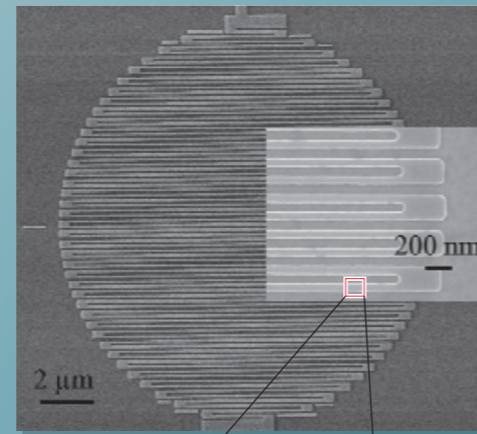
– Jag har inte den blekaste aning som vad som står på tavlan, säger Theodor Staffas. Dessutom är jag ▷



# Enfotonsdetektorn

Det finns flera typer av enfotonsdetektorer. Den som används på KTH och idag anses effektivast är av typen SNSPD (Superconducting nanowire single-photon detector). Enkelt uttryckt är en SNSPD en strömförspänd supraledande tråd som parallellkopplas mot en avläsningskrets.

När en foton träffar pixeln bryts den supraledande förmågan i tråden och fotonen registreras av avläsningskretsen.



Källor: Gol'tsman et al, Nature, Kungliga Tekniska Högskolan, [https://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting\\_nanowire\\_single-photon\\_detector](https://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_nanowire_single-photon_detector)



jättedålig på huvudräkning. Det kommer jag aldrig att bli bra på.

– De formler jag använder mycket har jag i huvudet. När jag börjar med ett nytt projekt är det en tung start. Det är nya formler och ny matte. Det blir som en dimma som långsamt lättar. Jag har formeln bredvid mig utan att fatta den helt. Med hjälp av teori och laborieförsök skingras sakta dimman och jag kommer till en punkt där jag arbetar med ekvationen och inte mot den.

Forskningen kan skildras som

att geniet kommer på något och förändrar världen. Eller att slumpen spelar in. Några prov glöms kvar över natten i ett laboratorium och ger världen antibiotika. Den sannaste och tråkigaste skildringen av forskningen är mödosamt arbete. Vägen till framgång är kantad med misslyckanden. Eller kan forskaren vakna mitt i natten med känslan av att ha kommit på något viktigt i sömnen?

– Jo, det har hänt mig många gånger. Oftast visar det sig att det inte fungerar i verkligheten. Jogging-

spåret kan vara en kreativ miljö. Där fick jag faktiskt en idé om att plotta data så att det blir mer överskådligt.

Theodor Staffas är i början av sin forskarkarriär. Det är knappast djärvt att anta att synen på kvantfysik har förändrats när han avslutar sin karriär.

– Med reservation för att teori inte är mitt specialområde tror jag ändå att gränsen mellan fakta och intuition kommer att förskjutas. Det kommer nya resultat som ger oss en bättre förståelse av vad kvantfysiken är. □

»De formler jag använder mycket har jag i huvudet. När jag börjar med ett nytt projekt är det en tung start. Det är nya formler och ny matte. Det blir som en dimma som långsamt lättar.«



# PÅ SPANING EFTER FRAMTIDA TEKNIK BAKOM HORIZONTEN

**Robert Jonsson arbetar vid Saab Surveillance i Kallebäck i Göteborg. Han spanar på teknik- och metodutveckling på lång sikt som kan användas för radar. Kvantradar såg ut som en teknologi som kanske hade framtiden för sig och sedan 2019 är Robert Jonsson så kallad industridoktorand vid Chalmers.**

**M**in grundutbildning handlade mycket om kvantfysik så när chansen dök upp för en doktorandtjänst så passade det väldigt bra. Jag skulle arbeta med teorin och matematiken och den andra doktoranden, Martin Ankel skulle göra experimenten.

Kvantfysik kan få stor betydelse för försvarstillämpningar, särskilt för sensorer. Men någon speciell kvantsatsning görs inte vid Saab.

– Kvantavdelningen är nog jag, säger Robert Jonsson. Men man börjar nog få upp intresset för att det här är något man måste hålla koll på. Saab har ju inte heller någon särskild avdelning för artificiell intelligens, AI, men det är också ett område som man följer noga. Framtidens försvar kommer att bli ännu mer uppkopplat. Enorma mängder hemlig information skyfflas fram och tillbaka i nätverk. Hur säkrar man länkar i ett uppkopplat försvar? Kan kvantteknik användas för att knäcka krypton?

**Wallenbergs kvantsatsning**  
Forskarprojektet är en del av Wallenbergstiftelsens kvantsatsning. Det som forskare kallar kvantradar skiljer sig mycket från en vanlig radar och det finns ett glapp mellan ▷



radaringenjörer och kvantforskare.

– Man talar inte riktigt samma språk. Det är en ambition med min forskning att minska det glappet, säger Robert Jonsson.

Det är ett par händelser som drivit på intresset för kvantradar.

– 2015 kom kinesiska publikationer om en kvantradar. Det fanns ingen teori om hur man gjort, men när Kina hävdar att man har en kvantradar som ser smygsmål på tio mils avstånd så rycker det i mustaschen på somliga. Men man kan ifrågasätta hur mycket kvant det är i den kinesiska kvantradar.

– 2018 och 2019 kom forskningsrapporter från Österrike och Kanada om kvantradarexperiment. För att få bort brus från värmestrålning måste fotonkällan som genererar sammanflätade fotonpar kylas ned. Forskarna hade visat att om man kylde ned fotonkällan och förstärkte signalen kunde man skicka fotonerna i rumstemperatur utan förluster. Det var det som var en av anledningarna till att vi startade projektet, nämligen att man påvisat att man kunde få ut mer radarprestanda än med traditionell radar. Experimenten blev mycket uppmärksammade i radarforskningsvärlden. Och det skrevs en del saker som nog inte var så ärliga.

– Så det blev höga förväntningar, en hajp om man så vill. Här fanns teoretikerna och praktikerna. Kvantradar täcker hela bredden.

– En kvantradar skickar ut fotoner. När effekten blir tillräckligt liten är det relevant att tala om enskilda fotoner. Det är kruxet, för att få kvanteffekterna relevanta måste man tala om ett fåtal fotoner. För en vanlig radar handlar om miljarder fotoner.

– Det är min åsikt att det inte går att göra en användbar kvantradar. För att få kvanteffekt kan man bara skicka några få fotoner. Vill man ha en fungerande radar är det nog bättre att skicka miljarder fotoner och använda en klassisk signal. Man måste tänka sig ett koncept där man bara får skicka några få fotoner. Ett argument för detta skulle vara att man vill ha en smyggradar.

– Vad är det för ett scenario där man har användning för få fotoner? Det är inte uppenbart. Man kan få räckvidd

*»Så slutsatsen är att det är mycket svårt att bygga en kvantradar som är bättre än en vanlig radar.«*

på som bäst 100 meter.

– De som jobbar med teorin tittar på informationsinnehållet per foton. Då fungerar kvantmekaniken. Men en radar måste ha högre effekt. Då är en vanlig radar bättre, säger Robert Jonsson.

– En radar idag jobbar med gigahertz. Våra ögon är känsliga för synligt ljus. Vi kan nästan detektera enskilda fotoner. Det har att göra med att energin i en foton är relaterad till frekvensen. Det är lättare att trigga en elektrisk ström med en foton i synligt ljus än på mikrovågsområdet.

– En vanlig radar skickar ut mycket effekt och får tillbaka lite, men det räcker. En kvantradar har en källa och två signaler som är sammanflätade. En foton är energi, som en våg på vattnet. Signalerna är korrelerade. Korrelationen är kruxet. En detektor i en vanlig radar mäter spänning. Är signalen för svag går den inte över tröskeln. Man kan sänka tröskeln genom att minska brus.

#### **Svårt att bygga en kvantradar**

Så slutsatsen är att det är mycket svårt att bygga en kvantradar som är bättre än en vanlig radar.

Det finns ett protokoll från den amerikanska försvarsforskningsorganisationen Darpa om förklarar principerna för en kvantradar.



*»Det gäller också för forskningen att väcka användarnas intresse. 1904 visade tyska forskare upp radarteknik i Köln. Men den kejsarliga marinen var inte intresserad.«*

– I min avhandling ska jag fortsätta att titta på protokollen som är vetenskapligt intressanta. Jag forskar fortfarande på frågorna om kvantradar, men har nu svängt bort en del från att göra ett fullständigt radarsystem. Omkringliggande tekniker förbättras även om tillämpningen inte fungerar. Det går att låna in en del från kvantvärlden för att göra vanlig radar, till exempel med höga datataktar.

– Var går den absoluta gränsen för hur noga man kan mäta ljuset? Då behövs kvant. Det är dessa frågeställningar som jag jobbar med i min avhandling. Jag tittar mer på hur man mäter med mikrovågor och ljus och sådana saker och har breddat avhandlingen till att studera mer än själva radartillämpningen.

#### **Den tyska marinens blunder**

Lyckas det här med kvant så öppnas en ny värld säger en del. Robert Jonsson tror mest på kvantsensorer, att kunna mäta bättre.

– Kvantteknik är nödvändig för att bättre kunna mäta magnetfält. Det skulle göra det något lättare att upptäcka ubåtar. Jag ser kvantteknik i första hand som ett fantastiskt verktyg för mätningar. Det dröjer innan vi kan göra kvantprodukter. En viktig fråga om ett kvantgenombrott hänger naturligtvis samman med om kvantdatorn blir verklighet. I dag är det svårt att räkna på molekyler och kemiska processer. Kan vi låta en kvantdator lösa sådana kvantmekaniska problem öppnas nya vägar.

– Det är svårt när man sitter mitt i det att se vilka spår kvanttekniken kommer att ta. Jag tror säkert att en hel del kommer att vara relevant. Svårt att säga vad det blir. Det gäller också för forskningen att väcka användarnas intresse. 1904 visade tyska forskare upp radarteknik i Köln. Men den kejsarliga marinen var inte intresserad. □





# KVANT I NATUREN NYTT FORSKNINGSFÄLT

**Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI har ingen forskning på kvantfysik. Däremot har området bevakats i många år. En som arbetar med detta är Charlotta Bengtson, till vardags på FOIs avdelning för försvarsteknik där hon arbetar på enheten Autonomi och modellförvaltning.**

**P**er Jonsson har bevakat områdets betydelse för försvaret i många år och säger att det känns som man kommer närmare verkligheten.

– Men vi är inte där än. Det är svårt utnyttja sammanflätning för avståndsdetektion. Temperaturskillnader och störningar från elektromagnetiska fält är hinder som måste isoleras. Klassiska metoder har sina begränsningar som till exempel att mäta gravitationsfält. Med kvantsensorer finns nya möjligheter som att använda gravitationsfält som kartor. Det som är mest spännande och kan vara revolutionerande är att koppla ihop sensorer. Då skulle man vinna mycket som inte kan göras idag. Det går att göra i liten skala i labb, svårigheten är koppla ihop hundra sensorer och behålla sammanflätningen.

– Först ville jag bli kosmolog, säger

Charlotta Bengtson men jag disputerade istället 2018 i ämnet kvantinformationsteori. Så man kanske kan säga att jag är en kvantdoktor. Jag har länge varit intresserad av kvanteffekter i naturen. 2007 visade forskare som studerade fotosyntesen att en sammanflätning överlevde i rumstemperatur i komplexa system. Hur kunde naturen behålla kvantrelationer när det är så svårt att göra detta i laboratorium?

– Hur kunde fotosyntesen omvandla energi så effektivt jämfört till exempel med solceller? Så föddes ett nytt forskningsfält – kvanteffekter i biologiska system. Här möts kvantforskare, biokemister och andra. Jag gillar tvärvetenskapen och att träffa människor med olika bakgrund. En fråga är om vi skulle komma närmare naturens gåtor med hjälp av kvantfysik? Bins luktsinne kan vara ett resultat av kvanteffekter. Fåglars förmåga att navigera efter jordens magnetfält kopplas också ihop med kvanteffekter.

– Efter doktorsexamen var ambitionen att fortsätta på universitet och jag fick rådet att bredda mig och byta ämne och kom till Antwerpen. Där studerade jag mekanismer bakom hur ett fysikaliskt plasma kunde användas för cancerbehandling. Jag fick testa olika förklaringsmodeller. Det handlade om beräkningsfysik i komplexa system. Hade jag gått vidare inom universitetsvärlden hade det blivit ett par år till utomlands och då kände jag att nu fick det nog vara nog.

– Jag kommer från Uppsala och hade haft lite span på FOI. I september har jag varit här i två år.

Den naturintresserade Charlotta Bengtson har med sig ett påtagligt minne från tiden i Antwerpen som ligger på gränsen till Nederländerna. Hästen Dapper, som betyder modig på nederländska.

– Jag har alltid varit intresserad av hästar och det är något speciellt med Frieserhästar som härstammar från och föds upp i Nederländerna. Dit kunde jag åka med lokalbussen och när jag träffade Dapper så sa det bara klick från båda håll och nu är Dapper i Sverige. □



# FILOSOFENS VÄG TILL ATT FÖRSTÅ KVANTFYSIKEN

Den som påstår sig förstå kvantfysik avslöjar sin okunskap i ämnet. Det hävdade den amerikanske Nobelpristagaren och teoretiska fysikern Richard Feynman. Han hade fel, säger filosofen Lars-Göran Johansson. Det gäller att hålla ordning på ord och begrepp och vara uppmärksam på sina omedvetna föreställningar.



**L**ars-Göran Johansson är nu pensionerad från Uppsala universitet, men filosof är han naturligtvis fortfarande. **Vad gör ni filosofer när ni forskar? Sitter ni bara i fåtöljen och tänker.**

– Ja, så är det. Vi läser, skriver och tänker och är mycket ofta oense med andra filosofer. Det är själva poängen och det som leder framåt.

Lars-Göran Johanssons väg till färdig filosof har varit krokig och mödosam.

– Jag är bondpojke från Västgötsläkten och den förste i min släkt som gick mer än sex år i skolan. När jag gick i gymnasiet fick jag tag på två små filosofiböcker av Bertrand Russell på Stifts- och Landsbiblioteket

i Skara. Det var underbart. Jag blev uppslukad. Men att ha filosofi som yrke kunde jag inte föreställa mig. Det fanns på den tiden, 1966, fyra anställda filosofer i landet. För den som kommer från en bondfamilj är det inte tal om att ta lätt på pengar och försörjning, så jag utbildade mig till adjunkt i matematik och fysik. Det var jag sedan i tjugo år. På kvällarna, när barnen somnat, tog jag fram filosofiböckerna och efter drygt tio års doktorandstudier, varav merparten på fritid, disputerade jag 1993. Ämnet var hur man ska förstå kvantmekaniken, som är en filosofisk fråga.

Det var kanske lättare sagt än gjort. Fyra dagar före den planerade disputationen upptäcktes ett fel, upplagan makulerades och Lars-Göran Johansson använde sommaren till

att rätta till en visuell modell om så kallat spinn.

## **Professor i teoretisk fysik**

Efter två år dök det upp en tjänst som lektor i filosofi vid Linköping och sedan vid universitetet i Uppsala där han blev i många år innan han pensionerades som professor i teoretisk filosofi.

Lars-Göran Johansson leder oss in på en resa in i kvantmekaniken. Som en "pojke från slätten" hämtar han sina bilder från jordbruket. Det blir också en lektion i hur man dricker öl. Samt en påminnelse om att vi alla är ett resultat av kvantmekaniska växelverningar.

