

LYS I FOTONISKE KRYSTALLER OG OPTISKE NANOBOKSE

Hvordan opstår lys? Dette fundamentale spørgsmål har beskæftiget fysikere gennem generationer. Med udviklingen af kvantemekanikken i begyndelsen af det 20 århundrede lykkedes det at opstille en fuldstændig teori for udsendelsen af lys. Den kvantemekaniske teori beskriver hvordan en lyspartikel (en såkaldt foton) skabes ved at en elektron i et anslået atom henfalder til et lavere energiniveau. Inden for de seneste år er det blevet muligt at udføre eksperimenter der bekræfter den kvantemekaniske teori for lys. Ganske bemærkelsesværdigt forudsiger kvantemekanikken nye effekter som er helt anderledes end hvad vi kender fra den klassiske fysik. I denne artikel vises eksempler på at kvante-

Af Peter Lodahl

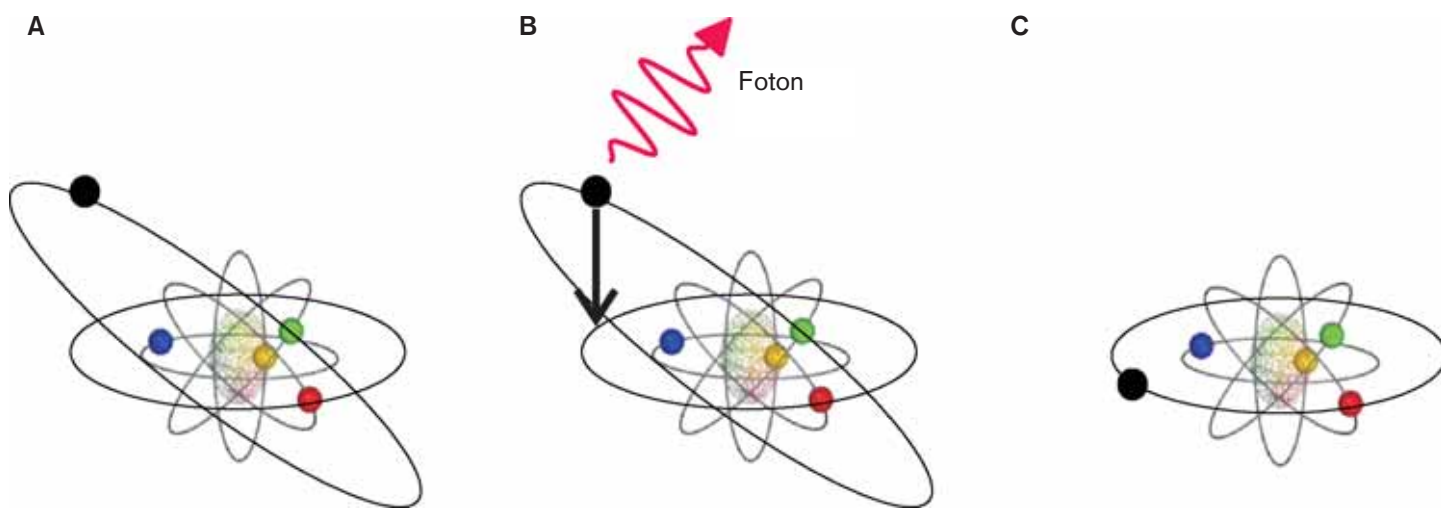
mekaniske effekter er afgørende for forståelsen af vekselvirkning mellem lys og stof. Forskere verden over øjner nu muligheden for at anvende sådanne delikate kvantemekaniske effekter til at udvikle nye teknikker der er baserede på kvantemekanikkens love.

