

De satte färg på nanotekniken

Moungi G. Bawendi, Louis E. Brus och Aleksey Yekimov belönas med 2023 års Nobelpris i kemi eftersom de har upptäckt och utvecklat en viktig del av nanoteknikens fundament: kvantprickar. Dessa minimala partiklar har sällsamma egenskaper. Numera sprider de sitt ljus från teveskärmar och LED-lampor; de katalyserar kemiska reaktioner och deras klara sken kan synliggöra tumörvävnad för en kirurg.

”Toto, I’ve a feeling we’re not in Kansas anymore.” Så lyder ett klassiskt citat från filmen *Trollkarlen från Oz*. 12-åriga Dorothy ligger avsvimnad i sin säng när hennes hus sveps i väg av en kraftig tornado. Då huset landar igen och hon kliver ut genom dörren, med sin hund Toto i famnen, är ingenting sig likt. Plötsligt befinner hon sig i en värld som sprakar av färger och som skulle visa sig vara förtrolad.

Om en magisk tornado på ett liknande vis kunde svepa in i våra liv och krympa allt till nanodimensioner, skulle vi sannolikt se oss lika häpet omkring som Dorothy i landet Oz. För vår omgivning skulle börja spraka av färger och ingenting skulle vara sig likt. Våra guldörhängen skulle plötsligt glimma i blått, medan guldringen på vårt finger i stället skulle stråla i rubinrött. Försökte vi steka något på gasspisen finns en risk att stekpannan skulle smälta. Och våra vita väggar – vars färg innehåller titandioxid –



Kvantprickar har gett oss nya möjligheter att skapa färgat ljus.

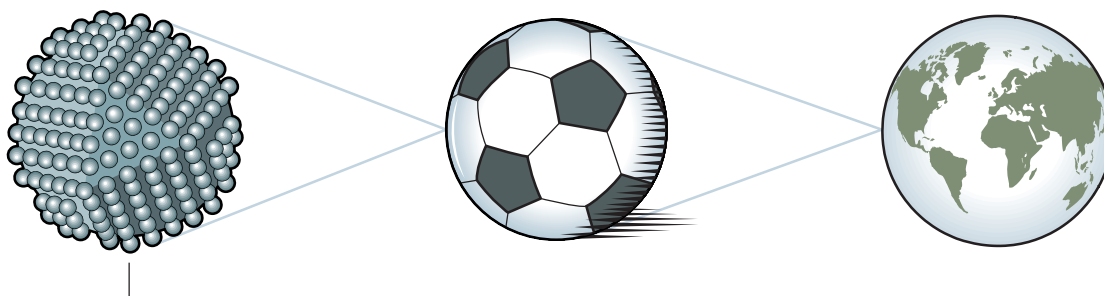
Figur 1.
skulle börja alstra mängder av reaktiva syreradikaler.

I nanodimensioner spelar storleken roll

I nanovärlden betar sig tingen verkligen annorlunda. När materiens storlek börjar mätas i miljon- dels millimetrar uppstår nämligen märkliga fenomen – *kvanteffekter* – som går emot vår intuition. Nobelpristagarna i kemi år 2023 har alla varit pionjärer i utforskandet av nanovärlden. Louis Brus och Aleksey Yekimov lyckades i början av 1980-talet – oberoende av varandra – skapa kvantprickar,

nanopartiklar som är så små att det uppstår så kallade kvanteffekter som bestämmer deras egenskaper. Mounji Bawendi revolutionerade 1993 metoderna för att tillverka kvantprickar, så att kvaliteten på dem blev väldigt hög. Därmed kunde de på allvar börja användas inom nanotekniken.

Tack vare pristagarnas arbeten har vi människor kunnat utnyttja några av nanovärldens sällsamheter. Kvantprickar finns numera i kommersiella produkter och används brett inom många vetenskapliga discipliner, från fysik och kemi till medicin. Men nu går vi händelserna i förväg. Låt oss måla



En kvantprick är en kristall som ofta bara består av några tusen atomer. Storleksmässigt förhåller den sig till en fotboll, som en fotboll förhåller sig till jorden.

Figur 21. Bakgrunden till 2023 års Nobelpris i kemi.