– Strålningen från universum påverkar våra celler. Det är en växelverkan mellan strålning och ▸



# Att tolka kvantfysik

Världen uppför sig konstigt och ickeintuitivt på kvantnivå. Att kvantpartiklar kan beskrivas med hjälp av vågfunktioner är något alla uttolkare av kvantfysiken är överens om. Frågan är framför allt hur man skall tolka vågfunktionens kollaps vid mätningar. Det har lett till flera olika förklaringsmodeller om hur kvantfysiken förhåller sig till den fysiska verkligheten. Här redovisas två ledande tolkningar.

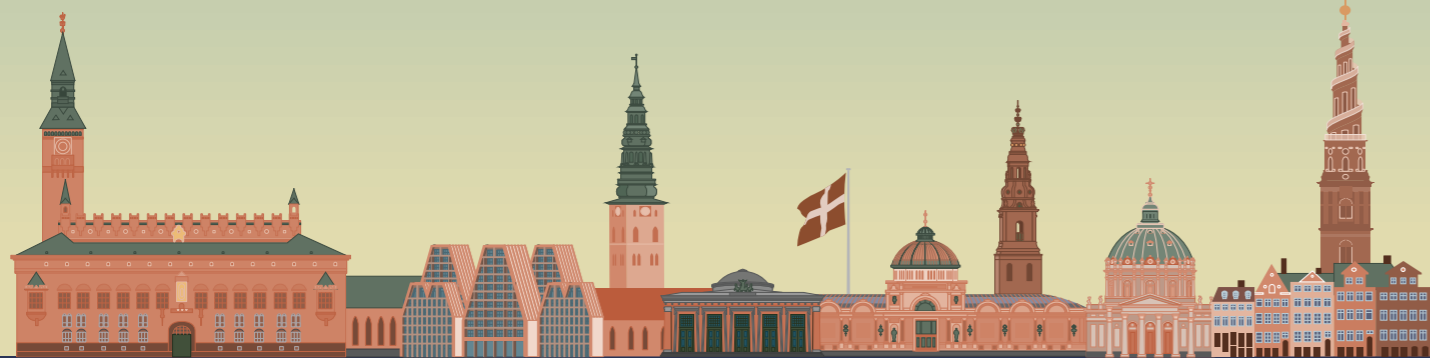
## Köpenhamnstolkningen

Är egentligen ett samlingsnamn för flera olika tolkningar av kvantmekaniken som växte fram under 1920- och 1930-talen. Bland grundsgestalterna märks Niels Bohr och Werner Heisenberg som båda på olika sätt var kopplade till institutet för teoretisk fysik, i den stad som givit tolkningen dess namn.

### Mätningar lokaliserar

De olika grunderna inom Köpenhamnstolkningen har vissa skillnader men tolkningen har också viktiga gemensamma drag. Framför allt är det observationen, eller mätningen som spelar en central roll.

När en mätning görs så kollapsar kvantsystemet från att vara utspridd i rummet som en vågfunktion – till ett specifikt, lokaliserat tillstånd som kan observeras. Det innebär också att man inte kan säga något om ett kvantmekaniskt systems position innan mätningen.



Källa: Lars-Göran Johansson - emeritus professor i teoretisk fysik vid Uppsala Universitet, [https://en.wikipedia.org/wiki/Interpretations\\_of\\_quantum\\_mechanics](https://en.wikipedia.org/wiki/Interpretations_of_quantum_mechanics)

## Flervärldstolkningen

På 1950-talet utvecklade fysikern Hugh Everett en alternativ teori om hur kvantmekaniken förhåller sig till den fysiska verkligheten. Den kallas flervärldstolkningen eller många världar-tolkningen.

Precis som Köpenhamnstolkningen beskriver flervärldstolkningen kvantpartiklar som vågfunktioner. Skillnaden är att flervärldstolkningen hävdar att vågfunktionen är objektivt verklig och att det därför inte finns någon vågfunktionskollaps. Det som händer vid en mätning är istället att varje tänkbar utfall realiserar.

### Mätningar skapar nya världar

Flervärldstolkningen ser alltså tiden som ett månggrenat träd, där alla möjliga utfall realiserar, varvid varje sådant utfall existerar i ett eget universum skilt från alla de andra universa och det finns ingen förbindelse mellan dem.



### Kvantsik eller kvantfilosofi?

Utöver dessa två tolkningar finns många andra alternativa tolkningar som exempelvis Dolda variabler, QBism, Kvantdarwinism med flera. Problemet är att det ännu inte finns några experiment som kan bevisa om hurvida den ena tolkningen är mer korrekt än den andra. Det gör att vilken tolkning man väljer till en del blir filosofisk fråga.

molekylerna i våra celler och det ger upphov till mutationer, som trots att de i de flesta fall är negativa, man kan till exempel få cancer, är en förutsättning för evolutionen, säger han. Varje sådan växelverkan är en kvantmekanisk tillståndsändring.

### Kvanta och öslurkar

Upptäckten av kvantmekaniska fenomen började med Max Planck år 1900. Termodynamiken var vid förra sekelskiftet rätt så bra utforskad, och teorin för elektromagnetism var känd. Men hur växelverkar elektromagnetisk strålning med materien? Svensken Janne Rydberg hade 1888 upptäckt att strålningen från vätgas som upphettas består av fyra linjer i spektrum, men han kunde inte förklara varför det just blev fyra linjer. Max Planck härledde år 1900 en formel, Plancks lag, som grundas på att växelverkan mellan materia och elektromagnetisk strålning sker i bestämda portioner, kvanta, det vi nu kallar fotoner. Plancks lag visade sig stämma med alla observationer. Antagandet att växelverkan sker i bestämda kvanta är det revolutionerande nya.

– Fotoner är alltså portioner av strålningsenergi. En varm kokplatta utstrålar strålning, rött ljus, som vi normalt tänker oss som en kontinuerlig vågrörelse. Men utstrålningen sker i odelbara portioner, kvanta. Därför kallas teorin kvantmekanik. Men dessa portioner är så små så att varken i vardagslivet eller i många beräkningar i fysik och kemi behöver vi ta hänsyn till att växelverkan sker i diskreta portioner. Vi kan i de flesta fall räkna som om utstrålningen är en kontinuerlig process. Men om dessa kvanta vore mycket större än de är skulle världen te sig helt annorlunda.

– Jag brukar för studenter göra tankeexperimentet att öl endast kan inmundigas i portioner om fyra centiliter, varken mer eller mindre, som exempel på kvantifiering. Man kan dricka fyra eller åtta centiliter, men inte sex. Om man skulle försöka få i sig en liten klunk, mindre än fyra cen-

»Jag brukar för studenter göra tankeexperimentet att öl endast kan inmundigas i portioner om fyra centiliter, som ett exempel på kvantifiering.«

tiliter blir det inget alls. Så fungerar det i mikrofysiken.

– Men dessa minsta portioner är inga partiklar. I skolan presenteras Nils Bohrs atommodell med elektroner som likt planeter snurrar runt sin sol, kärnan. Men elektronerna är inga partiklar som rör sig i banor runt kärnan och det hävdade inte Bohr.

– Bohr postulerade att atomer befinner sig i stationära tillstånd, det vill säga att de inte ändrar energi annat än genom utsändning eller absorption av energikvanta. Men det följer inte att elektronerna rör sig i en bana med en bestämd hastighet i varje tidpunkt. Ett sådant antagande kombinerat med att elektronernas energi i sin bana är konstant strider emot de grundläggande lagarna i elektromagnetismen. Slutsatsen är att elektronerna inte är partiklar som rör sig banor runt kärnan. Elektronernas energi är svängningsenergi och elektronen är ett elektromagnetiskt fält som svänger.

– Detta är kärnpunkten. Svårigheterna att förstå kvantmekanik bygger på att vi felaktigt antar att materiens beståndsdelar är partiklar, avgränsade från varandra. Det går inte ihop. Men en sammanhängande tolkning av kvantmekaniken kan göras om vi stället tänker oss att den fysiska verkligheten består av olika slags fält. Detta är grundtanken i kvantfältteori som är den relativistiska versionen av kvantfysiken.

– Jag som är bondpojke tänker på ett fält som ett havrefält. Ett fält är något som är utspritt i tiden och rummet. Varje punkt i ett havrefält har ett visst värde på olika variabler. Den viktigaste för bonden är förstas

havredensiteten. Likadant är det med ett elektronfält, det definieras av värdet på en viss kvantitet, nämligen sannolikheten för växelverkan, i varje punkt i fältet. Att det är ett fält och inte en ansamling isolerade beståndsdelar innebär att om man gör något, det vill säga växelverkar med fältet på ett visst ställe, så är det en växelverkan med hela fältet.

– Ett fält upptar eller avger energi i kvanta, det vill säga portioner av energi. Och där har vi de fyra centilitrarna öl igen. Vi kan tala om samma mängd öl, men frågan om det är samma öl som en annan lika stor mängd har ingen mening. Likadant med kaffe och andra vätskor. Om jag håller upp en kopp kaffe och sedan håller tillbaka kaffet i koppen till kannan går det inte att meningsfullt ställa frågan om det är samma kaffe. Man kan inte märka kaffe-partiklarna – eller vattenmolekylerna – med något och följa varje partikels bana i kannan eller kaffekoppen. Och det är inte enbart en praktisk begränsning utan en fråga om vad som krävs för att tala om samma partikel, det går inte att tillämpa begreppet om samma sak i sådana fall.

– Ett visst fält kan växelverka med omgivningen – som är andra fält – mer än en gång, ifall energin räcker för fler växelverkningar, och dessa växelverkningar kan ske på olika ställen, till exempel med två olika mätapparater. Då kommer vi in på svåra saker som spinn. Det sägs att två elektroner i samma system kan vara sammanflätade genom att de alltid har motsatta spinn. Ordet sammanflätning är dock missvisande. Det indikerar att två saker är >



»Att vara filosofiskt lag innebär bland annat att reflektera över sina tysta antaganden och villkoren för att för att använda vardagliga begrepp i sitt tänkande.«



sammanflätade – vilket är fel. Det som finns är ett fält som kan växelverka på två ställen med två andra fält på olika ställen. Fältet är utsträckta men de består inte av beståndsdelar som går att skilja åt – alltså finns det inget i fälten som kan man tillskriva någon transporthastighet och inga "saker" som kan vara sammanflätade.

### Filosofi och kvantmekanik

Lars-Göran Johansson säger att det underlättar om man är filosofiskt lagd när man ska försöka förstå kvantmekaniken. Att vara filosofiskt lagd innebär bland annat att reflektera över sina tysta antaganden och villkoren för att att använda vardagliga begrepp i sitt tänkande.

– En filosof måste vara på sin vakt. Vilka oreflekterade antaganden har jag gjort när jag tänker på ett visst fenomen? Vad är det jag oreflekterat antar när jag använder ett visst ord? Förståelse av ett nytt fenomen hänger på anpassningen mellan förutfattade meningar och beskrivningar av det nya fenomenet.

– Men det är sällan möjligt att helt ställa sig utanför sitt sätt att tänka. Reflektion över sina egna antaganden är aldrig en helt avslutad process. För fysiker är det här oftast inget problem. De vet vilka begränsningar som gäller för de fysikaliska orden, det är deras språk. Att lära sig kvantmekanikens språk är ungefär som att lära sig ett främmande språk genom att leva i landet där språket talas. Man lär sig språket genom att interagera med de som bor där. Det är samma sak med kvantfysiken. De som är intresserade av tolkningsproblemen är främst filosofer och en del teoretiska fysiker. Men andra bryr sig inte. De räknar och om de teoretiska förutsägelse bekräftas av experimentresultat, så är de nöjda.

### Begreppen

Kvantfysiken vimlar av begrepp. Lars-Göran Johansson pekar ut en källa till förvirring, sammanblandningen av osäkerhet och obestämdhet.

– Det är inte samma sak. Polisens lasermätare har en viss osäkerhet i resultatet. Men det är inte fråga om att bilen inte har rört sig med en viss bestämd hastighet i mätögonblicket. Dock är mätningen något osäker.

– Men om vi reflekterar över hur man mäter en vågs position eller hastighet så framträder en skillnad. Var exakt är en våg i ett visst ögonblick? Och när vågen rör sig, hur ska man mäta hastigheten om den inte har ett visst bestämt läge i varje ögonblick? I klassisk fysik kan man för alla praktiska ändamål tala om till exempel en havsvågs hastighet genom att man kan observera vågtoppen som är måttligt utsträckt.

– Men om det är en vågrörelse i ett kvantmekaniskt fält så kommer en mätning av dess position att ske på en bestämd plats, trots att vågen är utbredd. Denna mätning kan inte fixeras vid vågens topp eller på någon annan del. Det är en slumpmässig spridning var denna växelverkan sker. Varje mätning är en växelverkan som sker på en bestämd tid och plats. Det är inte så att vi inte riktigt vet var vågen är, det är mer korrekt att säga att dess plats är obestämd. Slumpen beror inte på hur noga vi kan mäta. Slumpen är genuin.

### Schrödingers katt

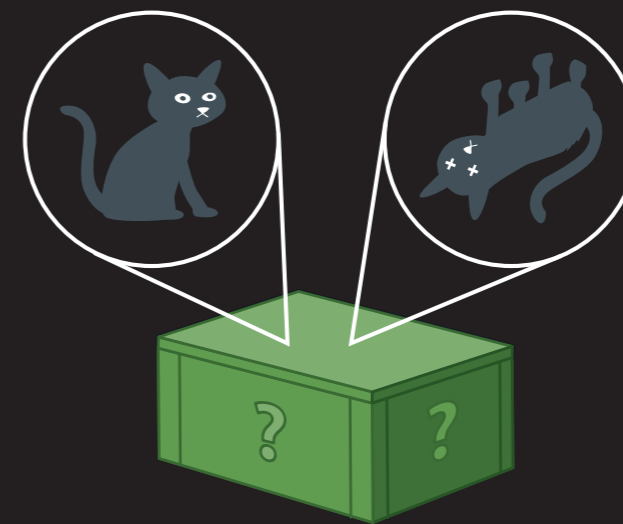
– Erwin Schrödinger ville med tankeexperimentet "katten i lådan" visa att kvantmekaniken inte är giltig för makroskopiska föremål som katter. Den anordning som kunde döda katten var kvantmekanisk det vill säga man beskriver anordningen som en

## Schrödingers katt

Schrödingers omtalade tankeexperiment avseende kvanttillstånd går ut på att en katt och en giftflaska placeras i en förseglad låda. I lådan finns också en bit radioaktivt ämne med 50 % sannolikhet att sönderfalla inom en timme, samt en geigermätare kopplad till en hammare som krossar giftflaskan om sönderfall registreras, vilket i sin tur skulle döda katten.

Så länge man inte observerar katten befinner den sig enligt ett kvantmekaniskt synsätt i en superposition av att vara både levande och död. När man öppnar lådan och gör en observation kollapsar vågfunktionen och katten intar ett tillstånd av antingen levande eller död.

Tankeexperimentet utarbetades av Schrödinger under en diskussion med Albert Einstein för att illustrera att kvantmekanik inte är giltig för makroskopiska föremål – som exempelvis en katt.



superposition av två tillstånd, kopplade till kattens två möjliga tillstånd av att vara död eller levande. Men en beskrivning av katten som en superposition av död och levande är absurd, så det är enligt Schrödinger fel att dra slutsatsen att kvantmekaniken gäller för makroskopiska tillstånd.

– Jag anser mig ha löst mätproblemet – kruxet är bara att övertyga alla de som uppfattar kvantmekaniken som problematisk.

– Rum och tid är former för vårt åskådande och orsak och verkan är ett centralt begrepp i vår förståelse av den upplevda världen. Enligt filosofen Kant gäller dessa villkor för all kunskap om yttervärlden. Och modern psykologi ger honom delvis rätt i detta. Dessa begrepp är centrala när barn lär sig tänka och tala. Det är att vårt sätt att betrakta världen och det sitter så djupt att vi har svårt

att släppa det. Därför blir det svårt att förstå kvantmekaniken. Vi tänker med begrepp från vardagsspråket.

