

KVANTEMAGNETER

- Magneter når de er allermindst

Verdens mindste magneter består af ganske få atomer. På denne skala kan vi observere mærkelige fænomener, fordi atomerne både kan opføre sig som partikler og som bølger. Vi står nu på tærsklen til at kunne udnytte dette i nye former for kvanteteknologi.

Forfatterne



Amin S. Dehkharghani er ph.d.-studerende
aminsd@phys.au.dk



Niels Jakob Søe Loft er ph.d.-studerende
nsl@phys.au.dk



Nikolaj Thomas Zinner er lektor i teoretisk fysik
zinner@phys.au.dk

Alle ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Kvantemagnetisme er et fænomen, der opstår, når enkelte atomer opfører sig som bittesmå magneter. På atomniveau er stof generelt underlagt helt andre fysiske love, og vi skal have fat i kvantemekanikken for at forstå, hvorfor tingene opfører sig, som de gør. I den kvantemekaniske verden skal partikler ofte opfattes som bølger, og dette giver anledning til mange ikke-intuitive fænomener, som »man egentlig bare skal vænne sig til«, som den amerikanske fysiker og Nobelpristager Richard Feynman formulerede det. Vores egen Niels Bohr skal også engang have sagt, at man umuligt kunne tænke over kvantemekanikken uden at blive lidt svimmel.

Den klassiske magnetisme kender vi alle sammen fra magneterne på køleskabet til de indbyggede magneter i højtalere og harddiske. Selvom man længe har kendt til magnetisme og udnyttet den i fx kompasset, så var det først i oplysningstiden, at naturforskere rigtig begyndte at forstå dens rolle i naturen. En lang række eksperimenter udført i løbet af 1800-tallet gav

flere og flere brikker til puslespillet, bl.a. opdagede danskeren H. C. Ørsted, at en elektrisk strøm giver ophav til magnetiske felter. Noget tydede derfor på, at der var et tæt samspil mellem elektrisk strøm og magnetisme. Det var imidlertid skotten James Clerk Maxwell, der som den første indså den røde tråd i samspillet mellem elektriske og magnetiske felter. Han samlede så at sige puslespielsbrikkerne i en række ligninger, der gav en samlet og konsistent beskrivelse af elektromagnetismen.

Maxwells teoretiske mesterværk afsluttede på smuk vis bestræbelserne på at forstå de elektriske og magnetiske fænomener og deres samspil. Generelt var optimismen stor blandt fysikere i slutningen af 1800-tallet. Ud over nogle enkelte eksperimentelle observationer, som man ikke havde fornuftige forklaringer på, så det ud til, at man havde forstået, hvordan verden i bund og grund hang sammen. Lord Kelvin udtalte således selvsikkert i år 1900, at: »der ikke var mere fysik at opdage. Det eneste, der er tilbage, er at udføre mere og mere præcise målinger.«

Magnetisme på atomart niveau

Lord Kelvin kunne ikke have taget mere fejl. I starten af 1900-tallet viste det sig, at de »småting«, man ikke havde forstået, åbnede en helt ny verden for fysikerne: Den mikroskopiske verden af atomer, elektroner og fotoner (lyspartikler), som ikke lod sig beskrive af de gængse fysiske teorier. Den nye teori, der blev udviklet til at forklare den mikroskopiske verden, fik navnet kvantemekanik (kvant = mindste enhed). Selvom teorien fik fast matematisk grund under fødderne, så var dens fysiske indhold til tider svær at forstå og kunne bryde med almindelig intuition. Ikke desto mindre er kvantemekanikken, så vidt vides, helt konsistent og fri for paradokser! Kvantemekanikens enorme succes illustrerede tydeligt, at verden dybest set skulle forstås kvantemekanisk. For magnetismens vedkommende var dette umiddelbart et problem, fordi man ikke kunne forklare, hvorfor atomerne i nogle stoffer gav anledning til magnetisme, mens andre ikke gjorde.