SPONTAN EMISSION AF LYS

Atomer kan udsende lys ved at anslåede elektroner henfalder til en lavere

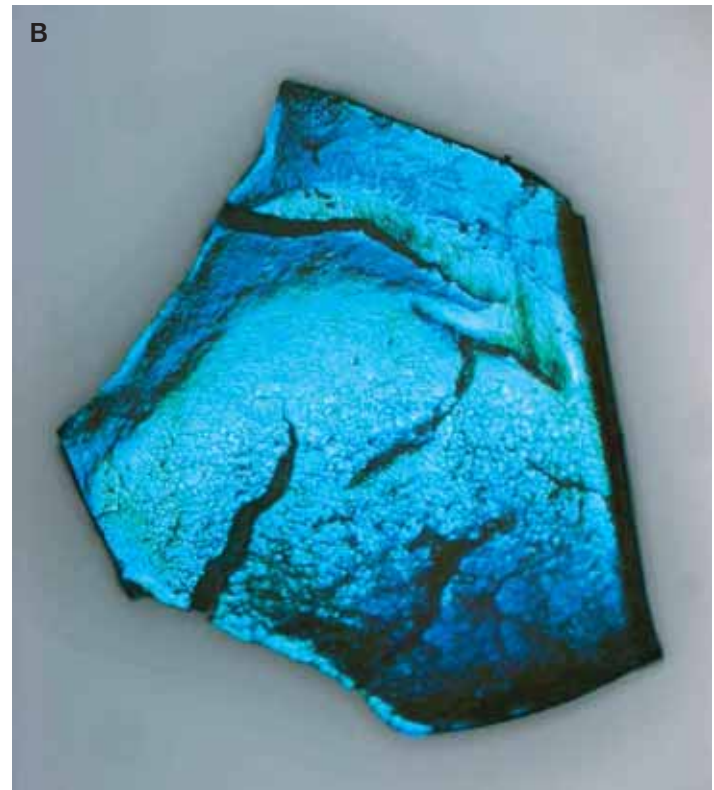
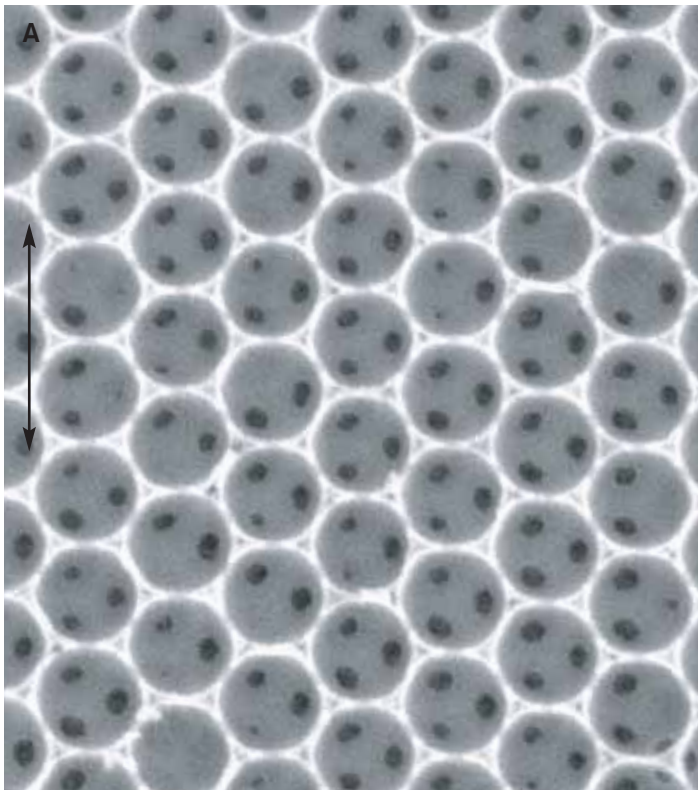
energi-tilstand. Dette kaldes spontan emission af lys (*fig. 1*). Spontan emission kan beskrives ved en kvantemekanisk sandsynlighedsproces. Det er derfor ikke muligt at forudsige på hvilket tidspunkt atomet vil henfalde, men kun sandsynligheden for at det vil henfalde på et givet tidspunkt. Måles henfaldsøjeblikket mange gange, kan man fastlægge den gennemsnitlige henfaldstid som også kaldes det anslåede atoms levetid. Denne udtrykker hvor længe atomet i gennemsnit forbliver i den anslåede tilstand, og kan beregnes vha. den kvantemekaniske teori for udsendelsen af lys.

Ganske overraskende viser det sig at levetiden ikke alene afhænger af hvilket atom vi betragter, men også af i



1. Spontan emission. Et atom med en elektron i en anslået tilstand (A) kan henfalde spontant. Herved udsendes en foton (en lys-partikel) i en vilkårlig retning (B), og elektronen henfalder til et lavere energiniveau (C).