### Klassisk fysik och kvantfysik

Var drar man, i praktiska tillämpningar, gränsen mellan kvantmekanik och klassisk elektromagnetism, frågar Lars-Göran Johansson. När är man i praktiken tvungen att använda kvantmekaniska beräkningar? Och när kan man nöja sig med klassisk fysik? Svaret bestäms av hur stora växelverknings är mellan system som man studerar. Om energiutbytet är mycket litet, någon eller några portioner energi, energikvanta, blir det kvantmekanik. **Kan det dyka upp en ny Einstein?**

– Det kan det säkert. Det finns många mysterier kvar. Ett exempel är mörk materia i universum, vilket man inte har fått att gå ihop med den övergripande teorin, den så kallade standardmodellen. En annan

sak är att många fysiker tycker det är otillfredsställande att vi har två stora teorier, kvantteorin och allmänna relativitetsteorin när det borde räcka med en som förklarar allt. Detta är strängteorins mål, men det verkar svårt. Hittills har man inte kunnat härleda några testbara konsekvenser av strängteori.

### En ny värld

Lars-Göran Johansson säger att ur ett mänskligt perspektiv kan ett förverkligande av kvantdatorn vara en revolution men teoretiskt principiellt är det inte det.

– Visst kan en kvantdator lösa problem som vi inte kan klara idag som till exempel att beskriva stora molekylers dynamik. Men man kan komma långt med kvantmekanisk tänkande innan man går in i kemilabbet. Man får forska som en filosof. Sitta i fåtöljen och tänka. □



# KVANT PÅ VÄG ATT BLI DEL AV VARDAGEN

**Kvant är komplicerat att förstå och det är få som vet vad det handlar om. Så mognar det och det som man förut betraktade som svårt att begripa sitter i väggarna. Det kommer att gå samma väg med kvant, säger Tove Jaensson som har ett förflutet i telekombranschen och som har följt teknikutvecklingen under lång tid. Tillsammans med Ulf Öhlander handlägger hon kvantteknikprojekt vid Vinnova.**

Innovationer är Vinnovas värld. Men vad är en innovation? Tove Jaensson säger att det är ett nytt sätt att använda känd kunskap på. En innovation kan vara olika saker som till exempel produkter, tekniker och metoder.

– Vinnova finansierar ofta samarbetsprojekt, det vill säga samarbeten mellan företag, stora som små, lärosäten och forskningsinstitut, säger Tove Jaensson. Än så länge saknar vi flera av de stora svenska företagen. Det är fortfarande i ett tidigt utvecklingsstadium, men intresse finns, inte minst från dem som vill utveckla säkra kommunikationer.

Insatserna inom kvant ligger under det område som handlar om den digitala omställningen av samhället. Det finns inte några örönmärkta medel för kvantsatsningar.

Tove Jaensson är övertygad om att kvant kommer att spela en stor roll i framtiden.

– Man kan jämföra kvant och artificiell intelligens, AI. Det är två teknologier som ger mervärde och som har potential att förändra samhällen. Nu har AI tagit steget från att vara ett forskningsområde till att ha blivit accepterat som en viktig tillämpad teknologi. Jag är övertygad om att kvant kommer att gå samma väg, säger Tove Jaensson.

## Nationell målsättning

I en rapport som kom ut i mars 2023 pekar Vinnova tillsammans med andra aktörer på att vi är mitt i en teknisk revolution – den andra kvantrevolutionen. Kvantdatorer är under utveckling, bland annat en på Chalmers och man talar om avlyssningsäker kommunikation och mycket känsliga mätinstrument som några exempel. Med kvantteknologi hoppas forskarna kunna göra beräkningar som idag är omöjliga. Kvantteknologin brukar delas in i grupperna kvantdatorer, kvantsimulering, kvantkommunikation och kvantsensorer.

– När vi nu befinner oss i den andra kvantrevolutionen och ser vilka möjligheter som finns så behövs en nationell målsättning, säger Tove Jaensson. Vilken

plats ska Sverige ha i kvantvärlden? Svensk kvantforskning är stark idag, men konkurrensen är hård. Hittills har kvantforskningen i Sverige till största delen finansierats med privata medel och då är det Knut och Alice Wallenberg-stiftelsen som är den i särklass största aktören. Det är en tolvårig satsning, men vem tar över sedan?

Det satsas stora pengar i världen på kvantforskning. EU har ett tioårigt projekt som löper ut 2028. Kostnaden är en miljard euro. Frankrike, Storbritannien, Tyskland och Nederländerna har nationella program som är ännu större. Över hela världen satsas det på kvant och inte minst av de amerikanska teknikjättarna.

Men den bilden är inte enbart ljus. Ulf Öhlander pekar på att pandemin, kriget i Ukraina och en allmän tendens att länder i spåren av dessa händelser och det allmänt försämrade världspolitiska läget drar sig tillbaka. Det går ut över globala forskningssamarbeten, tillgången på riskkapital och internationella samarbeten..

Ulf Öhlander säger att man inte får slå av på takten och tro att någon annan ska föra forskningen framåt.

– Att stå stilla i dagens konkurrens är samma sak som att hamna på efterkälken, säger han.

## Forskningsmagneter

Ett populärt begrepp i forskarvärlden är stickiness, klibbighet. Med det menas att vissa länder och lärosäten har förmågan att dra till sig de bästa forskarna. Med det följer den bästa forskningen och de bästa utbildningarna. Sverige är ett av de elva länder som USA har ett kvantsamarbete med. Förmågan att vara en magnet kan vinnas, men också förloras och Ulf Öhlander ser en risk att Sverige kan tappa sin position på sikt.

– Det råder en hård konkurrens om de bästa kvantforskarna och det kan bli allt svårare för Sverige att locka utländska doktorander.

I rapporten "En svensk kvantagenda" pekas på vikten av en attraktiv miljö för forskare på olika nivåer. Vinnova och andra beskriver också vägen framåt. Vad som behöver göras för att stärka Sveriges roll på kvantområdet är bland annat:

- Nationell målsättning. Sverige behöver en strategi för att beskriva vilken position Sverige avser att inta i globala forsknings- och innovationskedjor, och vilka resurser och åtgärder som behövs för att uppfylla dessa mål.
- Utbildning. Det behövs utbildning i kvantteknologi på alla nivåer från grundskolan och uppåt. Kvantteknologin ska vara en självklar del i ett livslångt lärande. Skräddarsydda utbildningar ska finnas inom offentligt sektor och näringsliv.
- Statlig finansiering.

I forskarvärlden bildas kluster. Det kan vara lärosäten, företag eller länder som samarbetar. De nordiska länderna är och har varit framstående på kvantområdet. Dansken Nils Bohr skapade modellen av atomen och är en av historiens största kvantforskare. Lundaforskaren Janne Rydberg är också en av kvantpionjärerna.

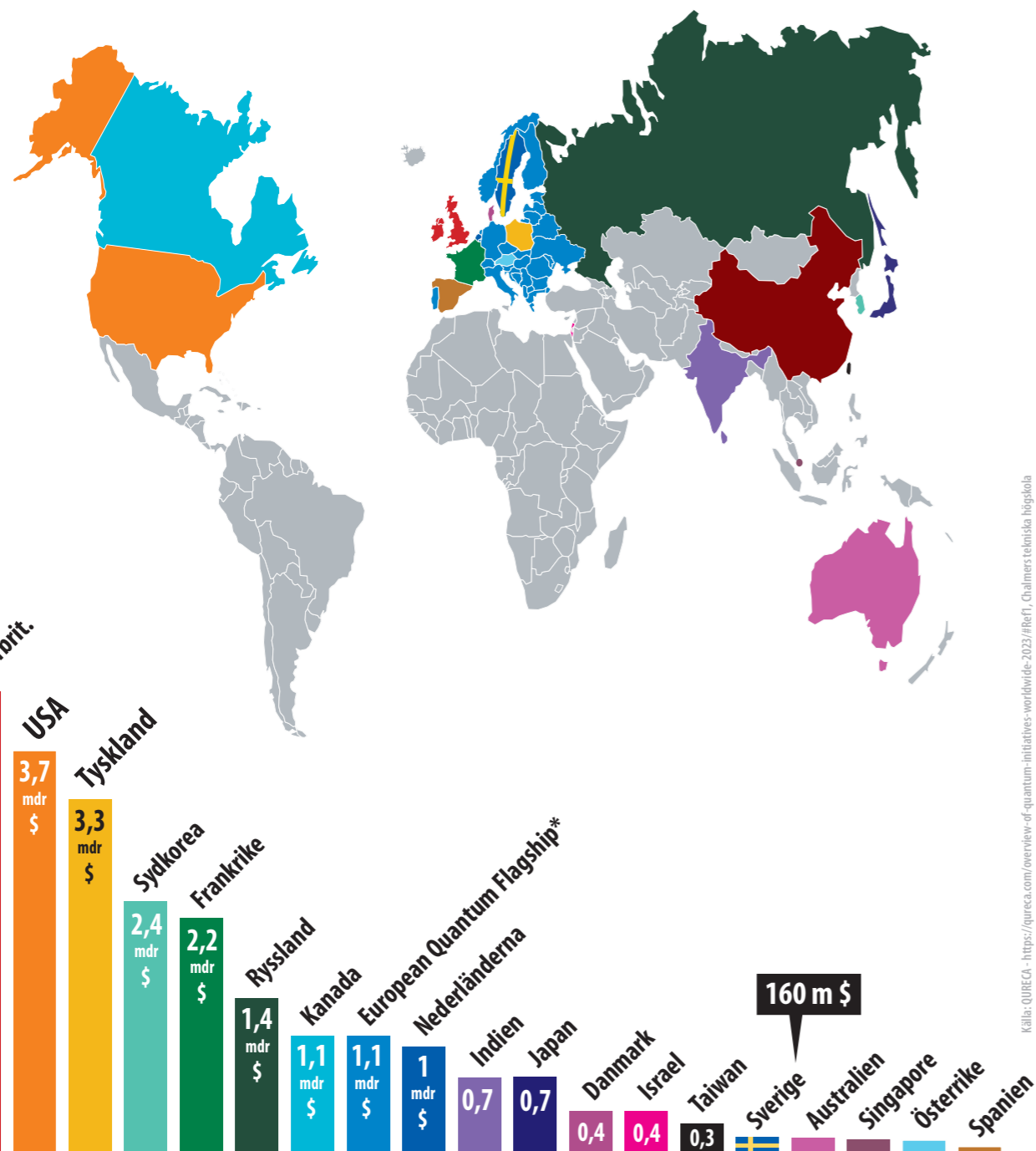
Tove Jaensson tror på ett nordiskt samarbete och pekar på att det finns två nordiska organisationer Nordic Quantum och Nordic Quantum Life Science att bygga vidare på. □



# Kvantvärlden växer

Fram till 2030 uppskattas de globala investeringarna på kvantforskning i världen nå närmare 40 miljarder dollar och fram till 2040 beräknas siffran passera 100 miljarder.

2018 startade EU ett tioårsprojekt värt en miljard euro. Det är svårt att uppskatta hur stora kvantinvesteringarna är. En del forskning är militär och andra ligger hos de stora företagen. Ett mönster är dock klart. Kina leder stort och ligger långt framme på områden som kvantkommunikation. Uppgifterna om Kinas investeringar varierar. Staplarna visar de siffror som företaget Qureca uppger.



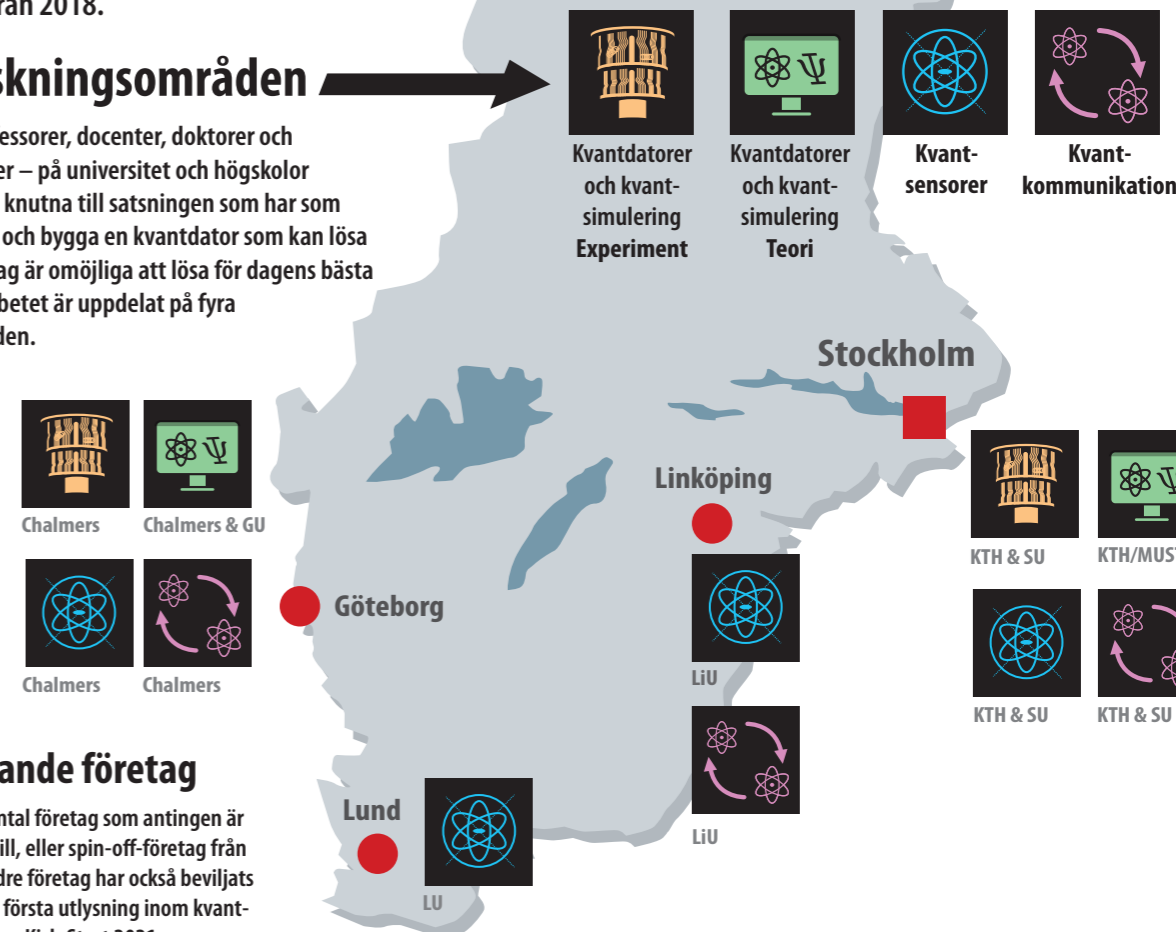
Källa: QURECA - <https://qureca.com/overview-of-quantum-initiatives-worldwide-2023/#/ref1>, Chalmers tekniska högskola

# Kvantforskning i Sverige

Så gott som all stark svensk forskning i Sverige är knutet till WACQT (Wallenberg Centre for Quantum Technology). Det är den helt dominerande satsningen med cirka 1,4 miljarder SEK i finansiering över 12 år räknat från 2018.

## Fyra forskningsområden

Närmare 50 professorer, docenter, doktorer och forskarasistenter – på universitet och högskolor i fyra städer – är knutna till satsningen som har som mål att utveckla och bygga en kvantdator som kan lösa problem som i dag är omöjliga att lösa för dagens bästa superdatorer. Arbetet är uppdelat på fyra forskningsområden.



## Kvantsatsande företag

Nedan listas ett antal företag som antingen är industripartners till, eller spin-off-företag från WACQT. Vissa mindre företag har också beviljats pengar i Vinnovas första utlysning inom kvantteknologi, Quantum Kick-Start 2021.