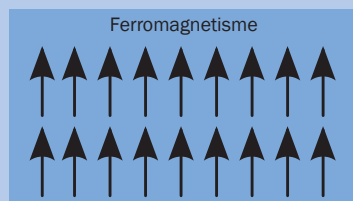
Løsningen på problemet var erkendelsen af, at kvantemekaniske



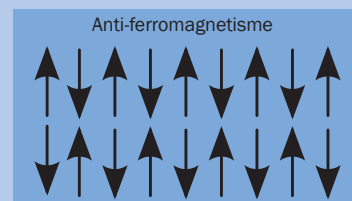
Magnetisme på mikroskopisk niveau

Når en klump jern er magnetisk, skyldes det vekselvirkninger på mikroskopisk niveau mellem de enkelte jernatomer. Hvert jernatom har et mikroskopisk lille magnetisk moment, men når atomerne vekselvirker med de omkringliggende atomer, vil de orientere sig, så de mange små magnetiske momenter peger i samme retning. Derved dannes store områder i jernet, hvor alle atomernes magnetiske momenter peger i samme retning og tilsammen danner et stort magnetisk moment. Dette kaldes ferromagnetisme. En anden type magnetisme, hvor atomernes (eller molekylernes) magnetiske momenter skiftevis peger op og ned i forhold til hinanden, kaldes antiferromagnetisme. De mange mikroskopiske magnetiske momenter udslukker parvist hinanden, og antiferromagnetiske materialer som jernmangan (FeMn) og nikkeloxid (NiO) opleves altså ikke direkte magnetiske på samme måde som jern.

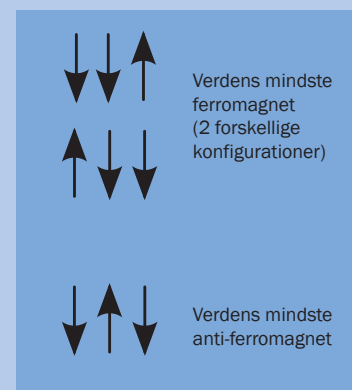
I de en-dimensionelle systemer, vi studerer, danner atomerne typisk



en lignende magnetisk struktur. I vores systemer er det atomernes spin, der udgør det magnetiske moment, og det kan pege i to retninger. Enten ordner atomerne sig i grupper med samme spinorientering og udviser dermed ferromagnetisk opførsel, eller de placerer sig skiftevis med spin op og ned, dvs. ordner sig i en antiferromagnetisk struktur. To atomer med hver sin spinorientering (op og ned) er ikke nok til at danne en magnet, fordi der kun er én mulig konfiguration af de to atomer: At de sidder ved siden af hinanden. Men så snart vi tilføjer et tredje atom (fx med spin op), er der to mulige konfigurationer: De to spin-op-atomer kan sidde ved siden af hinanden (ferromagnetisk), eller de kan sidde på hver sin side



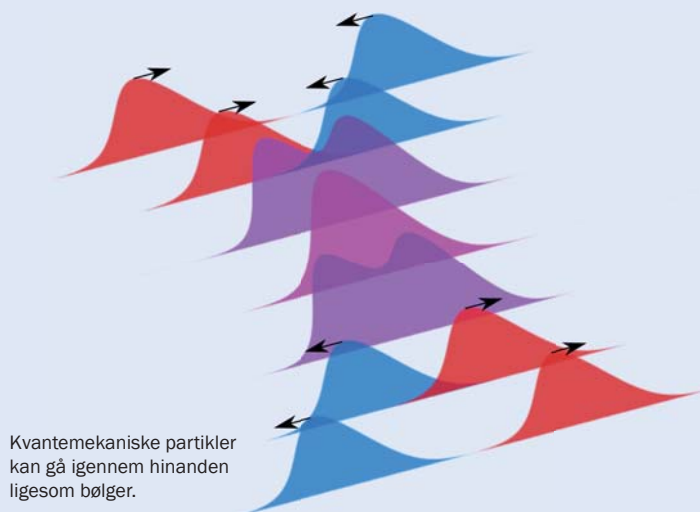
af spin-ned-atomet (antiferromagnetisk). Man kan således hævde, at verdens mindste magnet består af kun tre atomer. Når man tilføjer flere atomer, er det interessant at studere deres konfiguration og se, hvordan magneten opbygges atom for atom.