2. A: et elektronmikroskopbillede af overfladen af en 3-dimensionel fotonisk krystal. Den består af en periodisk struktur af luft-huller (gråt ca. 300 nm i diameter) i halvledermaterialet titanium-dioxid (hvidt). Et mål for afstanden mellem luft-hullerne er gitterafstanden a , der angiver afstanden mellem et bestemt sæt af gitterplaner i den 3-dimensionale struktur. Her ses den 2-dimensionale overflade af krystallen hvor den angivne afstand (pilen) er relateret til gitterafstanden. De tre sorte prikker i hvert luft-hul er huller til det lag der ligger nedenunder overfladelaget. B: en fotonisk krystal set gennem et almindeligt mikroskop. Farven skyldes at blåt lys ikke kan udbrede sig og dermed reflekteres fra krystallen.

hvilke omgivelser atomet sidder. Anbringes et atom fx inden for nogle hundrede nanometre (nm) (1 nanometer = 1 milliontedel millimeter) af et materiale der vekselvirker kraftigt med lys, kan man påvirke og dermed kontrollere levetiden.

Dette er tankevækkende, for hvordan kan et atom "vide" at det sidder tæt på fx en overflade eller mere generelt inden i et såkaldt nano-struktureret materiale? (se nedenfor). Svaret skal findes i kvantemekanikkens forunderlige verden. Således viser det sig at et atom kun kan henfalde pga. tilstedeværelsen af såkaldte vakuumfluktua-

tioner. I kvantemekanikken er der selv i et fuldstændig tomt rum altid energi til stede, den såkaldte vakuumenergi. Den udgør en allestedsnærværende, fluktuerende baggrund og tilvejebringer således et elektromagnetisk felt der er nul i gennemsnit, men varierer i tid. Uden vakuumfluktuationer ville et anslået atom aldrig henfalde, og vakuumfluktuationer er derfor drivkraften bag spontan emission. Ganske bemærkelsesværdigt kan man i dag fremstille nano-strukturerede materialer hvor de optiske egenskaber varierer på en skala af størrelsesordenen nanometer, og som kan bruges til at påvirke tætheden

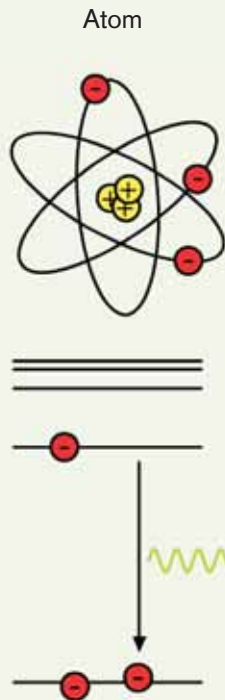
af vakuumfluktuationerne. Via koblingen mellem vakuumfluktuationer og spontan emission giver dette således en måde at påvirke udsendelsen af lys. Atomet "ved" således at det er i en nano-struktur da det "føler" de forandrede vakuumfluktuationer. Et rigtigt kvantemekanisk fænomen!

FOTONISKE KRYSTALLER

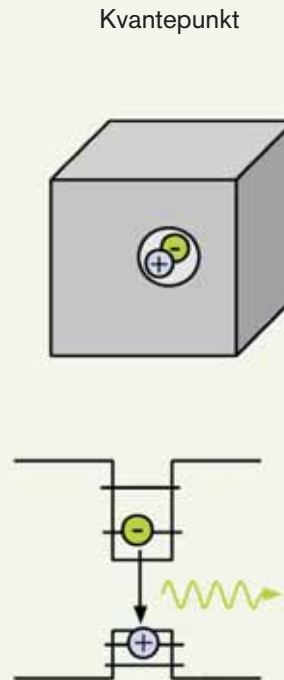
Fra at være en ren teoretisk forudsigelse er det for nylig blevet muligt at udføre eksperimenter der påviser at levetiden kan kontrolleres med nano-



A



B



Sammenligning af energiniveauerne af et atom (A) og et kvantepunkt (B). Et atom består af diskrete energiniveauer, og når en elektron henfalder fra en høj til en lavere energitilstand, udsendes en foton. På samme måde består et kvantepunkt af diskrete elektron og hul energitilstande, og en foton udsendes når en elektron falder ned i et tomt hul.

De optiske egenskaber af halvledere kan beskrives som to energibånd der hver især indeholder mange tilladte elektrontilstande i form af energiniveauer. Anbringes en elektron i det øvre energibånd, kan den henfalde tilbage til det nedre energibånd hvorved der udsendes en foton. Dette kan dog kun ske hvis der er plads til elektronen, dvs. hvis det nedre energibånd ikke allerede er fyldt op med elektroner. En sådan fri plads kaldes et hul, og kan opfattes som en partikel med positiv ladning.

Når en elektron henfalder fra det øvre til det nedre bånd, kan det opfattes som om et elektron/hul-par annihilerer, dvs. elektron og hul ophæver hinanden hvorved en foton udsendes.