### Stora industripartners till WACQT

- AstraZeneca**  
En industridoktorand forskar på hur kvantdatorer kan användas för beräkningar inom kvantkemi.
- Ericsson**  
En industridoktorand forskar på distribuerade kvantdatorer.
- Hitachi Energy**  
En industridoktorand forskar på kvantnyckeldistribution.
- Jeppesen**  
En industridoktorand forskar på hur kvantdatorer kan användas för att lösa logistikproblem inom flygindustrin.
- Saab**  
Två industridoktorander utforskar möjligheter för kvantteknologi att förbättra radar.
- Volvo Group**  
En industridoktorand forskar på möjliga synergier för maskininlärning och kvantdatorer, samt på användning av kvantdatorer för att lösa logistikproblem.

### Spin-off-företag från WACQT

- Atlantic Quantum**  
Utvecklar kvantbitar för supraledande kvantdatorer.
- Deep Light Vision**  
Använder långsamt ljus för att ta bilder djupt inne i människokroppen.
- quCertify**  
Utvecklar och kommersialiserar säker kvantkommunikation och kvantbaserad slumpalgsenerering.
- Scaling**  
Bygger provhållare för kvantdatorchip med supraledande kvantbitar.
- Sweden Quantum**  
Bygger mikrovägsfilter för att skydda supraledande kvantdatorer från störningar.
- WACQT-IP**  
Samlar och kommersialiserar IP inom kvantteknologi från forskare inom WACQT.

### Andra mindre företag

- ConScience**  
Mikro- och nanostrukturer, inkl. supraledande kvantbitar.
- Iloomina**  
Utvecklar integrerade kretsar för kvantfotonik.
- Intermodulation Products**  
Elektronik för styr signaler till supraledande kvantbitar.
- Low Noise Factory**  
Tillverkar lågbrusiga mikrovägsförstärkare till kvantdatorer.
- Quantum and Classical Solutions**  
Utvecklar och säljer mjukvara för simulering av magnetiska och supraledande system, inklusive olika typer av kvantbitar.
- Quantum Scopes**  
Mikroskop som bygger på enfotondetektorer.
- SpectraCure**  
Långsamt ljus för att ta bilder djupt inne i människokroppen.
- Svenska Laserfabriken**  
Bygger enfotondetektorer för infrarött ljus.

Källa: Chalmers tekniska högskola



# MOHAMED VAKAR ÖVER FAMILJENS HEMLIGHET

Kryptovärldens strävsamma par Alice och Bob vill hålla sina hemligheter för sig själva medan Eve försöker att avlyssna. Bob och Alice finns inte i verkligheten men i Albano är de en realitet i form av sladdar och datorer. Med hjälp av kvantteknik försöker de hålla Eve utanför. Och nu är det inte längre bara Alice och Bob utan hela familjen. Över denna familj vakar Mohamed Bourennane.





# M

ohamed Bourennane har vid Stockholms universitet byggt upp en forskargrupp för kvantinformation och kvantoptik. Han är född i en oas i södra Algeriet för 61 år sedan och kom till Sverige 1995 efter studier i Alger, Paris och Tyskland. 1999 var han först i världen med att skicka kvantnycklar i fiberkabel. När han 2001 lade fram sin doktorsavhandling var han den första doktoranden i Sverige som arbetat med kvantinformatik. Sedan 2011 är han professor och 2014 valdes han in i Kungliga vetenskapsakademien.

– En kollega sade till mig att det är den finaste utmärkelsen en svensk

forskare kan få, säger Mohamed Bourennane.

I detta nummer finns två andra akademiledamöter – Stephanie Reiman och Stefan Kröll. Både Stephanie Reimann och Mohamed Bourennane är numer svenska medborgare.

Mohamed Bourennane tar oss med på en rundvandring i sina laboratorier. Här studeras kvantfotonik, kvantfysik och kvantinformation. Det finns laboratorier för optik, kommunikation, nanofotonik och kvantmekanikens grunder.

– Jag har skapat forskargruppen från grunden. När jag började för arton år sedan fanns inga labb och inga pengar. Nu får vi stöd från Wallenbergstiftelsen och andra och det byggs nya labb varje år.

– Mina utländska kolleger tror jag har en armé. En doktorand kostar en miljon om året. Nu har vi sex doktorander. Vi bör vara minst nio. Det är ett problem att få de utländska studenterna att stanna. De försvinner till arbetsmarknaden redan som masterstudenter. Indierna betalar 140 000 om året för att studera i Sverige. När de är klara sticker de flesta. Något måste ändras i Sverige, jag vet inte hur, för att få studenter att stanna.

### Andra kvantrevolutionen

En av de stora finansörerna är Knut och Alice Wallenbergs stiftelse. WACQT Centre for Quantum Technology är en del av stiftelsen riktade satsningar. 2015 fick forskargruppen 34 miljoner för ett femårsprojekt. Andra finansörer är bland andra Vetenskapsrådet och Stockholms universitet.

Mohamed Bourennanes forskargrupp arbetar för att göra kommunikationer säkrare.

– Vi använder kvant utan att tänka på det. Det är kvantmekanik i våra lampor. I dag gör vi nästan allt på nätet. Banker, hälsovård, mejl är en del av vår vardag. Dessa data skyddas av krypton. Dagens krypton bygger på matematik och är svåra att knäcka med en vanlig dator.

1995 visade den amerikanska forskaren Peter Shor att en kvantdator skulle göra många av dagens krypton osäkra. Att bygga krypton med kvantmekanik är att låta naturen garantera säkerheten.

Mohamed Bourennane säger att teknik och kvantmekanik ledde fram till det som man brukar kalla för den första kvantrevolutionen. När it-tekniken utvecklades dyker det upp nya hinder. Det blir störningar i kretsarna när de nästan hamnar på atomnivå. Dessa hinder kan övervinnas med kvantmekanik.

Den andra kvantrevolutionen kom enligt Mohamed Bourennane när man förstod fenomenet superposition. Då öppnades nya möjligheter inom områden som kommunikation, krypto, bildåtergivning, sensorer och datorer.

– Kvantpartiklar kan avslöja om någon försöker avlyssna en digital kommunikation eller skicka falsk information.

### Bob, Alice och hela familjen

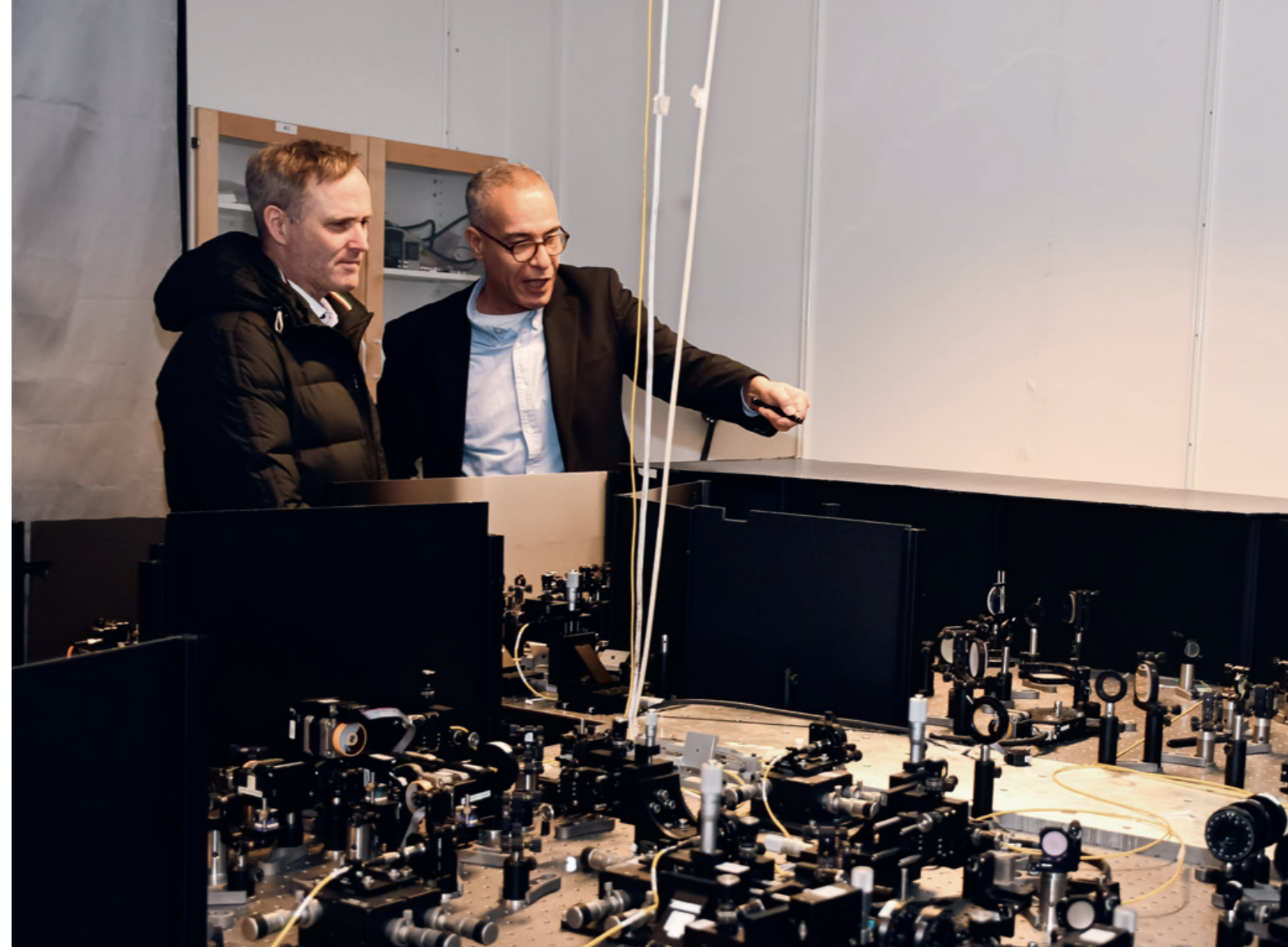
Mohamed Bourennanes grupp har lyckats sammanfläta upp till åtta fotoner. De kan användas för att skicka nycklar till flera personer där samtliga nycklar behövs för att den avlyssningssäkra informationen ska sändas.

– Det ni ser här, säger Mohamed Bourennane och pekar ut över över en djungel av linser, prismor och sladdar i ett laboratorium, är inte bara Alice och Bob utan hela familjen. Det ni ser här är bland det bästa i världen.

Nu har gruppen visat att det fungerar i ett laboratorium. Nästa steg är att gå till något som är hanterligt. Det som används för att skapa de sammanflätade fotonerna ska rymmas på en liten glasskiva.

Vad ska Sverige satsa på i framtiden? – Vi borde lägga pengarna på områden där vi är starka som medicin, kommunikation och sensorer, säger Mohamed Bourennane som är tveksam till den svenska satsningen på kvantdatorer där Sverige enligt Mohamed Bourennane

*»Jag har skapat forskargruppen från grunden. När jag började för arton år sedan fanns inga labb och inga pengar.«*



inte kan mäta sig med amerikanska teknikjättarna.

Det ledande landet inom flera viktiga kvantområden är Kina, säger Mohamed Bourennane. Kina bygger ett 200 mil långt nät för kvantinformation och har sänt kvantinformation till en satellit. Över hela världen ökar anslagen till forskning om kvantinformation. Det finns en sorts kapprustning i kvantvärlden.

Slutligen ställer sig Mohamed Bourennane framför en bild av vad som kan tyckas vara en samling gubbar. Det finns dock en kvinna med, Marie Curie. Vill man ha många snillen på en bild samtidigt lär den här vara oöverträffad. Den togs vid den femte så kallade Solvay-konferensen i Belgien 1927. Här diskuterades fotoner och elektroner och inte minst den då nya kvantteorin. Av de 29 deltagarna hade 17 fått eller skulle få Nobelpris.

– Det här är mina hjältar, säger Mohamed Bourennane. □





# MELLAN LJUS OCH MATERIA

**Växelverkan mellan ljus och materia. Det är det vi håller på med här, säger Stefan Kröll, professor vid avdelningen för atomfysik vid Lunds universitet. Här forskas på en bred front med kvantdatorer, kvantminnen och inte minst medicinsk teknik.**

**J**ag började på avdelningen 1981 som doktorand. Vi använde lasrar för att mäta på atomer. Det var inspirerande, men efter fem år och när jag var klar med min avhandling tyckte jag det var jobbigt med experimentellt arbete. Det var roligare att bara få tänka. Så då gick jag över till att arbeta med modellering av laserbaserad mätning av temperaturer i förbränningsprocesser. Efter ett par år med detta ville jag byta miljö.

Så öppnades en möjlighet i USA. President Ronald Reagan hade startat det gigantiska försvarsforskningsprojektet strategic defence initiative, SDI, mer känt som stjärnornas krig. En av tankarna var att med hjälp av lasrar förstöra sovjetiska strategiska robotar i rymden. Under ett halvår deltog Stefan Kröll i projektet, men gick sedan över till ett projekt relaterat till optisk datalagring i sällsynta jordartsdopade kristaller stött av NTT i Japan.

En viktig del av avdelningens forskning kretsar idag kring optiska kristaller dopade med sällsynta jordartsmetaller.

– Normalt uppfattar vi inte världen som särskilt kvantmekanisk, men när

man dopar kristaller med sällsynta jordarter uppstår fenomenet att atomer kan inta två tillstånd samtidigt under en relativt lång tid, säger Stefan Kröll. Det skapas en så kallad superposition. Varför får man sådana där fenomen? Kan man få tillståndet att vara längre? Det var här jag kom i kontakt med kvantfysiken.

– Dessa jordartsdopade kristaller är en möjlig hårdvara för kvantdatorer. Man kan få många kvantbitar på liten volym. Atomerna ligger tätt. Kristallerna är ett av de två huvudspåren för kvantminnen i EUs flaggskepp. De är inte så sällsynta som man tror och finns i ledlampor, halvledare och nästan överallt. Jordartsmetallernas atomer skiljer sig från andra atomer, säger universitetslektor Lars Rippe.

– Vi upptäckte att ljuset kunde gå extremt långsamt i kristaller dopade med jordartsmetaller, säger Lars Rippe. För referensmätningar av tid och frekvens används lasrar låsta till extremt stabila kaviteter med två speglar. Avståndet mellan speglarna kan mätas med en noggrannhet som motsvarar storleken på en atomkärna. Det faktum att avståndet är stabilt är utgångspunkten för att ställa in lasern. Man justerar laserns frekvens så ljuset bildar en stående våg i kaviteten. Atomerna i speglarna rör sig i värmen. Då ändras medelavståndet mellan speglarna. En jordartsdopad kristall kan minska ljushastigheten >



»Min bild av kvantfysiken är att det är en linjal man måste ta till när man ska mäta väldigt noga. Då måste man se det man mäter som ett kvantmekaniskt system.«

en faktor 100 000. Sätter vi den i kaviteten ändrar sig spegelytorna fortfarande, men effekten på frekvensen hos ljuset blir 100 000 gånger lägre.

#### Medicinsk forskning

Lars Rippe säger att i Amerika har man undersökt möjligheten att använda kristaller dopade med jordartsmetaller för att analysera till exempel radarsignaler. Normalt kan man bara leta efter en frekvens i taget. Med hjälp av jordartsmetaller kan man samtidigt detektera flera frekvensband. Dessutom kan man lagra sekvenser.

– Det är gasen i botten över hela bredden.

I en atomklocka är det cesium eller ljus som ruckar klockan. Laser är urverket som ligger och svänger, men man skulle gärna vilja ha lasern ännu stabilare.

– Vår forskning kanske kan ge en stabilare laser, säger Stefan Kröll. Laserklockorna är redan hundra gånger bättre än cesiumklockorna. Den noggrannhet man kan få genom att mäta med en cesiumklocka på en vecka kan en laserklocka ge på en sekund. Hade man bättre klockor skulle man kunna koppla ihop optiska teleskop i nätverk.

