

## Kristaller av ett gyllene snitt

När **Dan Shechtman** gjorde upptäckten bakom 2011 års Nobelpris i kemi markerade han den med tre frågetecken i sin anteckningsbok. Kristallen framför honom hade en symmetri bland atomerna som var förbjuden. Den var lika omöjlig som en fotboll gjord av bara sexhörningar. Mosaiker med speciella mönster, och det gyllene snittet inom matematiken och konsten, har senare hjälpt till att förklara den förbryllande observationen.

”Eyn chaya kazo”, sa Dan Shechtman för sig själv. ”Det finns inga sådana djur” på hebreiska. Det var på morgonen den 8 april 1982. Materialet han studerade, en blandning av metallerna aluminium och mangan, såg besynnerligt ut och han hade tagit elektronmikroskopet till hjälp för att undersöka det på atomnivå. Bilden som mikroskopet gav var mot all logik: den bestod av flera cirklar som alla innehöll tio ljusstarka prickar på jämna avstånd från varandra (bild 1).

Dan Shechtman hade snabbkyllt den glödande metallsmältan, och den häftiga temperaturförändringen borde ha gett en total oordning bland atomerna inuti materialet. Men mönstret på bilden skvallrade om något helt annat: atomerna var ordnade på ett sätt som var mot naturlagarna. Dan Shechtman räknade prickarna flera gånger. Det fick vara till exempel fyra eller sex prickar, men absolut inte tio prickar i ringarna. I sin anteckningsbok skrev han till slut: 10 Talig???

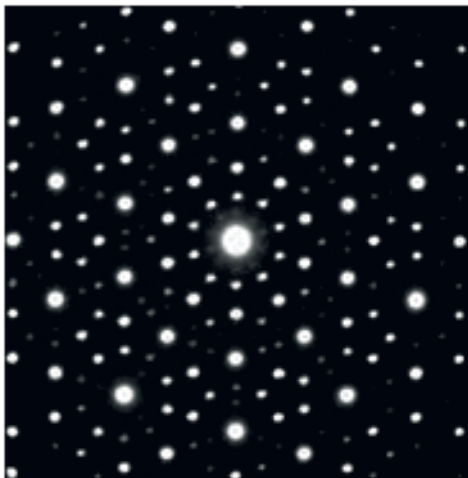


Bild 1. Dan Shechtmans diffraktionsmönster var tiotaligt: samma mönster återkommer om bilden vrids en tiondels varv.

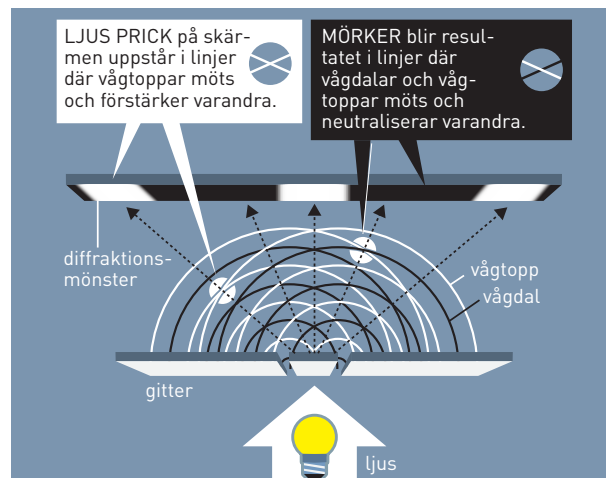


Bild 2. När en ljusstråle bryts av ett gitter sprids strålarna. Ljusets vågtoppar och vågdalar interfererar, vilket ger ett diffraktionsmönster på skärmen bakom.

### Vågtoppar och vågdalar i samarbete

För att förstå Dan Shechtmans experiment, och varför han blev så förvånad, behöver vi göra ett skolexperiment som visar hur ljusvågor kan förstärka varandra. Fysikläraren skickar ljus genom en metallplatta med hål i, ett så kallat gitter (bild 2). När ljusvågor går genom gittret bryts de som vattenvågor som färdas genom ett hål i en vågbrytare.