Energibåndene i halvledere indeholder mange tilladte energiniveauer for elektroner og huller hvilket adskiller sig fra de diskrete energiniveauer kendt fra atomer (A). Diskrete energiniveauer kan opnås ved at indlejre et halvledermateriale i et andet (B). På denne måde kan

man lokalisere et elektron/hul-par til et lille område. Effekten af at lokalisere elektronen er at man dermed begrænser det tilladte antal energitilstande, på samme måde som en elektron lokaliseret i et atom giver anledning til ganske få tilladte energier. Dette er princippet bag kvantepunkter der typisk har udstrækninger på 5-10 nm. Ved at kontrollere den præcise størrelse af kvantepunktet kan man ydermere flytte de tilladte energiniveauer.

BOKS 1: HALVLEDEROPTIK

strukturer. I disse eksperimenter anvendes såkaldte fotoniske krystaller som tillader kontrol over både udsendelsen og udbredelsen af lys. Fotoniske krystaller består af en tredimensionel, periodisk krystalstruktur

opbygget af fx lufthuller i et materiale (fig. 2) hvor afstanden mellem lufthullerne er af samme størrelsesorden som lysets bølglængde. For rødt lys er bøl-

gelængden omkring 600 nm. Fotoniske krystaller er blevet meget populære i de senere år inden for forskningsområdet nanofotonik der beskæftiger sig med vekselvirkningen

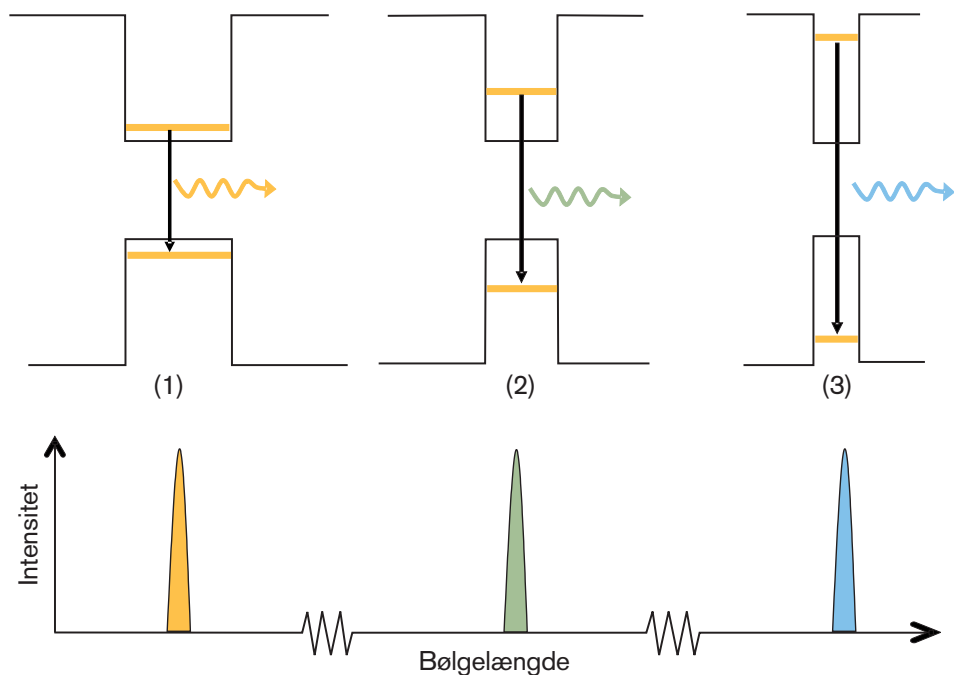


mellem lys og nano-strukturerede materialer.

Fotoniske krystaller vekselvirker kraftigt med lys, og varieres afstanden mellem hullerne i krystallen, kan denne vekselvirkning manifestere sig på forskellig vis. Således kan udsendelsen af lys enten undertrykkes eller fremskyndes, afhængig af valg af fotonisk krystal. I en fotonisk krystal med et såkaldt optisk båndgab kan lys med en bestemt bølgelængde overhovedet ikke udbrede sig. Placeres et anslået atom i en sådan krystal, vil det ikke længere kunne henfalde. I det følgende beskrives et eksperiment hvor det for første gang er vist at fotoniske krystaller kan bruges til at kontrollere udsendelsen af lys.