En viktig del av avdelningens forskning rör medicinsk teknik. Det kan gälla att hitta tumörer, vård av för tidigt födda eller att detektera syrehalten i blodet.

– På sjukhuset får man en klämma som mäter med en infraröd detektor på fingret som visar syresättningen. Men det fungerar bara för fingret. Hur det ser ut i hjärtat kan man inte se med en klämma, säger Lars Rippe.

– Vi använder en kombination av ljus och ultraljud, säger Stefan Kröll. En del ljus passerar genom ultraljudet. Då uppstår ett så kallat sidband som ger information om absorptionen i den punkten ultraljudspulsen befinner sig. Man kan använda detta för att se om

blodet är syresatt eller inte. Signalerna är svaga och brusat måste filtreras bort. Här används kristaller dopade med jordartsmetaller och kvantfysik.

#### Kvantdatoren

De flesta uppfattar nog inte världen som kvantmekanisk – om man ens har en aning om vad kvantmekanik är.

– En av de första som hävdade att kvantdatorer skulle kunna användas för beräkningar som vanliga datorer inte klarar var den amerikanska teoretiska fysikern Richard Feynman som fick Nobelpriset i fysik 1965, säger Lars Rippe. En kemisk process följer kvantmekaniska regler och lagar. Försöker man räkna på tillräckligt komplexa kvantmekaniska förlopp med en vanliga datorer tar det bara stopp för vanliga datorer har inte kapacitet att räkna på dem. Men en kvantmekanisk dator kan räkna på kvantmekaniska fenomen.

– Feynman påstod att med en kvantdator kan vi beskriva hela världen. Med en kvantdator kan vi göra beskrivningar som vi kan räkna på. Och det är en väldigt stor grej.

– Kvantdatoren är nog delvis en hajp. Men det kommer ändå ut rätt mycket ur hajper, säger Stefan Kröll. Kvantdatoren räknar på alla möjligheter samtidigt. En vanlig dator arbetar i sekvenser. Kvantdatoren håller alla bollar i luften och räknar på alla bollar samtidigt.

– Har man en eller två partiklar kan man beskriva det i en vanlig dator och kan tala om vad som kommer att hända med partiklarna. Men när vi har många partiklar då exploderar storleken på problemet och datoren kan inte behandla det. Men en tillräckligt stor kvantdator skalar inte likadant.

#### Kan man förstå kvantfysik?

– Vi kan skriva ned matematiken på ett papper, det är hur enkelt som helst. Allmänheten tycker att det här är väldigt

konstigt. Studenterna lär sig med tiden. Har man hört svåra saker tillräckligt många gånger tror man på dem, säger Stefan Kröll. Min bild av kvantfysiken är att det är en linjal man måste ta till när man ska mäta väldigt noga. Då måste man se det man mäter som ett kvantmekaniskt system. När man kommer ner på nanoskalan hamnar man i kvantmekaniken.

Vad gäller försvarstillämpningar nämner Stefan Kröll kvantkommunikation med satelliter. Kina är på gång och kvantkrypton går inte att knäcka. Det finns kvantminnen som sparar kvanttillstånd i sex timmar. På den tiden hinner en satellit ett varv runt jorden.

#### Världen om trettio år

Kvantmekanik och artificiell intelligens, AI nämns som framtida teknologier. Stefan Kröll säger att AI nog kan påverka hur man bygger en kvantdator. Det finns en zon som överlappar de två teknologierna.

– Den berömda fysikern Erwin Schrödinger sa på femtiotalet att det var orealistiskt att mäta på enskilda partiklar. Trettio år senare var det ett faktum. På något sätt säger det rätt mycket. Det är svårt att nu säga vad som kan hända på trettio år. Bara att världen blir annorlunda. □





# KVANTDATORN KAN BLI ETT HOT

**Det finns en fascination kring kryptologi. Under andra världskriget lyckades britterna med Alan Turing i spetsen knäcka det tyska Enigma-kryptot. Turing utvecklade under arbetet det som ibland kallas den första datorn. Nu finns kanske en ny typ av dator runt hörnet – kvantdatorn. Går några kryptosystem säkra för en storskalig kvantdator?**

Idag finns det redan kvantdatorer, men dessa är småskaliga och risken för att fel ska uppstå under beräkningarna är överhängande. Dagens kvantdatorer kan därför endast användas för att utföra ytterst begränsade beräkningar som är av ringa praktiskt intresse, säger Martin Ekerå som är huvudansvarig kryptolog på Militära underrättelse- och säkerhetstjänsten, Must.

– Men om man i framtiden kan bygga storskaliga feltoleranta kvantdatorer så vet vi att dessa kommer att kunna användas för att forcera merparten av de asymmetriska kryptosystem som idag används brett på internet. Det är en konsekvens av Peter Shors banbrytande arbeten från 1994. Alla kryptosys-

tem kommer dock inte gå att forcera. Exempelvis påverkas inte symmetriska kryptosystem nämnvärt, och det finns även asymmetriska kryptosystem som anses vara kvantdatorsäkra.

Dessa olika kryptosystem förklaras längre fram.

– Det är tänkbart att storskaliga feltoleranta kvantdatorer som kan forcera dagens asymmetriska kryptosystem kan se dagens ljus någon gång efter år 2030. Att det skulle ske tidigare än så förefaller ytterst osannolikt. Förmodligen kommer det ta betydligt längre tid. Vi vet inte heller med säkerhet om det är möjligt att bygga sådana kvantdatorer, men mycket pekar på det, och som kryptolog måste man vara konservativ och ta kvantdatorhotet på allvar. Särskilt med tanke på att en angripare kan lagra kryptotexter som sänds idag för forcering i framtiden när bättre kryptoanalytiska verktyg

är tillgängliga. Must har därför redan vidtagit åtgärder för att skydda Sveriges hemligheter mot kvantdatorhotet.

**Vad är det som Sverige vill skydda?**

Martin Ekerå, säger att det är alla uppgifter som är viktiga för Sveriges säkerhet. För så kallade säkerhetsskyddsklassificerade uppgifter – exempelvis uppgifter som rör Sveriges försvar, eller Sveriges förhållande till andra stater eller mellanfolkliga organisationer – föreligger det krav på att använda av Must godkända så kallade signalskyddssystem för att skydda sekretessen. Must dimensionerar dessa system så att de ska kunna stå emot framtida hot – inklusive kvantdatorhotet. Användare av sådana system får automatiskt ett skydd.

– Sedan har vi förstås även många uppgifter i samhället som omfattas av sekretess men som inte är säkerhetsskyddsklassificerade. För sådana

uppgifter finns det idag inget formellt krav på att använda av Must godkända signalskyddssystem, säger Martin Ekerå. För sådana uppgifter måste berörda aktörer istället själva vidta skyddsåtgärder – om de inte ändå väljer att använda av Must godkända signalskyddssystem. **Vad är skillnaden mellan symmetriska och asymmetriska kryptosystem vad avser sekretesskydd?**

**I symmetriska kryptosystem** används samma kryptonyckel både för att kryptera och dekryptera uppgifter. Martin Ekerå menar att det idag inte finns något som tyder på att kvantdatorer skulle kunna forcera idag vanligt förekommande symmetriska kryptosystem, förutsatt att nyckellängden är tillräckligt lång.

Ett problem med symmetriska kryptosystem är dock att kryptonyckeln i förväg måste förmedlas på ett säkert sätt till de som är parter i kommunikationen. I vissa användningsfall – exempelvis när du surfar på internet – så är det svårt i praktiken. Därav behovet av asymmetriska kryptosystem.

**I asymmetriska kryptosystem** består kryptonyckeln av två nycklar – en publik nyckel som kan spridas fritt till olika parter, och en privat nyckel som måste hemlighållas. Nycklarna är så beskaffade att uppgifter som krypteras med den publika nyckeln endast kan dekrypteras med den privata nyckeln. Vidare kan den privata nyckeln inte beräknas givet den publika nyckeln. Sådana system utgör grunden för säkerheten på internet.

– Det låter nästan lite för bra för att vara sant, och för att det ska fungera i praktiken måste asymmetriska kryptosystem baseras på speciella matematiska problem, säger Martin Ekerå. Det finns endast ett fåtal kända matematiska problem som lämpar sig för ändamålet, och vissa av dessa — de som hitintills har använts brett som grund för kommersiella asymmetriska kryptosystem – visade Shor att storskaliga feltoleranta kvantdatorer effektivt kan forcera. Det är det som i korthet är förklaringen till att kvantdatorer utgör ett hot mot dagens kommersiella asymmetriska kryptosystem.



Vid sidan om sitt arbete som huvudansvarig kryptolog på Must forskar Martin Ekerå även vid Kungliga Tekniska Högskolan, KTH i Stockholm, med fokus på kvantdatorassisterad kryptoanalys och kvantdatorsäkra kryptosystem. – I min forskning studerar jag hur man kan forcera kryptosystem med hjälp av kvantdatorer, och utvecklar effektivare variationer av Peter Shors berömda algoritmer. Flera av de idag ledande variationerna har utvecklats av oss. Det är viktigt att förstå hotet för att kunna skydda sig mot det på ett bra sätt.

**Hur orolig ska man vara?**

– Det beror på vem man är, säger Martin Ekerå. Om storskaliga feltoleranta kvantdatorer som kan köra Peter Shors algoritmer blir verklighet så kommer de knappast i första hand att användas mot gemene man, utan mot mer värdefulla mål. Stater och andra aktörer som kan antas utgöra viktiga mål bör iakttaga försiktighet. Kvantdatorer utgör ett potentiellt framtida hot. Det är viktigt att vidta skyddsåtgärder med tillräckligt stor framförhållning, och att prioritera tillämpningar där det föreligger ett behov av sekretesskydd över längre tidsperioder. □



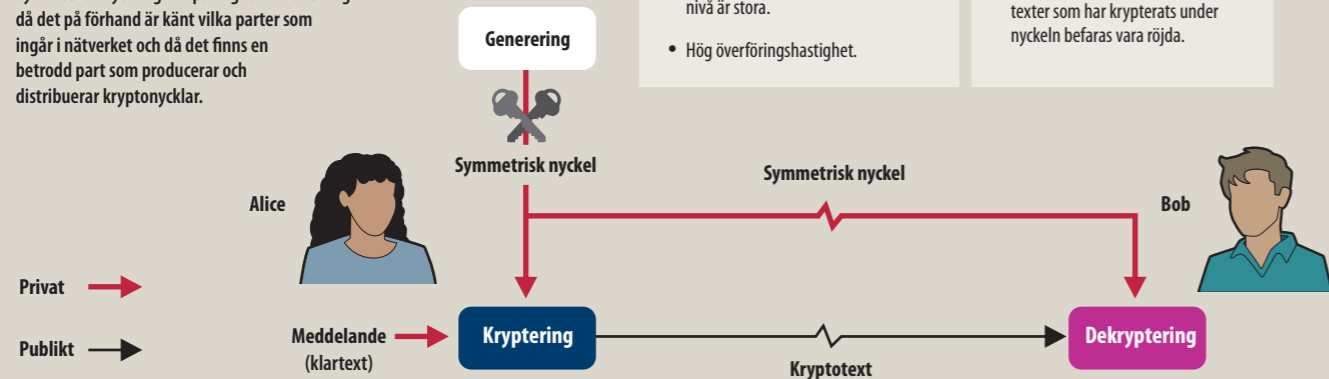
# Kryptografi och kvantfysik

Vår vardag är ett lapptäcke av kryptosystem som vi inte har någon insyn i. De arbetar i bakgrunden när vi surfar på internet, sköter våra bankaffärer, läser våra journaler och skickar epost. Även viktiga samhällsfunktioner som infrastruktur och myndighetsutövande är beroende av kryptering. Krypteringen äger rum på flera ställen. I dina dator-enheter, på olika servrar under själva överföringen eller i samband med lagring i molnet. Det har länge varnats för att storskaliga kvantdatorer skulle kunna utgöra ett hot mot dessa kryptosystem. Här går vi igenom grundprinciperna för de vanligaste kryptosystemen och deras för- och nackdelar.

## Symmetriska kryptosystem

Symmetriska kryptosystem har använts i många hundra år och bygger på att samma kryptonyckel används såväl för att kryptera meddelandet som för att dekryptera den resulterande kryptotexten.

Symmetrisk nyckling lämpar sig för användning då det på förhand är känt vilka parter som ingår i nätverket och då det finns en betrodd part som producerar och distribuerar kryptonycklar.



- Fördelar**
- Klarar kvantdatorattacker förutsatt att kryptonyckeln är tillräckligt lång.
  - Kan skydda sekretess över långa tidsperioder mot kvalificerade angripare.
  - Konstruktörens möjligheter att variera algoritmens utformning och säkerhetsnivå är stora.
  - Hög överföringshastighet.

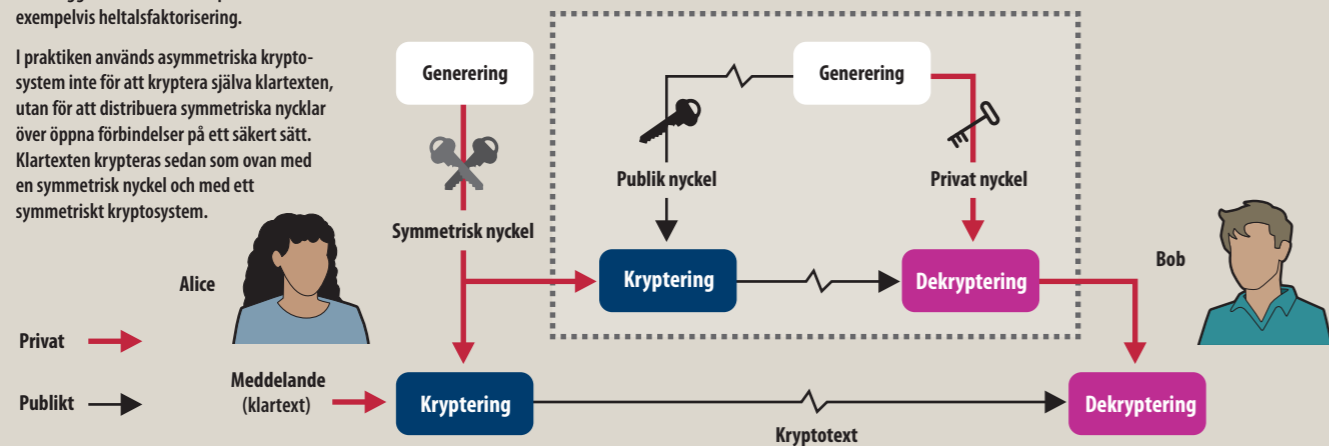
- Nackdelar**
- En kryptonyckel måste överföras (på ett säkert sätt) innan en förbindelse kan upprättas.
  - Kryptonyckeln kan röjas.
  - Röjs kryptonyckeln måste alla klartexter som har krypterats under nyckeln befaras vara röjda.

## Asymmetriska kryptosystem

Asymmetriska kryptosystem har använts sedan 1970-talet. I dessa system används nyckelpar bestående av en publik nyckel och en privat nyckel. Ett meddelande som har krypterats under den publika nyckeln kan bara dekrypteras under den privata nyckeln.

För att detta ska fungera måste de två nycklarna ha en stark inbördes matematisk relation. Därför baseras alla asymmetriska kryptosystem på något underliggande matematiskt problem som exempelvis heltalsfaktorisering.

I praktiken används asymmetriska kryptosystem inte för att kryptera själva klartexten, utan för att distribuera symmetriska nycklar över öppna förbindelser på ett säkert sätt. Klartexten krypteras sedan som ovan med en symmetrisk nyckel och med ett symmetriskt kryptosystem.