På andra sidan sprids vågorna i halvcirklar som korsar varandras väg. Ljusvågornas toppar och dalar förstärker och tar ut varandra. På en skärm bakom gittret framträder ett mönster av ljusa och mörka partier. Detta mönster kallas diffraktionsmönster.

Det var ett sådant diffraktionsmönster (bild 1) som Dan Shechtman fick fram den där april morgonen 1982. Men hans experiment var annorlunda: han använde elektroner istället för ljus, hans gitter var atomerna inuti den snabbkylda metallen och han arbetade i tre dimensioner.

Diffraktionsmönstret visade att atomerna inuti metallen hade packat sig i en regelbunden kristall. Det i sig var inget häpnadsväckande. Nästan alla fasta material, från is till guld, består av regelbundna kristaller. Men diffraktionsmönstret med de tio ljusstarka prickarna i en ring kände Dan Shechtman inte igen, trots att han var en erfaren elektronmikroskopist. Sådana kristaller fanns inte heller i kristallografernas referensverk: International Tables for Crystallography. Samtidigt vetenskap sa helt enkelt att det aldrig kunde bli tio prickar i en ring. Beviset för det var lika enkelt som självklart.

## Ett mönster mot all logik

Inuti kristaller sitter atomer ordnade i mönster som upprepar sig. Beroende på vilket grundämne det är, eller vilken blandning av grundämnen, bildas olika symmetrier. I bild 3a har varje atom tre andra likadana atomer runt sig, i ett upprepat mönster. Det är en trefaldig symmetri. Om du vrider bilden ett tredjedels varv, så få du tillbaka samma bild. Samma sak gäller fyrtdig symmetri (bild 3b) och sextalig symmetri (bild 3c). Mönstren upprepar sig, och om du vrider bilden ett fjärdedels respektive ett sjättedels varv återfår du samma bild.

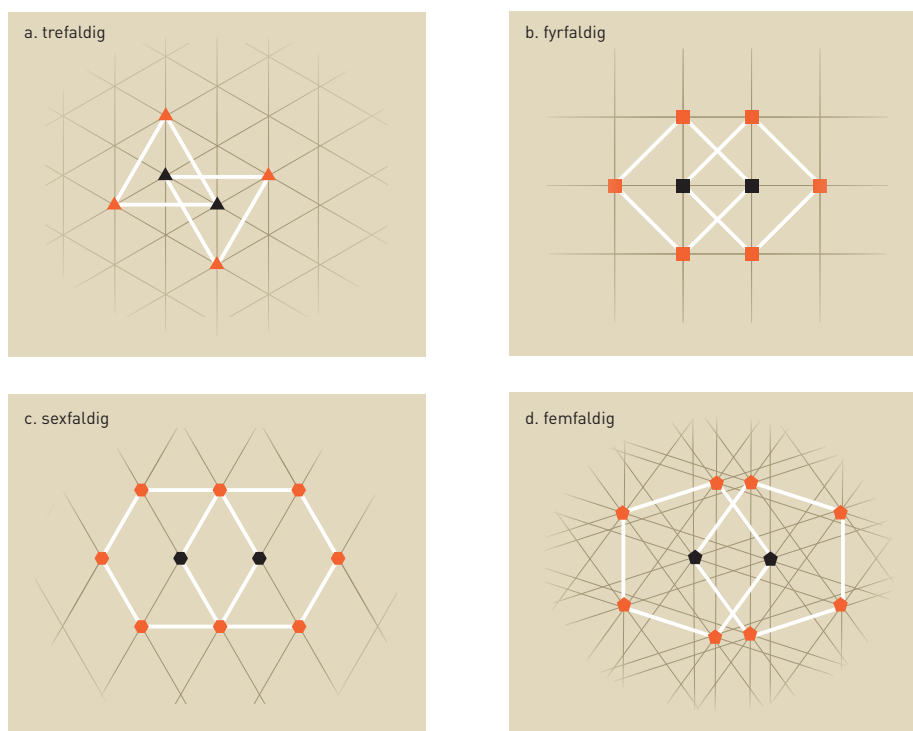


Bild 3. Olika symmetrier i kristaller. Mönstret i kristallen med femtdaliga symmetrin kommer aldrig att upprepa sig.