Nanovärldens kvantfenomen fanns länge bara i teorin

När Aleksey Yekimov och Louis Brus tillverkade de första kvantprickarna visste man egentligen redan i teorin att de skulle få annorlunda egenskaper. Redan 1937 förutspådde fysikern Herbert Fröhlich att nanopartiklar inte skulle bete sig som andra partiklar. Han utforskade de teoretiska konsekvenserna av den berömda Schrödingerekvationen, som visar att när partiklar blir extremt små så kommer utrymmet för materialets elektroner att krympa. Det i sin tur gör att elektronerna – som ju samtidigt är partikelvågor – trängs ihop. Fröhlich insåg att det skulle leda till att materialets egenskaper förändrades på ett drastiskt vis.

Den här insikten fascinerade forskare. Med matematikens hjälp lyckades de förutse flera storleksberoende kvanteffekter. Fysiker satsade också på att försöka påvisa dem i verkligheten. Men det var lättare sagt än gjort, för de behövde kunna skulptera fram en struktur som var ungefär en miljon gånger mindre än ett knappnålshuvud.

Få trodde att kvanteffekter skulle komma till användning

På 1970-talet lyckades fysiker ändå göra detta. Med hjälp av ett slags molekyllär stråle skapade de en nanotunn beläggning av ett material ovanpå ett annat bulkmaterial. När strukturen var på plats kunde de visa att beläggningens optiska egenskaper varierade beroende på hur tunn den var, en observation som stämde med kvantmekanikens förutsägelser.

Detta var ett stort genombrott, men experimentet krävde väldigt avancerad teknik. Fysikerna behövde använda både ultrahögvakuum och temperaturer nära den absoluta nollpunkten. Få förväntade sig därför att människan rutinmässigt skulle kunna börja utnyttja kvantmekaniska fenomen. Titt som tätt händer det dock att vetenskapen bjuder på oväntade vändningar. Denna gång kom vändningen från studier av en uråldrig uppfinning: färgat glas.

Ett och samma ämne kan ge olika färger i glas

De första arkeologiska fynden av färgat glas är flera tusen år gamla. Genom att prova sig fram har glasmästare lärt sig hur de kan få en glasmassa att anta alla regnbågens färger. De har tillsatt ämnen som silver, guld och kadmium och sedan lekt med olika temperaturer för att få fram fina nyanser i glaset.

När så fysiker på 1800- och 1900-talen började utforska ljusets optiska egenskaper kom glasmästarnas kunskaper väl till pass. Med hjälp av färgat glas kunde de filtrera bort olika våglängder av ljus. För att optimera sina experiment började de själva fuska som glasmästare och det ledde till viktiga insikter. De lärde sig bland annat att ett och samma ämne kunde ge upphov till helt olika färger i glas. En blandning av kadmiumselenid och kadmiumsulfid kunde exempelvis få glaset att skifta i antingen gult eller rött. Vilken färg det blev berodde på hur mycket glasmassan hettades upp och hur den fick svalna. Så småningom kunde de också visa att färgskiftningarna kom av att det bildades partiklar inuti glaset och att de partiklarna kunde ha olika storlek.

Ungefär det här visste forskare mot slutet av 1970-talet, när en av årets Nobelpristagare, Aleksey Yekimov, som nydisputerad tog anställning vid S. I. Vavilov State Optical Institute i dåvarande Sovjetunionen.

Aleksey Yekimov kartlägger det färgade glasets mysterium

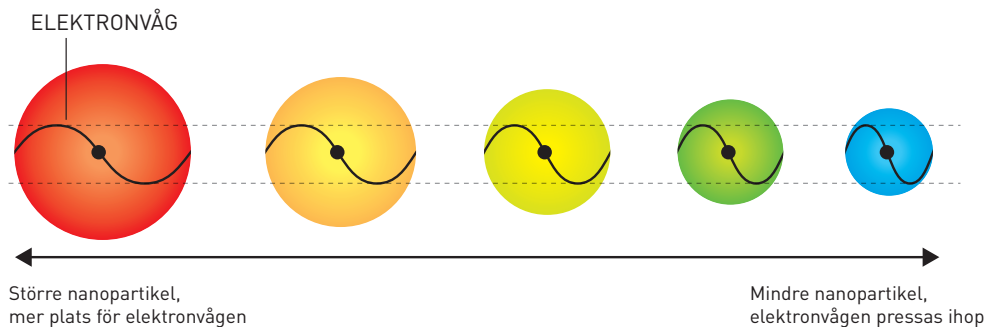
Det faktum att ett och samma ämne kunde ge olika färger i ett glas intresserade Aleksey Yekimov, för egentligen är det ologiskt. Målar du med kadmiumrött på en tavla, blir det ju alltid kadmiumrött om du inte blandar i andra färgpigment. Så hur kunde ett och samma ämne ge olika nyanser i glas?