- Fördelar**
- Möjliggör säker kommunikation på stora publika nätverk som exempelvis Internet.
  - Det finns asymmetriska kryptosystem som anses vara kvantdatorsäkra.

- Nackdelar**
- Många vanliga typer av asymmetriska kryptosystem befaras kunna knäckas av storskaliga kvantdatorer.
  - Mindre robusta än symmetriska kryptosystem. Konstruktören har färre frihetsgrader.

Källa: M. Ekerå, "Om kvantdatorutvecklingens påverkan på kryptologiområdet, kvantdatorassisterad kryptoanalys och kvantdatorsäkra kryptosystem" (2022).

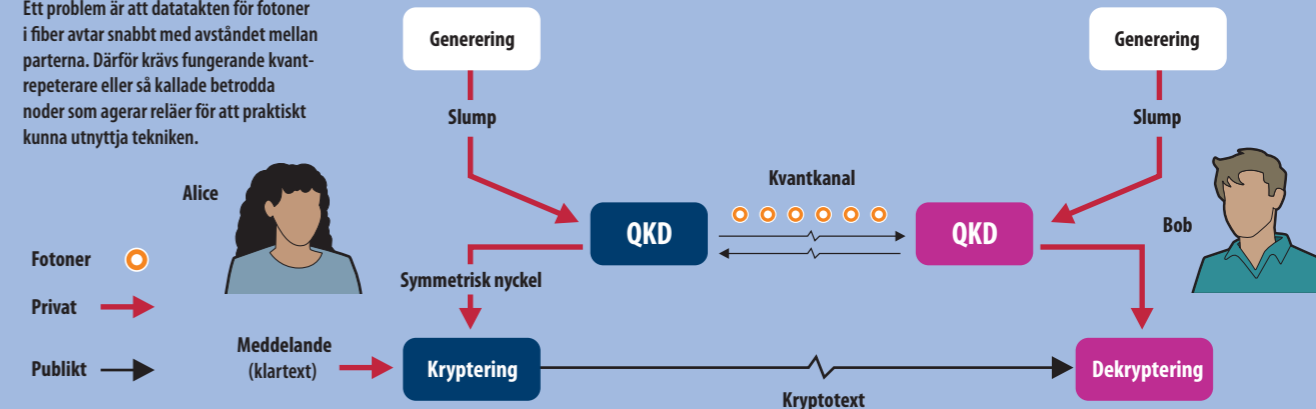
## Kvantnyckeldistribution

Det talas ibland om kvantkryptografi, men det är ett i grunden olyckligt begrepp. I regel är det snarare någon form av kvantnyckeldistribution – (QKD - quantum key distribution) – som avses.

Kvantnyckeldistribution bygger på att det i teorin är omöjligt för en angripare att avlyssna eller påverka en kanal där kvanttillstånd sänds mellan två parter, utan att enligt de kvantfysiska lagarna påverka överföringen och därmed upptäckas.

För kvantnyckeldistribution krävs förutom en riktighetsskyddad klassisk kanal även en kvantkanal som kan förmedla kvanttillstånd i form av enstaka fotoner.

Ett problem är att datatakten för fotoner i fiber avtar snabbt med avståndet mellan parterna. Därför krävs fungerande kvantrepeaterare eller så kallade betrodda noder som agerar reläer för att praktiskt kunna utnyttja tekniken.



- Fördelar**
- Ger en i teorin helt säker överföring av kryptonycklar.

- Nackdelar**
- Avsaknaden av kvantrepeaterare gör att praktiskt användbart avstånd idag är förhållandevis kort och att datatakten blir förhållandevis låg.
  - Kräver en kvantkanal och särskild hårdvara.
  - I praktiken är det svårt att säkra implementationer av kvantnyckeldistribution. Många attacker har påvisats mot praktiska implementationer.

## Peter Shors faktoriseringsalgoritm

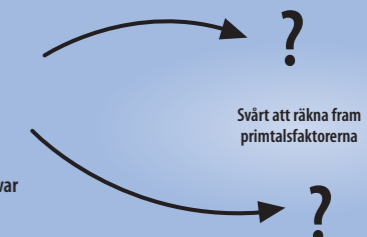
1994 utvecklade den amerikanske matematikern Peter Shor en kvantalgoritm som med en storskalig kvantdator skulle kunna användas för att knäcka de flesta asymmetriska kryptosystem som används idag. Samma år visade experiment att det går att distribuera kryptonycklar via en kvantkanal. Det var startskottet för ett markant ökat intresse för kvantteknologi från finansärer och försvarsmakter runt om i världen.



Peter Shor

$$\begin{matrix} \text{Primtal} & & \text{Primtal} & & \text{Produkt} \\ 829 & \times & 379 & = & 314\,191 \end{matrix}$$

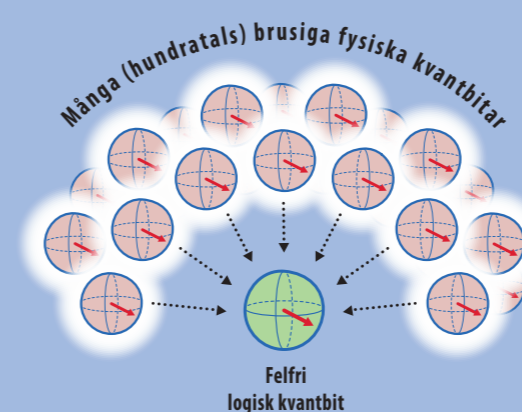
Shors algoritm är en kvantalgoritm för att hitta primtalsfaktorerna i stora heltal. Det är ingen konst att multiplicera primtal. Men att utifrån produkten räkna fram vilka primtal det var som multiplicerades blir snart övermäktigt för en klassisk dator när talen blir riktigt stora.



## Hur många kvantbitar behöver en storskalig kvantdator?

1995 visade Peter Shor också hur en felkorrigeringskod för kvantdatorer kan konstrueras, vilket är en nödvändig pusselbit för att uppnå en väl fungerande storskalig kvantdator. Kvantfelkorrigering används för att skydda kvantinformationen från störningar på grund av dekoherens och annat kvantbrus när kvantdatorn körs.

Vid kvantfelkorrigering använder man många brusiga fysiska kvantbitar för att skapa en felrättad logisk beräkningskvantbit. Det krävs ett stort antal fysiska kvantbitar av bra kvalitet – uppskattningsvis hundratal – för att få en logisk kvantbit att fungera tillfredsställande.



Antalet fysiska kvantbitar rusar alltså snabbt iväg när man närmar sig de nivåer som krävs för en storskalig kvantdator.

Om man siktar på att bygga en väl fungerande storskalig kvantdator med 1000 logiska kvantbitar, kan den komma att behövas 100 000 till uppemot en miljon fysiska kvantbitar för att den ska kunna köra felfria operationer.

1000 logiska kvantbitar = 100 000 – 1 000 000 fysiska kvantbitar

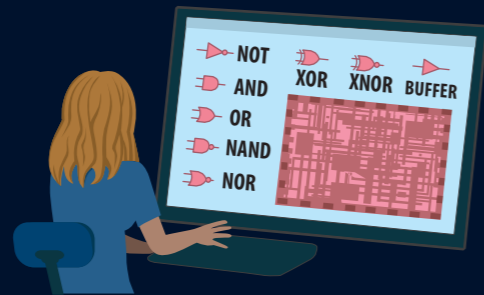
Källa: Chalmers tekniska högskola



# Kvantdatorns funktion

För att bättre förstå hur en kvantdator arbetar kan vi jämföra med en klassisk dator.

## Klassisk dator – använder bitar

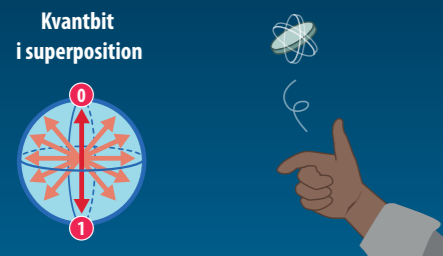


En klassisk dator använder grundläggande byggstenar som kallas bitar. Varje bit kan existera i ett av två tillstånd – 0 eller 1. Det är som en switch som antingen är av eller på. Klassiska datorer bearbetar information genom att manipulera dessa bitar i serie av logiska operationer.

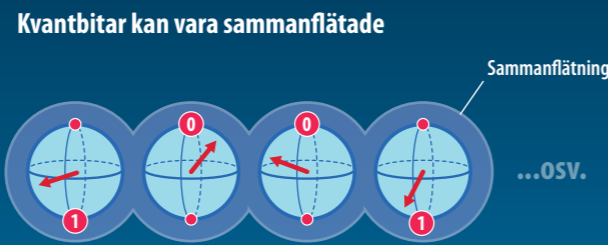
Dessa logiska operationer utförs med hjälp av så kallade logiska grindar. Grindarna manipulerar den binära informationen genom att tillämpa olika logiska regler så att datorn kan utföra sina uppgifter. I grunden arbetar en klassisk datorer sekventiellt vilket påminner om hur man följer ett recept steg för steg för att uppnå ett resultat.

## Kvantdator – använder kvantbitar

I stället för klassiska bitar använder en kvantdator kvantbitar. Kvantbitar kan existera i ett tillstånd kallat superposition, vilket betyder att de kan vara i en kombination av 0 och 1 samtidigt. De kan också vara sammanflätade i ett gemensamt kvantsystem.



En liknelse är att se på kvantbiten som ett spinnande mynt. Det kan vara både krona och klave samtidigt till dess man stannar myntet och ser efter. När kvantbiten mäts, "väljer" den ett av tillstånden 0 eller 1 – baserat på sannolikheter som definieras av superpositionen.



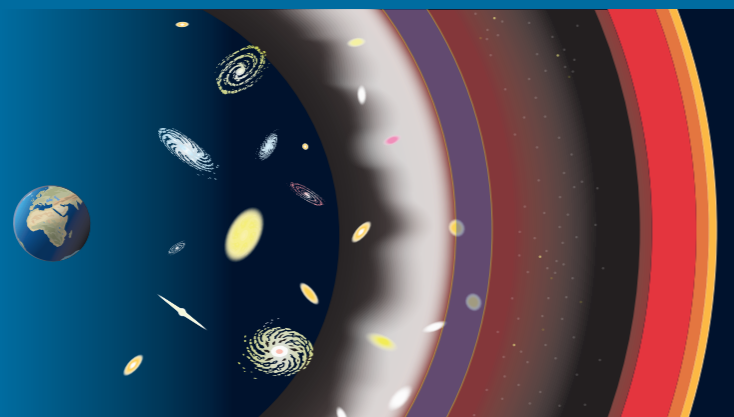
Sammanflätning är ett kvantfenomen där två eller flera kvantbitar blir korrelerade på ett sådant sätt att tillståndet för en kvantbit är direkt relaterat till tillståndet för de andra. Det gör att informationen hos kvantbitarna ingår i samma stora kvantsystem och är en nyckel till att kvantdatorer kan utföra vissa beräkningar mer effektivt än klassiska datorer.

## Kvantbitarnas styrka

En klassisk bit kan alltså ha värdet 0 eller 1. Men en kvantbit kan genom superposition ha värdet 0 och 1 på samma gång. Två sammanflätade kvantbitar i superposition kan därför befinna sig i en sannolikhetsfördelning av fyra lägen, nämligen– 00, 01, 10 och 11. Och varje gång du lägger till en kvantbit till systemet så fördubblas antalet möjliga tillstånd och därmed antalet siffrvärden som kan hanteras.

Tio sammanflätade kvantbitar ger en sannolikhetsfördelning över 1024 tillstånd – samtidigt. Och fortsätter man öka antalet kvantbitar så ökar antalet tillstånd dramatiskt.

Antal kvantbitar	Antal tillstånd
10	1024
20	En miljon
30	En miljard
40	En biljon



En kvantdator med 300 fungerande kvantbitar, skulle teoretiskt kunna hantera fler siffrvärden än vad det finns atomer i universum.

## Ett energilandskap av interfererande vågfunktioner

Kvantbitarna i en kvantdator är liksom allt annat i kvantvärlden i grunden vågfunktioner. Ju fler kvantbitar som läggs till i ett sammanflätat kvantsystem ju mer komplicerad blir den övergripande vågfunktionen. Bilden nedan är en tänkt visualisering över hur 25 sammanflätade kvantbitar i superposition skapar något som liknar ett gemensamt energilandskap.

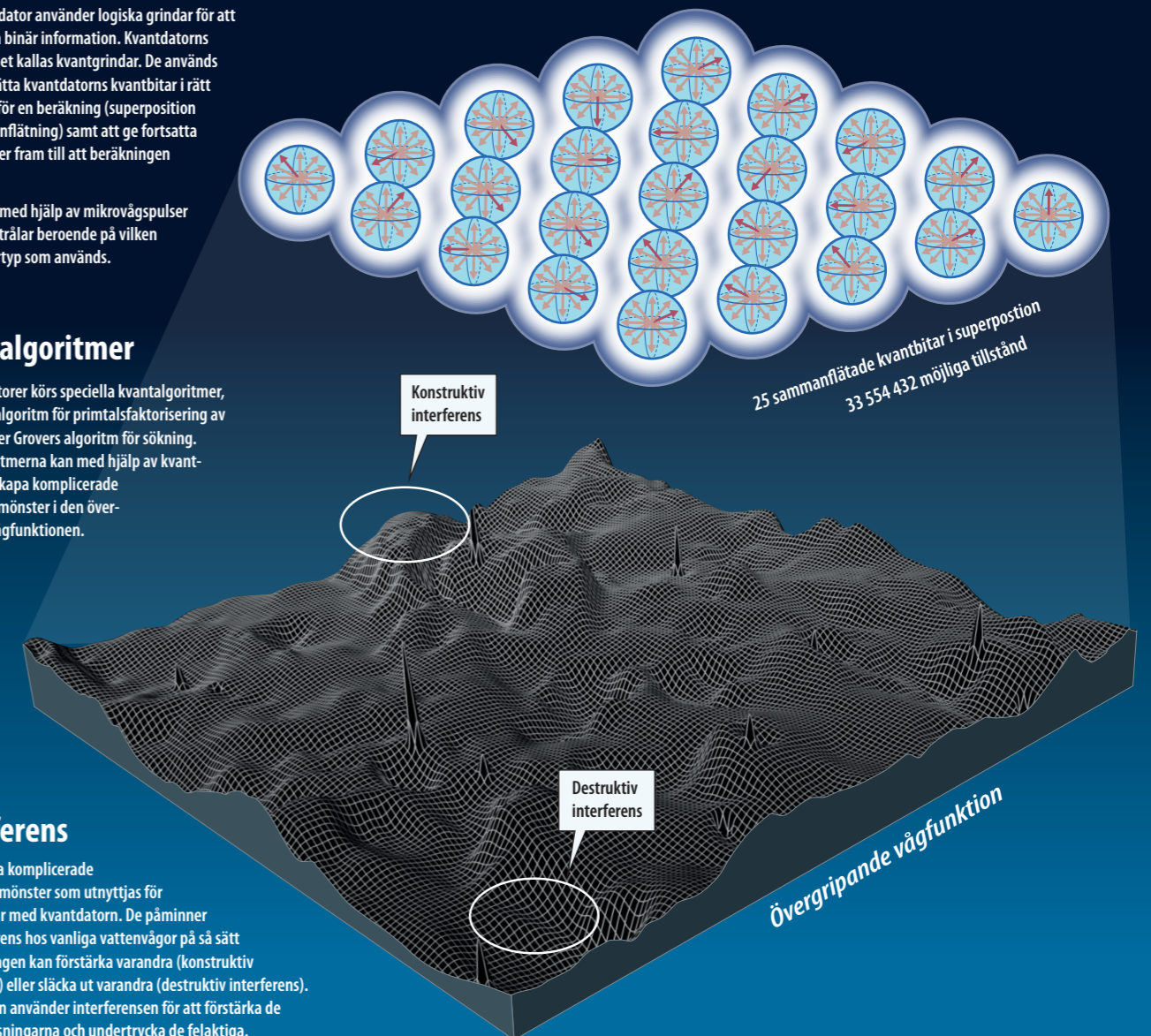
### Kvantgrindar

En klassisk dator använder logiska grindar för att manipulera binär information. Kvantdatorns motsvarighet kallas kvantgrindar. De används för att försätta kvantdatorns kvantbitar i rätt tillstånd inför en beräkning (superposition och sammanflätning) samt att ge fortsatta instruktioner fram till att beräkningen är slutförd.