Partikel-bølge-dualitet

En af fysikkens største opdagelser er, at alt fra lys til elektroner og atomer både opfører sig som partikler og bølger på samme tid. Det kan lyde meget skørt, for i vores hverdag er partikelegenskaber og bølgeegenskaber vidt forskellige. En fodbold opfører sig som en partikel: den er hård, og man kan sparke til den, og det er nemt at sige, hvor den befinder sig. Derimod opfører vandbølger sig meget anderledes: De kan spredes gennem små huller og endda gå igennem hinanden. Så hvorfor overhovedet blande de to ting med hinanden?

Historisk set var det Albert Einstein, der i 1905 først fremlagde idéen om at tænke på bølger som partikler. På den tid havde man svært ved at forklare den fotoelektriske effekt – en effekt, hvor lys er i stand til at slå elektroner løs fra en metaloverflade – ud fra de gængse teorier. Einstein foreslog, at man kunne tænke på lys som en strøm af partikler, kaldet fotoner, og dette kunne forklare den fotoelektriske effekt. Langt senere, i 1924, kom franskmænd Louis de Broglie med et kontroversielt postulat, idet han foreslog, at partikler som elektroner og atomer også kunne opføre sig som bølger. Dermed etablerede han idéen om partikel-bølge-dualitet, altså at både bølge- og partikelegenskaber er en fundamental del af alt stofs natur, hvad enten det gælder lys, elektroner eller atomer. Mange eksperimenter har siden vist, at partikler rent faktisk opfører



sig som bølger, og dermed blev partikel-bølge-dualitet en bredt accepteret kendsgerning. Når atomers bølgenatur normalt ikke kommer til udtryk, skyldes det, at bølgerne er meget små. Kun når vi er på atomar skala er bølgenaturen vigtig, men så snart vi zoomer væk, bliver bølgerne relativt små, og de ligner vel-lokaliserede partikler.

Bølgeegenskaberne gør det også utrolig svært at arbejde med subatomare partikler, da de kan være helt ustyrlige og sprede sig over det hele som en væske, der løber

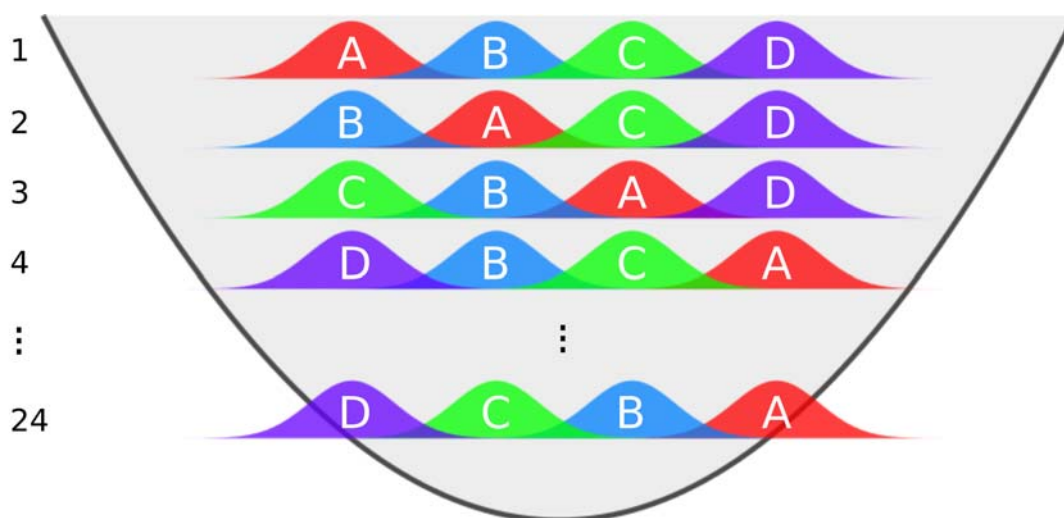
ud på jorden. Men fastholder man partiklerne i én dimension (1D), kan man til en vis grad tæmme partiklerne og præcisere deres position i forhold til hinanden. Det specielle ved 1D-systemer i forhold til 2D og 3D er, at partiklerne kun kan bytte plads med hinanden ved at gå igennem hinanden, da de ellers kan undvige hinanden. Men i modsætning til hårde "partikel-perler", så tillader partiklernes kvantemekaniske bølgenatur, at de bytter plads, danner én kæmpeperle eller transporterer en af perlerne fra den ene ende til den anden.