När Aleksey Yekimov doktorerade hade han studerat halvledare, som ju är viktiga komponenter i mikroelektronik. Inom det området använder man optik som ett slags diagnosmetod för att undersöka kvaliteten på halvledarmaterialet. Man belyser materialet med ljus och mäter vilka våglängder som absorberas. Det avslöjar bland annat vilka ämnen som materialet består av och hur välordnad kristallstrukturen är.

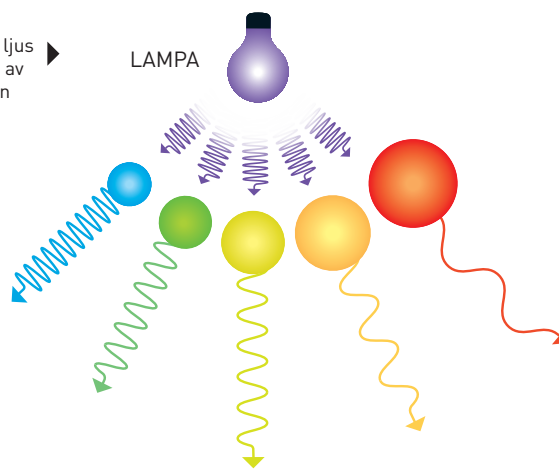
Aleksey Yekimov var välbekant med dessa metoder, så han började använda dem för att kartlägga färgat glas. Efter en del inledande experiment beslöt han sig för att på ett systematiskt vis tillverka glas dopat med kopparklorid – ett vanligt salt. Han värmden glasmassan till olika temperaturer mellan 500 °C och 700 °C och varierade tidsperioden för uppvärmningen från 1 timme till 96 timmar. När glaset hade stelnat skickade han röntgenstrålar genom det. Spridningen på strålarna avslöjade att det hade bildats

Kvanteffekter uppstår när partiklar krymper

När partiklar bara är några få nanometer i diameter krymper utrymmet för elektronerna. Det påverkar bland annat partikelns optiska egenskaper.



Kvantprickar absorberar ljus och skickar sedan ut ljus av en annan våglängd. Vilken färg det får beror på partikelns storlek.



minimala kristaller av kopparklorid inuti glaset och att tillverkningsprocessen påverkade hur stora partiklarna blev. I vissa av glaset var de bara runt 2 nanometer, i andra upp mot 30 nanometer.

Nu till det intressanta. Det visade sig att glasets absorption påverkades av partiklarnas storlek. De största partiklarna absorberade ljus på samma vis som kopparklorid normalt gör. Men ju mindre partiklarna var, desto blåare blev ljuset som de absorberade. Som fysiker kände Aleksey Yekimov kvantmekanikens lagar väl och han insåg snabbt att han hade observerat en storleksberoende kvanteffekt (figur 3).

Detta var första gången som någon på ett medvetet sätt lyckades framställa så kallade kvantprickar – nanopartiklar som ger upphov till storleksberoende kvanteffekter. År 1981 publicerade Aleksey Yekimov sin upptäckt i en sovjetisk vetenskaplig tidskrift. Den publikationen var dock svåråtkomlig

för forskare på andra sidan järnridån. Därför var årets andra Nobelpristagare i kemi – Louis Brus – omedveten om Aleksey Yekimovs upptäckt när han som den förste forskaren i världen 1983 upptäckte storleksberoende kvanteffekter hos partiklar som svävade fritt i en lösning.

Figur 3.

Louis Brus visar att underliga egenskaper hos partiklar är kvanteffekter

Louis Brus arbetade vid Bell Laboratories i USA med det långsiktiga målet att kunna få kemiska reaktioner att ske med hjälp av solenergi. För att kunna åstadkomma detta använde han partiklar

av kadmiumsulfid, som kan fånga in ljus och sedan utnyttja energin för att driva reaktioner. Partiklarna var i en lösning och Brus gjorde dem väldigt små, eftersom han då fick fram mycket yta på vilken de kemiska reaktionerna kunde ske. För ju mer du hackar upp ett material, desto större sammanlagd yta kommer det att exponera mot omgivningen.