Detta görs med hjälp av mikrovågspulser eller laserstrålar beroende på vilken kvantdatortyp som används.

### Kvantalgoritmer

På kvantdatorer körs speciella kvantalgoritmer, som Shors algoritim för primtalsfaktorisering av stora tal eller Grovers algoritim för sökning. Kvantalgoritmerna kan med hjälp av kvantgrindarna skapa komplicerade interferensmönster i den övergripande vågfunktionen.



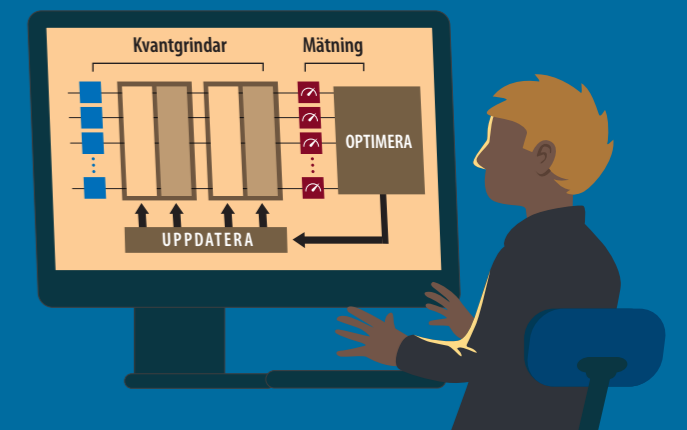
### Interferens

Det är dessa komplicerade interferensmönster som utnyttjas för beräkningar med kvantdatorn. De påminner om interferens hos vanliga vattenvågor på så sätt att de antingen kan förstärka varandra (konstruktiv interferens) eller släcka ut varandra (destruktiv interferens). Kvantdatorn använder interferensen för att förstärka de korrekta lösningarna och undertrycka de felaktiga.

### Mätning

Det avslutande momentet är att göra en mätning för att utvinna beräkningsresultatet. Kvantdatorn befinner sig i superposition av många värden innan mätningen görs. Det är själva mätningen som får kvantbitarnas tillstånd att kollapsa till ett specifikt svar.

Många kvantalgoritmer kräver att dessa steg upprepas flera gånger för att så mycket som möjligt optimera de önskade resultaten genom upprepad konstruktiv kvantinterferens. Trots alla dessa upprepningar skulle en välfungerande kvantdator vara mycket effektivare än en klassisk dator för vissa typer av beräkningar.



Källor: Chalmers tekniska högskola, [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_computing](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_computing)



# Kvantsimulering

Det traditionella sättet att utveckla nya ämnen har varit att med tålamod och i bland med slumpens hjälp kombinera grundämnen till molekyler som i sin tur kombineras till nya, mer komplexa strukturer. Idag kan man ta hjälp av kraftfulla datorer för att prova nya intressanta materialkombinationer, men att verkligen simulera ett kvantmekaniskt system blir snart övermäktigt för en klassisk dator.

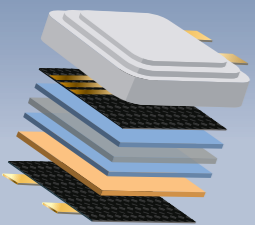


Källa: Chalmers tekniska högskola

## Kvantdatorn som kvantsimulator

En kvantsimulator är i grunden en kvantdator som specialdesignats för att simulera en viss process. Tanken bygger på att ett kvantmekaniskt system med ett visst antal komponenter skulle kunna efterlikna ett annat kvantmekaniskt system med samma antal komponenter. En välfungerande kvantdator med tillräckligt många fungerande kvantbitar skulle då i princip kunna anpassas för att simulera vilket kvantmekaniskt system som helst. Detta ligger dock troligtvis många år fram i tiden då en välfungerande kvantsimulator delar många tekniska utmaningar med kvantdatorn.

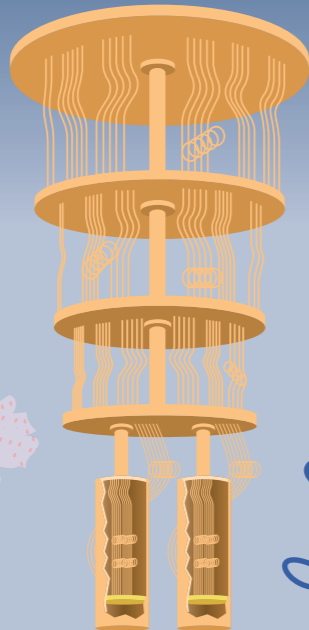
Nya komplexa material eller nya materialkombinationer, exempelvis för batterier



Energieffektivare tillverkning av gödningsmedel



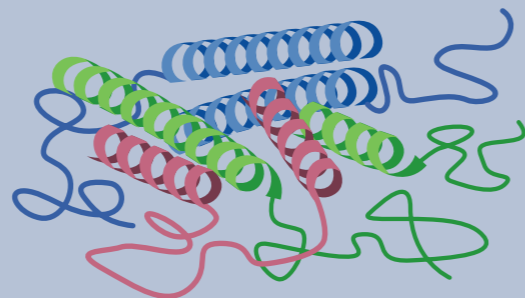
Möjliga tillämpningar för kvantsimulator



Nya läkemedel



Hitta 3D-strukturer för olika proteiner vid proteinveckning



# Kvantkommunikation

Vårt digitala internetbaserade samhälle bygger på överföring av säker, krypterad information. Idag används kryptering som är baserad på tunga matematiska räkneproblem, exempelvis att hitta primtalsfaktorerna i mycket stora tal. Men i takt med att kvantdatorer gör framsteg kan det bli möjligt att knäcka de krypteringsmetoder som anses säkra idag. Men kvantteknologin erbjuder också en lösning i form av säker kvantnyckeldistribution som baseras på enstaka fotoner.

## Fotoner och kvantnyckeldistribution

Vid kvantnyckeldistribution kan man använda fotoner. De har en kvantegenskap som kallas polarisation som kan manipuleras och mätas genom så kallade polarisationsfilter. De olika polariseringsstillstånden kan användas som ettor och nollor vid dataöverföring.

Men enligt kvantfysikens lagar är det omöjligt att mäta eller kopiera ett okänt tillstånd hos en kvantpartikel utan att märkbart ändra det, enligt det så kallade "no-cloning theorem". Därför kan man vara säkra på att upptäcka om en utomstående försöker stjäla krypteringsnyckeln.



## Kvantkanaler och kvantnätverk

Ett framtida kvantinternet skulle fritt kunna distribuera dessa kvantkryptonycklar men också fungera som en resurs som exempelvis skulle kunna länka samman flera kvantdatorer och därmed skapa en distribuerad kvantdator med fler kvantbitar. En del svåra tekniska problem återstår dock att lösa.

För att skicka enskilda fotoner krävs en optisk kvantkanal. Men dagens bästa optiska fiber förlorar minst 90 procent av signalen efter drygt 60 kilometer. Vid klassisk fiberkommunikation kompenseras man detta med optiska förstärkare på mellan fem och tio mils avstånd mellan varandra. Men som vi såg ovan är det omöjligt att mäta eller kopiera ett okänt tillstånd hos en enskild kvantpartikel utan att märkbart påverka det. Vanliga optiska förstärkare går därför inte att använda.

## Säkra noder

Dagens kommersiella system för kvantnyckeldistribution är därför i praktiken begränsade till avstånd kring 15 mil som bäst mellan två punkter. För att komma längre finns två alternativ. Det ena är att ha skyddade noder där man kan vidarebefordra genom att dekryptera och omkryptera informationen. Det andra alternativet är kvantrepeaterare som bryter ner sträckan i kortare länkar.

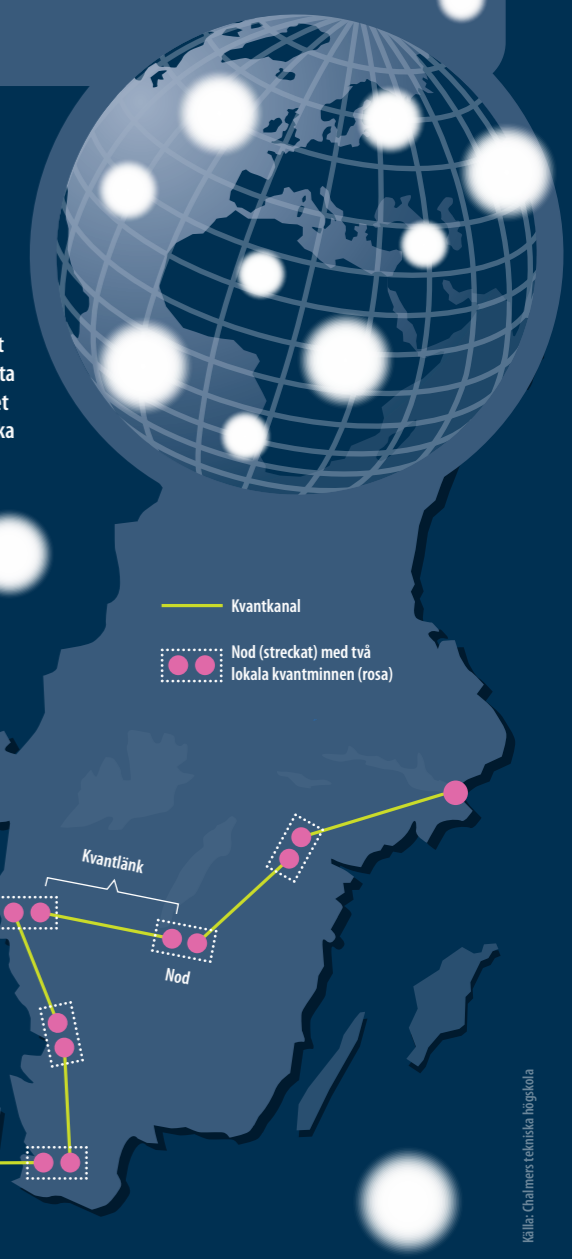
## Kvantrepeaterare

Kvantrepeaterare är avancerade kvantmekaniska system som utnyttjar kvantfenomen som sammanflätning, kvantteleportering och kvantminnen.

Varje kvantlänk består av en kvantkanal (grön linje) med två kvantminnen (rosa punkter) i varje ända som kan lagra sammanflätade fotoner. Varje nod i kedjan (vitstreckade fyrkanter) består av två lokala kvantminnen.

Kvantteleportering mellan kvantbitarna som är lagrade i de lokala noderna (så kallad entanglement swapping) möjliggör att skapa kvantkommunikation, exempelvis mellan ändpunkterna Stockholm-Köpenhamn.

För att bygga en sådan fungerande kvantrepeaterare måste flera teknologier utvecklas såsom kvantminnen för fotoner, källor för sammanflätade fotoner specialdesignade för kvantminnen och effektiva metoder för kvantteleportering.



Källa: Chalmers tekniska högskola

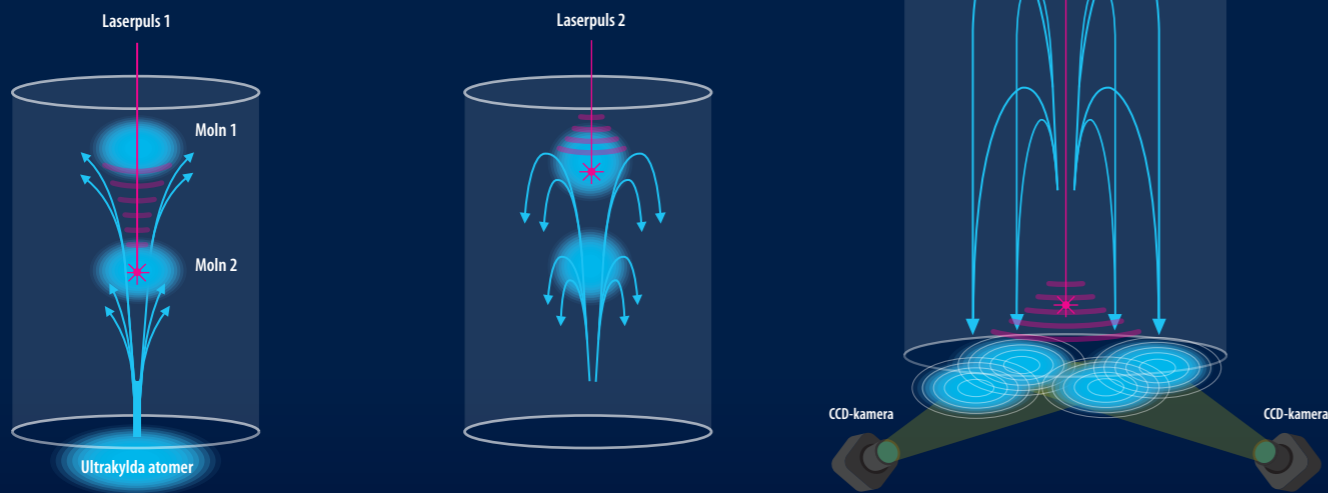


# Kvantsensorer

Kvantsensorer använder kvantpartiklar som exempelvis fotoner och elektroner eller atomer för mätningar av olika krafter som tryck, gravitation och magnetiska eller elektriska fält. De utnyttjar det faktum att kvanttillstånd är ytterst känsliga för ändringar i deras omgivning – det betyder att de också har potential att bli väldigt känsliga mätinstrument.

## Atominterferometrar

Atominterferometrar utnyttjar kvantinterferensen från ultrakalla atomära materiavågor. Dessa delas upp i två eller flera banor som sedan återkombineras efter interaktion med en av banorna. Grundprincipen påminner mycket hos den man finner hos optiska interferometrar men atominterferometrar använder betydligt högre frekvenser och kan på så sätt uppnå extrem precision.



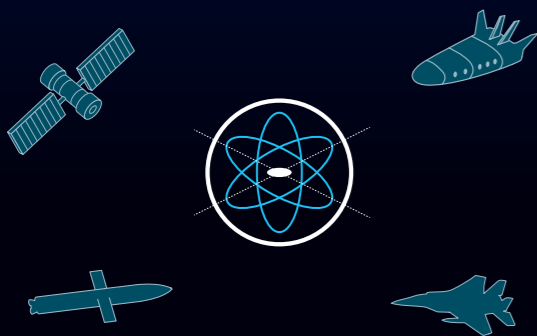
Ett moln av ultrakalla atomer skjuts upp i en behållare. En laserpuls delar upp molnet i två separata moln.

Uppe i behållaren reflekteras molnen sedan ned av en andra laserpuls.

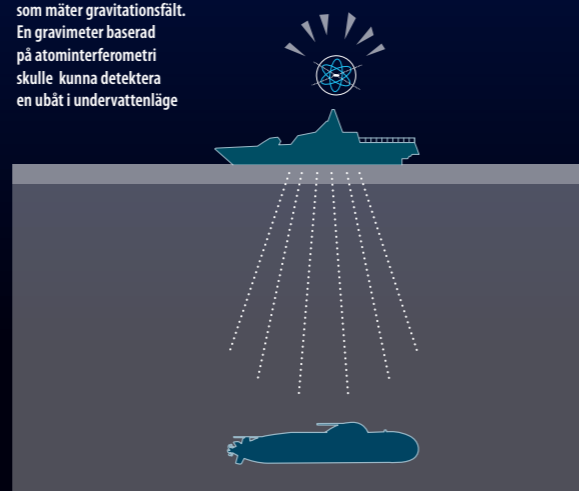
En tredje laserpuls återkombinerar molnen när de når botten. Ett interferensmönster uppstår som kan registreras via CCD-kameror.