KVANTEPUNKTER

For at kunne udføre eksperimenter der kortlægger egenskaberne af lys udsendt fra fotoniske krystaller, må man på passende vis anbringe mikroskopiske lyskilder inde i strukturerne. Der er nogle vigtige krav forbundet med valget af passende lyskilde. Således er det klart at lyskilden skal være lille sammenlignet med den typiske periode i en fotonisk krystal (ca. 500 nm), simpelthen for at kunne anbringe lyskilderne i den fotoniske krystal uden at påvirke den for meget. En oplagt mulighed vil være at bruge atomer eller molekyler der typisk har udstrækninger på et par nm eller mindre. Atomer og molekyler udsender lys når en elektron henfalder fra et anslået energiniveau til et lavere liggende. Et problem med atomer og molekyler er dog at bølgelængden af det udsendte lys ikke kan varieres. Her er man i vid-



3. Ved at variere størrelsen af kvantepunktet kan man ændre afstanden mellem energiniveauerne for elektroner og huller og dermed variere farven (dvs. bølgelængden) af den foton der udsendes.

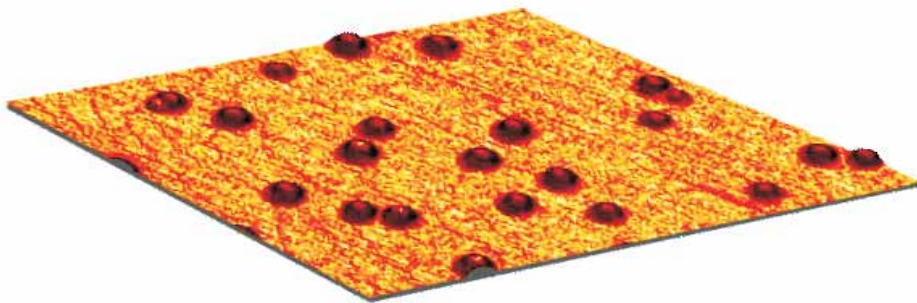
udstrækning afhængig af de overgange mellem elektronbaner som er stillet til rådighed af naturen.

Denne begrænsning kan løses vha. moderne materialer baseret på halvleder-teknikker (boks 1). I halvledermaterialer kan elektroner henfalde fra et anslået energiniveau til et lavere energiniveau, som det også var tilfældet for atomer. Et atom har kun et begrænset antal energiniveauer, man siger at energitilstandene er diskrete. Tilstedeværelsen af diskrete energiniveauer er af afgørende betydning for anvendelsen af en lyskilde fx i lasere. Modsat har halvledermaterialer et kontinuum af energiniveauer, men dette problem kan løses ved at fremstille en struktur bestående af to forskellige halvledermaterialer.

Små strukturer med udstrækning på

5-10 nm bestående af en type halvledermateriale som er indlejret i et andet halvledermateriale, kaldes kvantepunkter. Kvantepunkter har diskrete energiniveauer og kaldes derfor også "kunstige atomer" for netop at fremhæve de mange egenskaber, kvantepunkter og atomer har tilfælles (boks 1). Bemærk dog at et kvantepunkt er langt større end et atom, og typisk er det bygget op af flere tusinde atomer. Her ligger nøglen til kvantepunkternes fordele da kvantepunkter er relativt store, kan de fremstilles med skræddersyede egenskaber. Således kan kvantepunktets energiniveauer flyttes ved at variere størrelsen af kvantepunktet. Dette er ekstremt brugbart da det kan anvendes til at variere bølgelængden af det lys som udsendes fra kvantepunktet (fig. 3). Denne egenskab gør kvan-





4. Overflade af halvledermaterialet GaAs hvor der er deponeret en anden halvleder ovenpå (AlGaAs) hvilket giver anledning til dannelse af øer. De er kvantepunkter med typiske udstrækninger af størrelsesordenen 5-10 nm. Hele den viste overflade er 500 nm × 500 nm.

tepunkter uovertrufne til at fremstille lyskilder og lasere hvor bølgelængden kan varieres efter behov.

Kvantepunkter kan fremstilles med stor præcision vha. moderne fabrikationsteknikker hvor atomer pådampes en overflade lag for lag. Lægges to forskellige halvledermaterialer oven på hinanden, ødelægges den præcise lagstruktur, og der opstår små øer. Det viser sig at disse øer er kvantepunkter med præcise egenskaber beskrevet ovenfor (fig. 4). Ved at kontrollere fx den kemiske sammensætning og den hastighed hvormed materialerne pådampes overfladen, kan kvantepunkterne dyrkes med præcise egenskaber som ønskes.