Under arbetet med dessa minimala partiklar lade Brus märke till något konstigt: Partiklarnas optiska egenskaper ändrades när han hade lämnat dem framme på labbänken ett tag. Han anade att det kunde bero på att partiklarna hade vuxit i storlek. För att bekräfta sina misstankar tillverkade han kadmiumsulfidpartiklar som endast var runt 4,5 nanometer i diameter. Sedan jämförde han de optiska egenskaperna hos dessa nytillverkade partiklar med de som hade fått stå framme och växa till sig. De större partiklarna, som var cirka 12,5 nanometer i diameter, absorberade ljus vid samma våglängder som kadmiumsulfid i allmänhet. De mindre partiklarna absorberade däremot våglängder som skiftade åt det blåare hållet (figur 3).

Precis som Aleksey Yekimov insåg Louis Brus att han hade observerat en storleksberoende kvanteffekt. Han publicerade sin upptäckt 1983 och började sedan utforska partiklar av en rad andra material. Mönstret blev detsamma: ju mindre partiklarna var, desto blåare blev ljuset som de absorberade.

Det periodiska systemet fick en tredje dimension

Nu kanske vän av ordning frågar sig: Vad spelar det egentligen för roll om absorptionsen hos ett ämne skiftar ett snäpp åt det blåare hållet? Varför är det så märkvärdigt?

Jo, de optiska förändringarna avslöjade att ämnet helt hade ändrat karaktär. Ett ämnes optiska egenskaper styrs av dess elektroner. Samma elektroner styr även andra egenskaper hos ämnet, som dess förmåga att katalysera kemiska reaktioner eller att leda ström. Så när forskarna såg den förändrade absorptionen förstod de att de i princip hade ett helt nytt material framför sig.

Vill du förstå storheten i upptäckten kan du föreställa dig att det var som att det periodiska systemet plötsligt hade fått en tredje dimension. Förutom att ett grundämnes egenskaper påverkas av antalet elektronskal och hur många elektroner som finns i det yttersta elektronskalet, insåg man att på nanonivå så spelar även storleken roll. För den kemist som ville utveckla nya material fanns det alltså ytterligare en faktor att spela med. Så klart kittlade det forskarnas fantasi!

Det var bara ett problem: De metoder som Louis Brus använde för att skapa kvantprickar gav ofta partiklar av skral kvalitet. Kvantprickar är egentligen minimala kristaller (figur 2). De kristaller man fick fram var ofta defekta och dessutom varierade de ganska mycket i storlek. Behövde forskarna ha kvantprickar av en likartad storlek fick de sortera dem i efterhand. Det var en besvärlig process som hindrade utvecklingen.

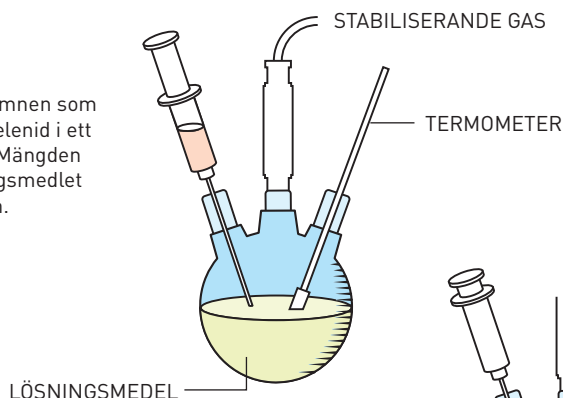
Moungi Bawendi revolutionerar tillverkningen av kvantprickar

Det här var ett problem som årets tredje Nobelpristagare i kemi bestämde sig för att lösa. Moungi Bawendi påbörjade en postdoktoral tjänst vid Louis Brus laboratorium år 1988. Där pågick då ett intensivt arbete för att utveckla bättre metoder för tillverkning av kvantprickar. Med hjälp av olika lösningsmedel, temperaturer och tekniker försökte man förmå olika ämnen att forma välartade nanokristaller. Och kristallerna blev bättre, men inte bra nog.