## Tillämpningar

Atominterferometern skulle kunna känna av acceleration, rotation och gravitation med extrem precision. Det skulle tillåta att bygga utrustning för tröghetsnavigation som skulle slippa ständig omkalibrering.

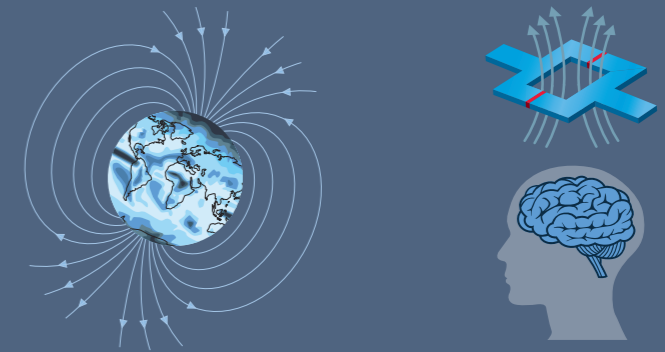


Gravimetrar är instrument som mäter gravitationsfält. En gravimeter baserad på atominterferometri skulle kunna detektera en ubåt i undervattenläge



## Magnetometrar

Kvantbaserade magnetometrar utnyttjar egenskaper hos atomer eller joner för att mäta styrkan och ibland riktningen hos magnetiska fält. Det finns olika typer av magnetometrar med olika för- och nackdelar.



### NV-center

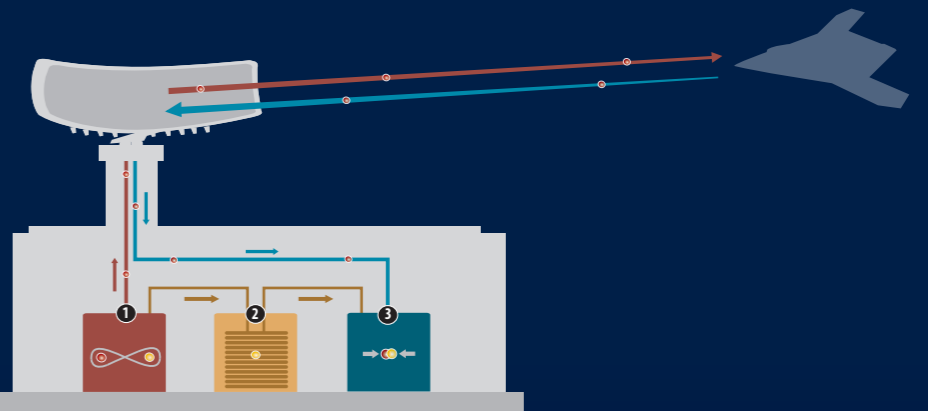
Ett sätt att mäta magnetfält är att utnyttja speciella elektron-tillstånd hos så kallade NV-center (Nitrogen Vacancycenter). NV-center kan uppstå i diamanter där en kolatom ersatts av en kväveatom.

Ultrakänsliga magnetometrar kan registrera det vanliga magnetfältet längs polerna tillsammans med svagare lokala effekter från exempelvis magnetiska berglager och på så sätt användas för positionering.

Ett annat möjligt användningsområde är att mäta ytterst svaga magnetiska förändringar kroppen som till exempel hjärnan med hjälp av så kallade SQUIDSs (Superconducting Quantum Interference Devices).

## Kvantradar

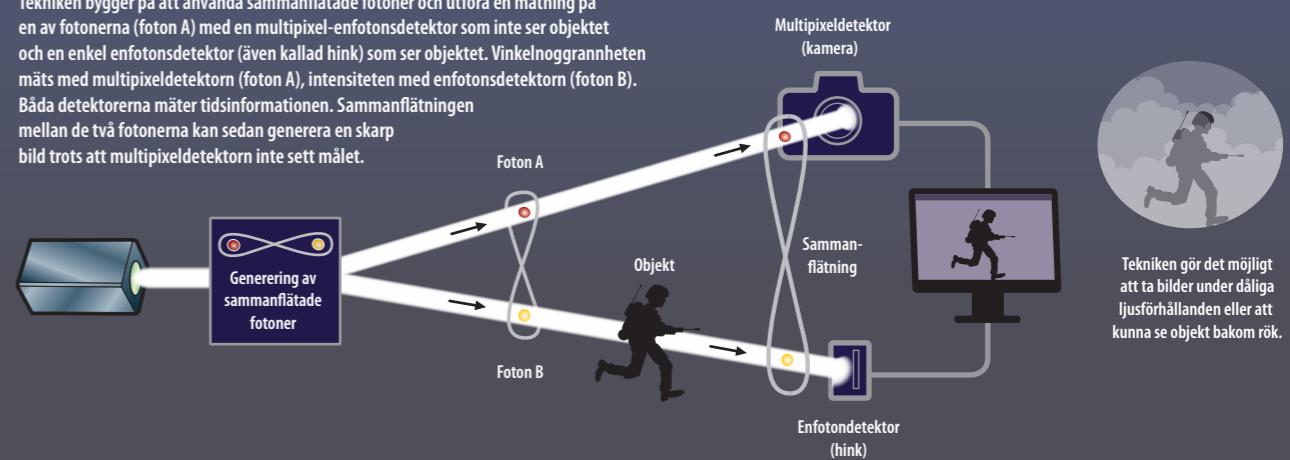
Kvantradararnas princip bygger på att förbättra radarns prestanda genom att utnyttja sammanflätning mellan mikrovågspulser för att på så sätt lättare upptäcka mål i det omgivande bakgrundsbruset. Det krävs dock mycket forskning innan en fungerande kvantradar eventuellt kan tas i bruk.



- 1 I en generator skapas ett mikrovågspulspar som är sammanflätat. En av pulserna skickas mot målet.
- 2 Samtidigt håller man kvar den andra mikrovågspulsen i en fördröjningslinje.
- 3 När den ivägskickade mikrovågspulsen återvänder jämförs den med pulsen som varit kvar i fördröjningslinjen. Korrelationen mellan de båda gör att målet kan framträda tydligare.

## Kvantavbildning (spökavbilder)

Tekniken bygger på att använda sammanflätade fotoner och utföra en mätning på en av fotonerna (foton A) med en multipixel-enfotonsdetektor som inte ser objektet och en enkel enfotonsdetektor (även kallad hink) som ser objektet. Vinkelnoggrannheten mäts med multipixeldetektorn (foton A), intensiteten med enfotonsdetektorn (foton B). Båda detektorerna mäter tidsinformationen. Sammanflätningen mellan de två fotonerna kan sedan generera en skarp bild trots att multipixeldetektorn inte sett målet.



Tekniken gör det möjligt att ta bilder under dåliga ljusförhållanden eller att kunna se objekt bakom rök.

Källor: Chalmers tekniska högskola, KTH, LTH, [https://en.wikipedia.org/wiki/Atom\\_interferometer](https://en.wikipedia.org/wiki/Atom_interferometer), [https://en.wikipedia.org/wiki/Ghost\\_imaging](https://en.wikipedia.org/wiki/Ghost_imaging), APS American Physical Society, Science



## ORDLISTA

### **Betrodda QKD-nätverk (Trusted-node QKD network)**

Nätverk där man utgår från att några eller alla noder är säkra från avlyssning.

### **Bose–Einstein-kondensat (Bose–Einstein condensate)**

Ett aggregationstillstånd som bygger på att kyla speciella kvantpartiklar, kallade bosoner, till extremt låga temperaturer där alla partiklar går samman och uppför sig som ett enda sammanhängande kvantsystem.

### **Dekoherens (Quantum decoherence)**

Betecknar förlust av kvantkoherens hos ett kvantsystem – exempelvis superpositionstillstånd hos en kvantbit – på grund av störningar som värme, strålning eller andra partiklar.

### **Entanglement swapping**

Entanglement swapping innebär teleportering av sammanflätning till två fotoner som producerades oberoende och aldrig tidigare interagerat med varandra.

### **Klämt tillstånd (squeezed state)**

Kvantprincip som innebär att det finns en gräns för hur noggrant det går att samtidigt känna till positionen och hastigheten (så kallade sammanlänkade variabler) för ett kvantobjekt. Gäller även andra sammanlänkade variabler, till exempel frekvens och tid. Kallas även Heisenbergs osäkerhetsprincip.

### **Kvantalgoritm (Quantum algorithm)**

Speciell algoritm skriven för kvantdator eller kvantsimulator. Ett känt exempel är Shors algoritm för primtalsfaktorer.

### **Kvantbit (qubit)**

Grundläggande enhet för att kunna bygga en kvantdator. Kvantbitar kan existera i ett tillstånd kallat superposition, vilket betyder att de kan vara i en kombination av 0 och 1 samtidigt. Detta till skillnad från en klassisk bit i en klassisk dator.

### **Kvantfelkorrigering**

Teknik där man använder man många brusiga fysiska kvantbitar för att skapa en felrättad logisk beräkningskvantbit.

### **Kvantgrind (quantum gate)**

Grundläggande kvantfunktion som påverkar kvantbitarna i en kvantdator. De är byggstenarna i kvantkretsar, precis som klassiska logiska grindar är för konventionella digitala kretsar.

### **Kvantnyckeldistribution (Quantum key distribution, QKD)**

Kommunikationsmetod som med hjälp av kvantfenomen och ett kryptografiskt protokoll gör det omöjligt för en angripare att avlyssna eller påverka en kanal där kvanttillstånd sänds mellan två parter, utan att enligt de kvantfysiska lagarna påverka överföringen och därmed upptäckas.

### **Kvantrepeater (Quantum Repeaters)**

Eftersom kvanttillstånd inte kan kopieras (No-cloning theorem), är klassisk signalförstärkning inte möjlig. En kvantrepeater utnyttjar kvantfenomen som sammanflätning, kvantteleportering och kvantminnen för att bryta ner en lång kvantkanal till kortare delsträckor utan förluster på grund av dekhorens uppstår.

### **Kvantsensor (Quantum sensor)**

Använder kvantpartiklar som exempelvis fotoner och elektroner eller atomer för mätningar av olika krafter som tryck, gravitation och magnetiska eller elektriska fält.

### **Kvantsimulator**

I grunden en kvantdator som specialdesignats för att simulera en viss kvantmekanisk process.

### **Kvanttillstånd (quantum state)**

Eller kvantmekaniskt tillstånd. Är en kvantmekanisk beskrivning av tillståndet för ett fysikaliskt system. Utgör tillsammans med observabler grunden för kvantteorin.

### **Laserkyllning (laser cooling)**

En metod för att sänka temperaturen i en gas med hjälp av ljus. Avgörande för supraledande kvantdatorer för att bibehålla kvantegenskaperna hos kvantbitarna.

### **Lidar (Light detection and ranging)**

Ett optiskt mätinstrument som påminner om radar men som använder ljus istället för radiovågor.

### **No-cloning theorem**

Teorem som föreskriver att det är omöjligt att skapa en oberoende och identisk kopia av ett okänt kvanttillstånd.

### **Partikelvågduallitet (wave-particle duality)**

Innebär att kvantmekaniska system som exempelvis ljus eller elementarpartiklar, kan uppvisa både vågegenskaper och partikelegenskaper.

### **Plancks konstant, h (Planck constant)**

En fysikalisk konstant förekommande i kvantmekaniska ekvationer. Den beskriver beteendet hos partiklar och vågor på atomär skala, inklusive partikelaspekten av ljus.

### **Polarisation (polarisation)**

Polarisering av elektromagnetiska vågor (exempelvis synligt ljus) innebär att vågens elektriska fält är samlade i ett enda plan utmed ljusets axel.

### **Sammanflätad fotonkälla (entangled photon source, EPS)**

En källa som genererar sammanflätade fotoner.

### **Sammanflätning eller kvantsammanflätning (entanglement)**

En speciell typ av superposition som innebär en stark korrelation mellan två eller flera partiklar. Sammanflätningen kvarstår även om partiklarna separeras över mycket stora avstånd.

### **Shors algoritm (Shor’s Algorithm)**

Banbrytande kvantdatoralgoritm för att hitta primtalsfaktorerna för ett heltal.

### **Spinn (Spin)**

Spinn är ett rörelsemängdsmoment en partikel har utöver sitt banrörelsemängdsmoment. Har inget med vanlig rotation att göra utan syftar på en hypotetisk egenrotation. Detta är i sin tur kopplat till att vissa material är magnetiska.

## FAKTAGRANSKNING

### **Superposition (superposition principle)**

Kan i kvantvärlden beteckna kvantfenomen. Exempelvis en kvantbits förmåga att vara i en kombination av 0 och 1 samtidigt eller att två kvantpartiklar är sammanflätade.

### **Supersolid (supersolid)**

Ett speciellt kvanttillstånd där partiklar är ordnade i en kristallin struktur som vanlig fast materia – men där de också kan flyta med noll viskositet, som en supervätska.

### **Supervätska (superfluid)**

En superfluid eller supervätska karaktäriseras av att den är en vätska helt utan viskositet.

### **SQUID (superconducting quantum interference device)**

Supraledande krets som kan användas för att mäta extremt svaga magnetfält, exempelvis magnetiska förändringar i hjärnan.

### **Tunnling (tunneling)**

Ett fenomen som innebär att kvantmekaniska partiklar har en förmåga att passera genom hinder på ett sätt som klassisk fysik inte tillåter.

### **Våg-partikeldualitet (wave-particle duality)**

Innebär att kvantmekaniska system som exempelvis ljus eller elementarpartiklar, kan uppvisa både vågegenskaper och partikelegenskaper.

**Göran Johansson** - professor i tillämpad kvantfysik på Chalmers tekniska högskola.

Sidorna: 6–7, 11, 16, 18–19, 20–21, 76–77, 78, 79 samt nedre delen av sid 75.

**Victor Torres Company** - biträdande professor vid avdelningen för fotonik, Chalmers tekniska högskola.

Sidorna: 24–25.

**Haitham El-Ella** – doktor i halvledarteknik och kvantsystem.

Sidorna: 30–31.

**Stephanie Reimann** - professor vid avdelningen för matematisk fysik, LTH, Lunds universitet.

Sidorna 36–37, 80 samt bilden om magnetometer på sidan 81.

**Theodor Staffas** - doktorand på avdelningen för tillämpad fysik vid Kungliga Tekniska Högskolan, KTH

Sidorna 44, 46 samt bilden om kvantavbildning på sidan 81.

**Lars-Göran Johansson** - emeritus professor i teoretisk filosofi vid Uppsala Universitet.

Sidan: 56.

**Martin Ekerå** - chefskryptolog på Militära underrättelse- och säkerhetstjänsten, Must.

Sidan 74 och övre delen av sidan 75.

**Robert Jonsson** - Saab Surveillance. Bilden om kvantradar på sidan 81.

## LÄSTIPS

**Kvantfysiken och livet: våra innersta mekanismer och världarna omkring oss.** Volantes, 2020.

**Empiricism and Philosophy of Physics.** Springer, Cham, 2021.

**Att förstå kvantmekaniken. En hjälp till fysikstudenter,** 2a Upplagan Thales, Stockholm, 2023.



## Rapporten är sammanställd av FoT-projektet Omvärldsbevakning med teknisk prognos.

**TEXT:** Jan-Ivar Askelin

**GRAFIK:** Martin Ek

**GRAFISK FORM:** Peter Ehrlin

**FOTO:** Jan-Ivar Askelin om inget annat anges

**TRYCK:** FMLOG Försörjning Grafisk Produktion

FMV dokumentbeteckning: 22FMV1402-25

November 2023