KONTROL AF LEVETIDEN

Kvantepunkter er ideelle lyskilder til eksperimenter inden for nanofotonik, og i de senere år er flere teoretiske forudsigelser blevet eftervist eksperimentelt. En af dem er at levetiden for spontan emission kan kontrolleres vha. en fotonisk krystal. I dette ekspe-

riment anvendtes 3D fotoniske krystaller bestående af luft huller i en baggrund af halvledermaterialet titaniumdioxide (fig. 2).

Ved at variere gitterafstanden af den fotoniske krystal kan man enten fremskynde eller forsinke spontan emission (fig. 5). Denne effekt kan måles i et optisk eksperiment hvor kvantepunkterne i den fotoniske krystal først anslås med en kort lyspuls fra en laser. Efterfølgende henfalder kvantepunkterne, og man måler hvornår dette sker ved at opfange enkelte fotoner udsendt fra den fotoniske krystal. Kurverne fremkommer ved at gentage eksperimentet mange gange, dvs. anslå kvantepunkterne og derefter måle hvornår en foton bliver udsendt. De første 5 ns af henfaldskurverne er påvirket af at ikke alene kvantepunkterne udsender lys, men også selve materialet som den fotoniske krystal er lavet af (titanium-dioxid). Heldigvis henfalder dette bidrag meget hurtigt, og efter 5 ns ser man kun lys fra kvantepunkterne.

Ved at sammenligne fotoniske krystaller med forskellige gitterafstande ses

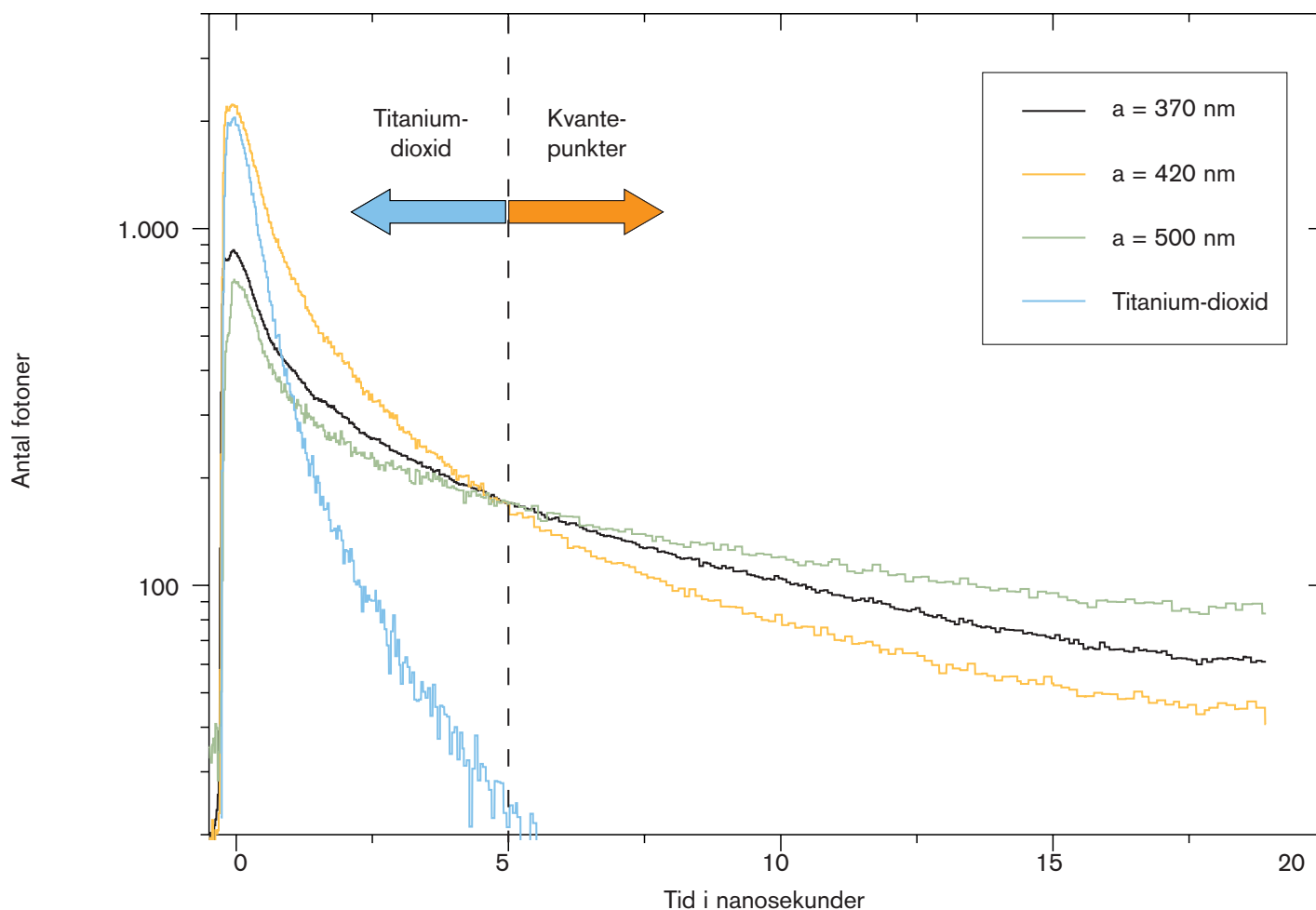
at henfaldet enten forløber hurtigere ($a = 420$ nm) eller langsommere ($a = 500$ nm) relativt til målingen på en krystal med gitterafstand $a = 370$ nm. Sidstnævnte er rent faktisk en referencemåling, for i dette tilfælde er gitterafstanden så lille sammenlignet med lysets bølgelængde at lyset ikke føler nanostrukturerne. Ud fra forløbet af henfaldskurverne afledes den gennemsnitlige levetid hvilket giver 9,6 ns ($a = 420$ nm) og 19,3 ns ($a = 500$ nm) relativt til referenceværdien på 12,4 ns ($a = 370$ nm). Dette eksperiment påviser for første gang at fotoniske krystaller kan bruges til at kontrollere spontan emission af lys.