Detta fungerar däremot inte med femtdalig symmetri (bild 3d). Avståndet mellan vissa atomer blir kortare än mellan andra atomer. Mönstret bryter samman och upprepar sig aldrig, vilket var forskarnas bevis för att det inte gick att få en femtdalig symmetri i kristaller. Samma sak gällde sjutalig symmetri och alla symmetrier däröver.

Dan Shechtman kunde vrida sitt diffraktionsmönster ett tiondels varv, och få tillbaka samma mönster. Det hade alltså en förbjuden tiotalig symmetri. Att Shechtman markerade sin observation med hela tre frågetecken i anteckningsboken var alltså inte konstigt.

## Läroboken sa att han måste ha fel

Dan Shechtman tittade ut i den långa korridoren på National Institute of Standards and Technology, NIST, i USA för att hitta någon som han kunde visa sin upptäckt för. Men i korridoren var det tomt. Istället gjorde han fler experiment på den underliga kristallen. Bland annat kontrollerade han om han hade råkat få en så kallad tvillingkristall: två kristaller som har vuxit in i varandra och där skarven kan ge konstiga diffraktionsmönster. Men försöken visade att det inte var någon tvillingkristall.

Shechtman roterade också kristallen i elektronmikroskopet för att se hur mycket han behövde vrida den för att få tillbaka ett tiotaligt diffraktionsmönster. Det experimentet visade att själva kristallen inte var tiotaligt som diffraktionsmönstret, utan att den istället hade en lika förbjuden femtalig symmetri. Dan Shechtman konstaterade för sig själv att forskarsamhället dittills måste ha haft fel i sina antaganden.

Motståndet som Shechtman mötte när han berättade om sin upptäckt var kompakt. Av vissa kollegor blev han rent av förlöjligad. Många menade att det visst var en tvillingkristall. Chefen för laboratoriet gav honom en lärobok i röntgenkristallografi och bad honom att läsa den. Men Dan Shechtman visste redan vad som stod i läroboken, och han litade mer på sina experiment än på den. Shechtman har senare berättat att all uppståndelse fick hans chef att be honom lämna forskargruppen. Situationen blev alltför pinsam.

## Kamp mot etablerad kunskap

Dan Shechtman hade disputerat vid Technion – Israel Institute of Technology, och 1983 lyckades han få kollegan Ilan Blech från hemuniversitetet intresserad av de märkliga resultaten. Tillsammans försökte de tolka diffraktionsmönstret och översätta det till ett atommönster inuti en kristall. De skrev en artikel som de sommaren 1984 skickade till *Journal of Applied Physics*. Men artikeln kom i princip tillbaka med vändande post. Redaktören hade refuserat den.

Dan Shechtman bad sedan John Cahn, en erkänd fysiker som en gång hade lockat honom till NIST, att titta på hans data. Den annars upptagna forskaren tog sig till slut an upptäckten och konsulterade också en fransk kristallograf, Denis Gratias, för att höra om Shechtman kunde ha missat något. Men Gratias menade att Shechtmans experiment var pålitliga. Han skulle ha gjort likadant själv.

Tillsammans med Cahn, Blech och Gratias kunde Shechtman till slut, i november 1984, publicera sina data i *Physical Review Letters*. Artikeln slog ner som en bomb bland kristallografer. Den ifrågasatte den mest grundläggande sanningen inom deras vetenskap: att alla kristaller är uppbyggda av återkommande, periodiska, mönster.

## En upptäckt som andra hade blundat för

Upptäckten nådde nu en bredare krets och Dan Shechtman fick utstå än mer kritik. Men parallellt med detta, drabbades kristallografer runt om i världen av déjà vu. Flera hade fått diffraktionsmönster liknande Shechtmans när de hade studerat andra material. Avvikelsen hade bortförklarats som tvillingkristaller, men nu började de gräva i sina byrålådor. Ganska snart dök det upp kristaller med andra symmetrier som stred mot logiken, till exempel åttatalig och tolvtalig.