partikler som atomer og elektroner besidder en egenskab kaldet spin. Partiklens spin giver den et magnetisk moment, hvilket gør den til en lillebitte magnet – dog med et magnetfelt, som er umådeligt svagt. Hvis atomerne blot farer tilfældigt rundt mellem hinanden som i en gas, vil alle magnetfelterne pege i alle mulige retninger, og de vil alt i alt udslukke hinanden. Hvis atomer-

ne ordner sig i en gitterstruktur og dermed udgør et fast stykke stof, fx en stangmagnet, kan atomernes individuelle magnetfelter kollektivt ordne sig på forskellig vis, hvilket kan give ophav til et makroskopisk magnetisk felt.

Det var Werner Heisenberg, en af kvantemekanikkens fædre, der som den første i 1928 løste gåden om

magnetismens ophav. Han lavede en fysisk model, hvori det er fordelagtigt for elektronernes spin at vende i en bestemt retning i forhold til naboerne. Elektronernes spin bidrager til atomernes samlede magnetiske momenter, der altså pga. elektronernes vekselvirkning med hinanden kan vende i bestemte retninger i forhold til hinanden. Derved forstod man, at visse



Fire forskellige atomer fanget i en en-dimensionel fælde kan arrangere sig på 24 forskellige måder. Systemet vil søge den tilstand, der er mindst energirig, og dette bestemmer rækkefølgen af atomerne.

materialer havde tendens til at danne ferromagneter (hvor atomer med magnetisk moment i samme retning grupperer sig sammen), antiferromagneter (hvor atomernes magnetiske momenter er skiftevis modsatrettede), eller nogle "mellemliggende" tilstande, som ikke er pænt ordnede. Heisenbergs model for magnetisme på atomart niveau var meget succesfuld, og trods sin umiddelbare simplicitet har den et rigt fysisk indhold og studeres stadig i stor stil.

De seneste 10 år er der opstået fornyet interesse for Heisenbergs model i atomfysikken, fordi eksperimentalfysikere er blevet så dygtige til at manipulere med enkelte atomer, at man kan studere magneter bestående af blot nogle få atomer.

Perler på en snor

I vores forskningsgruppe på Aarhus Universitet, Institut for Fysik og Astronomi, arbejder vi med den teoretiske beskrivelse af en-dimensionelle magneter bestående af nogle få atomer. Vi bygger altså på en måde videre på Werner Heisenbergs arbejde om atomar magnetisme, men i én dimension. Eksperimentalfysikere kan fange atomer i fælder lavet af laserstråler, og ved at gøre fælden lang og tynd som en cigar sikrer man sig, at atomerne i praksis kun kan bevæge sig i én dimension. Ydermere gør man fælden parabelformet på den lange

led, således at atomerne ikke ryger for langt væk fra hinanden. Når atomerne nu er bundet i én dimension og sidder som perler på en snor, er det klart, at de kun kan bytte plads ved at gå igennem hinanden. Men i modsætningen til perler, som er hårde, så tillader kvantemekanikken, at atomerne opfører sig som bølger, og dermed trænger igennem hinanden.