FREMTIDEN

Det næste skridt i forskningen vil være at introducere en defekt i en fotonisk krystal, fx ved at udelade et luft hul – skabe en defekt. Placeres et kvantepunkt i en sådan defekt, vil det opføre sig anderledes end i en perfekt fotonisk krystal. Som beskrevet tidligere, kan et kvantepunkt ikke henfalde i en fotonisk krystal med et optisk båndgab, simpelthen fordi lyset ikke kan udbrede sig. Modsat kan kvantepunktet henfalde nær en defekt, men det udsendte lys vil forblive lokaliseret nær defekten fordi lyset ikke kan udbrede sig dybt ind i den fotoniske krystal (fig. 6). Det viser sig at en defekt i en fotonisk krystal muliggør ultimativ, rumlig kontrol over udbredelsen af lys. Således er det muligt at indfange lyset på et område med en udstrækning af størrelsesordenen nanometer.

I en sådan optisk nano-boks kan lys og stof være så kraftigt koblet at man





5. Antal fotoner udsendt fra den fotoniske krystal som funktion af udsendelsestidspunktet i nano-sekunder for tre forskellige fotoniske krystaller med forskellige gitterafstande.

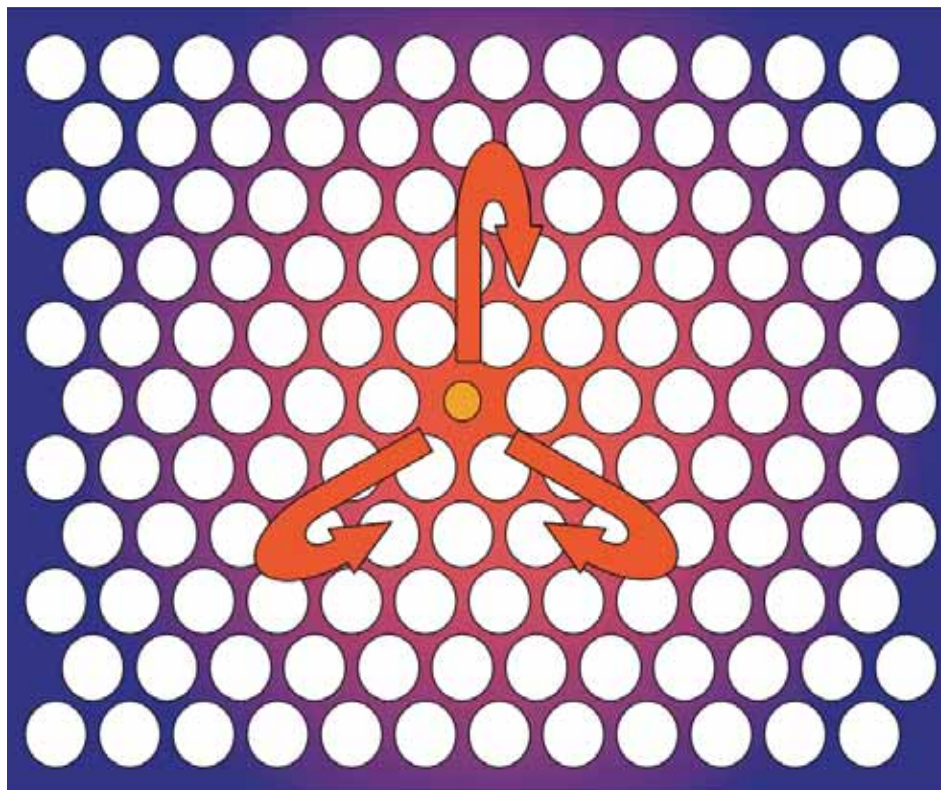
kan studere vekselvirkningen af blot ét kvantepunkt med én enkelt foton. I et sådant system spiller kvantemekanikkens love en væsentlig rolle. Faktisk kan en foton blive så kraftigt koblet til kvantepunktet i defekten at systemet bliver “entangled”. Dette er en speciel kvantemekanisk “sammenflettet tilstand” hvor man ikke længere kan adskille om fotonen er absorberet af kvantepunktet eller befinder sig i nano-boksen. I en vis forstand er fotonen faktisk begge dele på én gang! Dette er et eksempel på den type kvan-