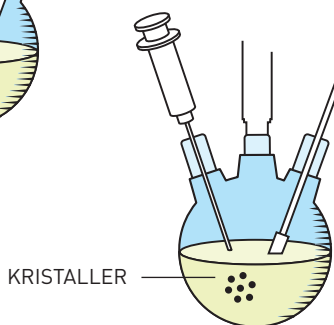
Bawendi gav sig dock inte. När han fick en tjänst som forskningsledare vid Massachusetts Institute of Technology, MIT, fortsatte han sin strävan mot mer högkvalitativa nanopartiklar. Det stora

Så tillverkade Mounji Bawendi kvantprickar

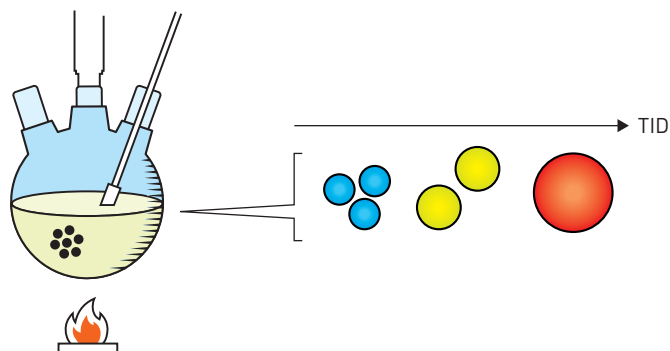
- 1** Bawendi injicerade ämnen som kan bilda kadmiumselenid i ett hett lösningsmedel. Mängden var så stor att lösningsmedlet mättades kring nålen.



- 2** Det bildades omedelbart små kristaller av kadmiumselenid. Eftersom injektionen kylde ner lösningsmedlet stannade dock kristallbildningen av.



- 3** När Bawendi höjde temperaturen på lösningsmedlet började kristallerna återigen växa. Ju längre tid detta fick pågå, desto större blev kristallerna.



genombrottet kom år 1993. Då injicerade forskargruppen de ämnen som skulle forma nanokristaller i ett upphettat och noga utvalt lösningsmedel. De sprutade in så mycket av ämnena i lösningen att den blev precis mättad, vilket ledde till att det vid en och samma tidpunkt började formas små embryon av kristaller (figur 4).

Genom att sedan på ett dynamiskt vis variera temperaturen i lösningen, lyckades Mounji Bawendi och hans forskargrupp få nanokristaller av en bestämd storlek att växa fram. Under denna fas spelade lösningsmedlet en viktig roll, eftersom det bidrog till att ge kristallerna en jämn och fin yta.

De nanokristaller som Mounji Bawendi framställde var närmast perfekta och gav därför upphov till distinkta kvanteffekter. Eftersom tillverkningsmetoden samtidigt var enkel att använda, blev den revolutionerande. Allt fler kemister gav sig in i nanotekniken och började utforska kvantprickarnas originella egenskaper.

Figur 4.

Kvantprickars lysande egenskaper används kommersiellt

Numera – trettio år senare – är kvantprickar en viktig del av nanoteknikens verktygslåda och de finns i flera kommersiella produkter. Forskare har framför allt utnyttjat kvantprickar för att skapa färgat ljus. Om man belyser kvantprickar med blått ljus, kommer de att absorbera ljuset och lysa i en annan färg. Genom att modifiera storleken på partiklarna, går det att bestämma exakt vilken färg deras sken ska ha (figur 3).

Kvantprickars lysande egenskaper utnyttjas bland annat i bild- och teveskärmar som bygger på så kallad QLED-teknik, där Q:et står för *quantum dot* (kvantprickar). I sådana skärmar skapas blått

LÄS MER

Mer information om årets priser, bland annat en vetenskaplig bakgrundsartikel på engelska, finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, www.kva.se, och på www.nobelprize.org. Där kan man också titta på presskonferenser, Nobelföreläsningar och annat videomaterial. Mer information om utställningar och aktiviteter kring Nobelpriset och Ekonomipriset finns på www.nobelprizemuseum.se.

Kungl. Vetenskapsakademien har beslutat utdela Nobelpriset i kemi 2023 till

MOUNGI G. BAWENDI

Född 1961 (62 år) i Paris, Frankrike. Fil.dr 1988 vid University of Chicago, IL, USA. Professor vid Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA.

LOUIS E. BRUS

Född 1943 (80 år) i Cleveland, OH, USA. Fil.dr 1969 vid Columbia University, New York, NY, USA. Professor vid Columbia University, New York, NY, USA.

ALEKSEY YEKIMOV

Född 1945 (78 år) i dåvarande Sovjetunionen. Fil.dr 1974 vid Ioffe Physical-Technical Institute, Sankt Petersburg, Ryssland. Tidigare Chief Scientist på Nanocrystals Technology Inc., New York, NY, USA.

”för upptäckt och syntes av kvantprickar”