Siden det er tilladt for atomerne at bytte plads, er det interessant at studere, hvilken konfiguration, de helst arrangerer sig i. Ligesom man bruger Newtons 2. lov til at beskrive fx en fodbolds bevægelse i rummet, bruger man til at beskrive kvantemekaniske systemer af atomer en ligning kaldet Schrödingers ligning. Ved hjælp af Schrödingers ligning har vi vist, hvordan partiklerne placerer sig efter en bestemt rækkefølge, som det kræver mindst mulig energi for det samlede system at være i.

Hvis vi fx har fire atomer (A, B, C og D) siddende på en række i en parabelformet fælde, så kan vi beregne, i hvilken rækkefølge atomerne vil placere sig. Fire atomer giver anledning til $4! = 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 = 24$ forskellige kombinationer, som atomerne kan ordne sig i. Den kvikke læser kan hurtigt indse, at N atomer kan arrangeres på $N! = N \cdot (N-1) \cdot \dots \cdot 2 \cdot 1$ forskellige måder, hvilket generelt er et ret højt antal. Men med vores

metoder, kan vi helt nøjagtigt beregne, hvilken rækkefølge der er mest energifavorabel for atomerne at sætte sig i, alt afhængig af atomtypen og deres tilstand.

Man kan også lege med omgivelserne eller begynde at manipulere med atomerne, så de ordner sig i den rækkefølge, vi ønsker. Ved at ændre på fældens form og atomernes vekselvirkning kan vi vise, at de mest favorable konfigurationer ændrer sig, og således kan vi næsten fremprovokere en given atomrækkefølge. Dermed kan vi bedre kontrollere den ellers så tilfældige kvanteverden og bedre forstå, hvordan naturlige materialer såsom magneter er opbygget og måske i fremtiden bygge nye materialer helt fra bunden.

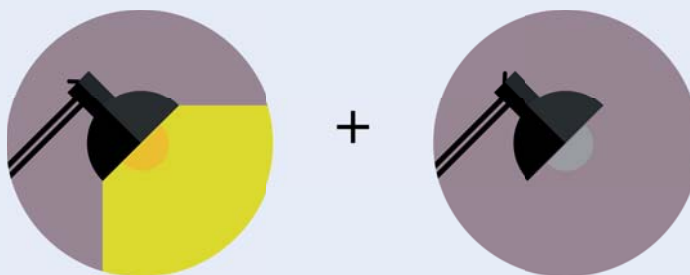
Fra elektronik til spintronik

En ting er, hvordan mikroskopiske magneter er opbygget, noget andet er, hvordan de ændrer sig over tid. Hvis du fx placerer en bold på en skråning og giver slip, begynder den at trille nedad, fordi systemet med bolden på skråningen ikke længere befinder sig i en stabil tilstand. En af fysikkens væsentligste opgaver er at beskrive, hvad der sker, når systemer ikke er i stabile tilstande – fx hvor lang tid går der, før bolden når foden af skråningen, hvad dens fart er osv. På samme vis kan eksperimentalfysikere konstruere kvantemagnetiske systemer i usta-