temekanisk opførsel som Albert Einstein aldrig kunne acceptere, men som ikke desto mindre kan realiseres i moderne fysiklaboratorier. Ydermere har man inden for de seneste 10 år opdaget at det rent faktisk er muligt at anvende entanglement til noget nyttigt. Således har teoretiske fysikere foreslået at en kvantecomputer der udnytter sådanne kvantemekaniske tilstande, vil kunne udføre visse opgaver langt bedre end en klassisk computer.

At realisere en nano-boks for lys baseret på halvledermaterialer, vil være

et vigtigt første skridt der vil demonstrere at det er muligt at kontrollere simple kvantemekaniske systemer. En nano-boks for lys vil kunne udgøre en byggeblok som kan danne basis for en kvanteteknologi. Den helt store udfordring bliver naturligvis at generalisere dette til de langt mere komplekse systemer som vil være påkrævet i en kvantecomputer. Dette vil kræve kontrolleret kobling af mange nano-bokse hvilket fortsat ligger i en meget fjern fremtid, og mange forskere er endda skeptiske overfor om det nogensinde

vil blive en realitet. Udover at være et vigtigt første skridt mod en ny kvanteteknologi, har fotoniske krystaller og nano-bokse også en lang række mere forhåndenværende anvendelser. Således gør kontrol af udsendelsen og udbredelsen af lys det muligt at fremstille de mest kompakte, hurtige og støjsvage lasere der findes. Faktisk vil disse lasere være så små og effektive, at kvanteoptiske effekter kommer til at spille en afgørende rolle. Dette er endnu et eksempel på at fremtidens teknologi i vid udstrækning må tage højde for og eventuelt kan blive baseret på kvantemekanikkens love.



6. Illustration af en fotonisk krystal hvor der er introduceret en defekt ved at udelade et lufthul fra den ellers perfekte struktur. Placeres et kvantepunkt i defekten (orange cirkel) kan spontan emission foregå, men lyset forbliver lokaliseret på et meget lille område tæt på defekten. Herved skabes en nano-boks for lys.

LITTERATUR

Mørk, J. & J.M. Hvam, 1999: Fotonik – et nyt og revolutionerende begreb. *Naturens Verden* nr. 10, årgang 82: 14-19.

Lodahl, P., 2004: At kontrollere udsendelsen af lys. *Aktuel Naturvidenskab* nr. 4: 15 & 17.

Lodahl, P., A.F. van Driel, I.S. Nikolaev, A. Irman, K. Overgaag, D. Vanmaekelberg & W.L. Vos, 2004: Controlling the dynamics of spontaneous emission from quantum dots by photonic crystals. *Nature* vol. 430: 654-657.

FORSKNINGSRÅDET FOR NATUR OG UNIVERS, SOM BL.A. GENNEM NATURENS VERDEN VIRKER FOR UDBREDELSE AF KENDSKABET TIL NATURVIDENSKAB, HAR UDVALGT DENNE ARTIKEL FRA ET AF DE PROJEKTER FORSKNINGSRÅDET STØTTER.