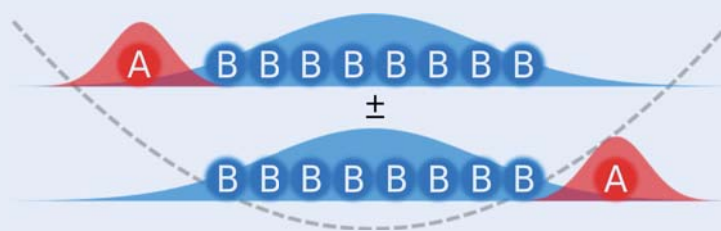
Superpositionstilstande

Ethvert fysisk system er karakteriseret ved de forskellige tilstande, systemet kan befinde sig i. Eksempelvis kan vi forestille os et fysisk system bestående af en lampe, der enten kan være i en slukket tilstand eller en tændt tilstand. Vi kan ikke umiddelbart forestille os, at lampen skulle kunne være andet end enten tændt eller slukket. En kvantemekanisk lampe derimod kan være i en tilstand, der er en blanding af de to tilstande, fx 50% slukket og 50% tændt. Det skal forstås således, at en måling af lampens lysstyrke har 50% chance for udfaldet tændt og 50% for slukket. En måling kan altså ikke give andre resultater end tændt og slukket, og situationen er derfor en helt anden end en lampe, der lyser med halv styrke. En sådan blandingstilstand kaldes en superpositionstilstand, og de spiller en afgørende rolle i kvantemekanikken. Ja, man bruger sågar ofte eksistensen af superpositionstilstande til at afgøre, hvorvidt noget opfører sig kvantemekanisk eller ej.

En interessant tilstand i en en-dimensionel kæde af atomer er en tilstand, hvor atomerne er arrangeret i en bestemt rækkefølge. Et ofte



En kvantemekanisk lampe kan være 50% slukket og 50% tændt på samme tid.



Denne superpositionstilstand består af to tilstande, hvor A-atomet sidder i hver sin ende af kæden af B-atomer. Så A-atomet befinder sig 50% i hver ende.

studeret system består af en kæde af atomer, hvor ét atom er forskellig fra de andre, fx ét enkelt spin-op-atom (eller A-atom), hvor de øvrige atomer i kæden er spin-ned-atomer (eller B-atom). Systemets forskellige tilstande kan karakteriseres ved de forskellige mulige placeringer af spin-op-atomet på kæden. En ganske

interessant superpositionstilstand kan opstå ved at blande de tilstande, hvor spin-op-atomer sidder helt til højre og helt til venstre. Hvis systemet befinder sig i denne tilstand, giver det ikke meget mening at snakke om, at spin-op-atomet befinder sig et bestemt sted, for det befinder sig lige meget i begge ender af kæden.

bille tilstande. Forskerne kan "give slip" på systemet og observere, hvad der sker.

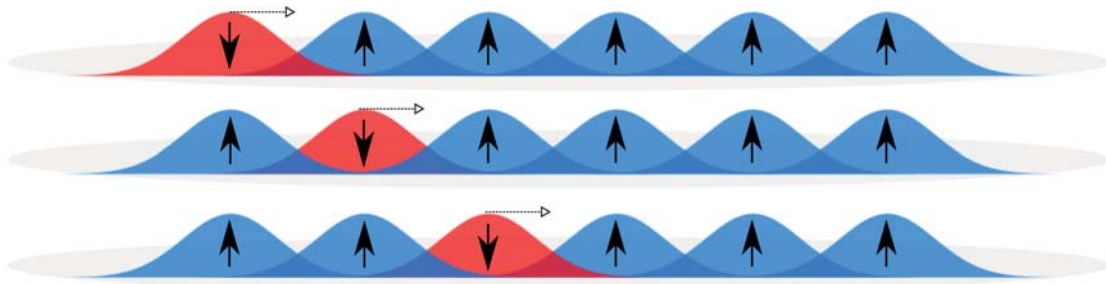
Vi har teoretisk studeret et system bestående af en kæde af 4-20 atomer med samme spin-retning, fx spin-ned, som er en stabil tilstand. Vender vi derimod spinretningen på et enkelt af atomerne i enderne, har vi skabt en ustabil situation, der vil udvikle sig dynamisk over tid. Dette ene spin-op vil vandre rundt på kæden, eller hvad endnu mærkeligere er: være flere forskellige steder på kæden samtidigt, altså i en superpositionstilstand. En sådan kaotisk situation er absolut ikke ønskværdig, hvis man er interesseret i kvanteteknologi. Tværtimod vil man gerne have styr på, hvor spin-op-atomet befinder sig, og allerhelst

vil man gerne sikre sig, at spin-op-atomet med 100 % sandsynlighed bevæger sig fra den ene ende af kæden til den anden. Under særlige forhold kan man sikre, at spin-op-atomer netop bevæger sig hele vejen ned igennem kæden, og på den måde har man overført kvanteinformation fra et sted til et andet. Det er analogt til en ledning med strøm, bortset fra at det er bevægelsen af spin og ikke elektroner, der flytter informationen langs ledningen.

Idéen om at bruge bevægelsen af spin og ikke elektroner som informationsstrøm er grundpillen i et nyt forskningsfelt kaldet *spintronics*. Når forskere i dag forsøger at designe fremtidens kvanteteknologier lader vi os gerne inspirere af de velkendte og velafprøvede princip-

per i almindelig elektronik. I vores forskningsgruppe har vi det seneste halve års tid arbejdet på at designe en kvantetransistor. En almindelig transistor er en af de vigtigste komponenter i moderne elektronik. Så en kvantemekanisk version af en transistor, som udelukkende beskriver sig om partiklernes spin, vil være yderst værdifuld, og den kan blive en af de vigtigste byggeklodser i fremtidens teknologi.

Transistoren er grundlæggende set en knap, der kan tænde og slukke for en strøm. En tændt transistor tillader strøm at passere igennem, hvorimod en slukket transistor slukker for strømmen. I vores kvante-spin-transistor består strømmen af spin, og vi har for nyligt færdiggjort et design til en prototype. Vi



I en kæde af atomer kan kvanteinformation overføres fra den ene ende til den anden ved at det røde spin-ned-atom bevæger sig ned langs kæden af blå spin-op-atomer.

håber i den kommende tid at etablere et samarbejde med en eksperimentel forskningsgruppe, der kan bygge denne kvantetransistor og se, om den fungerer så godt, som vi forventer.

Kvanteteknologierne kommer

Opdagelsen og beherskelsen af elektricitet og magnetisme i 1800-tallet gav os telegrafene, elektrisk lys, telefonen, og siden radioen og fjernsynet. Ligeledes gav opdagelsen af kvantemekanikken sig udslag i "den første kvantemekaniske revolution" i form af en række teknologier, som har været fuldstændig afgørende for det moderne samfunds udvikling, fx

laseren, transistoren og halvledere, alt sammen centrale komponenter i nutidens computersystemer.

Vi står nu på tærsklen til "den anden kvantemekaniske revolution", hvor man vil begynde at udnytte kvantemekanikkens eksotiske fænomener som superpositioner og sammenfildrede tilstande i teknologi. Kvantecomputere er et højprofileret eksempel, men begrebet kvanteteknologi dækker over en meget bredere vifte af forskellige teknologier, som bl.a. kan bruges til at lave (ubrydelig) kryptering, bedre sensorer til sundhedssektoren og søgemaskiner, som kan behandle de enorme mængder data, som det

moderne samfund producerer.

Denne nye kvanteteknologi vil givevis også åbne nye døre og skabe nye muligheder, som vi end ikke har tænkt på endnu. Således er der også en enorm interesse i kvanteteknologi for tiden, hvor bl.a. Canada, USA og Kina er langt fremme. Desuden har EU-Kommissionen for nylig offentliggjort en investering på henved 1 milliard euro dedikeret til udviklingen af kvanteteknologier. Forskning og udvikling i kvanteteknologi er således højt prioriteret over hele kloden. Dygtige forskere og ingeniører, som kan bidrage, er således i høj kurs – og ligeså er engagerede og nysgerrige studerende. ■

Announce