När Dan Shechtman publicerade sin upptäckt hade han fortfarande ingen riktigt bra förståelse av hur den märkliga kristallen egentligen såg ut inuti. Den hade bevisligen en femtalig symmetri – men hur låg atomerna packade? Svaret kom från ett oväntat håll. Från matematiska lekar med mosaiker.

## Mosaiker ger förklaringen

Matematiker gillar att ställa sig själva inför utmaningar och logiska problem. Under 1960-talet började de fundera på om det med ett begränsat antal kakelplattor går att lägga en mosaik som aldrig upprepar sig, en så kallad *aperiodisk* mosaik. Det första lyckade försöket rapporterades 1966 av en amerikansk matematiker. Men det krävde över 20 000 olika slags bitar, alldeles för många för att tillfredsställa matematikers strävan efter det enkla. Fler tog sig an problemet och sakta men säkert krympte antalet bitar. Under mitten av 1970-talet nådde britten Roger Penrose, professor i matematisk fysik, ett eftersträvarsvärt mål: aperiodiska mosaiker som bara bestod av två olika kakelplattor, till exempel en fet och en smal romb (bild 4:1).

Penroses mosaiker inspirerade forskarvärlden på många olika plan. Bland annat har de lett till analyser av medeltida islamska mönster. Dessa visar att arabiska konstnärer tillverkade aperiodiska mosaiker av fem olika slags kakelplattor redan på 1200-talet. Sådana mosaiker pryder bland annat det världsberömda palatset Alhambra i Spanien och portaler och valv i den iranska helgedomen Darb-i Imam.

Kristallografen Alan Mackay använde Penroses mosaik på ett annat vis. Han undrade om mosaikernas aperiodiska mönster kunde återfinnas bland atomerna i materiens innersta. Han gjorde ett experiment där han ersatte skärningspunkterna i Penroses mosaik med cirklar, som fick simulera atomer (bild 4:2). Sedan använde han detta mönster som ett gitter, för att se vilket diffraktionsmönster det gav. Det blev en tiofaldig symmetri. Tio ljusa prickar i en cirkel.

Kopplingen mellan Mackays modell och Shechtmans riktiga diffraktionsmönster gjorde fysikerna Paul Steinhardt och Dov Levine. Innan Shechtmans artikel gick i tryck, skickade redaktören för *Physical Review Letters* iväg den till andra forskare för vetenskaplig granskning. I den processen fick Paul Steinhardt läsa artikeln. Han kände redan till Mackays experiment och han insåg att Mackays teoretiska tiofaldiga symmetri fanns i verkligheten på Shechtmans labb vid NIST.

På julafton 1984, bara fem veckor efter att Shechtmans artikel gick i tryck, publicerade Steinhardt och Levine en artikel där de beskrev kvasikristallerna med aperiodiska mosaiker. Det var i den publikationen som kvasikristallerna fick sitt namn.

## Det gyllene snittet – en nyckel

En fascinerande detalj med både kvasikristaller och aperiodiska mosaiker är att matematikens gyllene snitt, talet  $\tau$  (tau), återkommer om och om igen. Till exempel blir kvoten mellan antalet feta och antalet smala romber i Penroses mosaik talet  $\tau$ . Kvoter mellan olika atomavstånd i kvasikristaller är också alltid relaterade till  $\tau$ .

Talet  $\tau$  beskrivs av en talserie som den italienska matematikern Fibonacci fick fram på 1200-talet genom ett högst hypotetiskt experiment med kaniners fortplantning. I denna välkända talserie utgör summan av de två föregående talen, nästa tal i serien: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144 och så vidare. Om du delar ett av de högre talen i fibonacciserien med det föregående talet – till exempel 144/89 – får du ett tal som ligger nära det gyllene snittet.

Både fibonacciserien och det gyllene snittet är viktiga för forskare när de från diffraktionsmönster räknar ut hur kvasikristaller ser ut på atomnivå. Fibonacciserien kan också förklara hur upptäckten bakom 2011 års Nobelpris i kemi har ändrat kemisters syn på regelbundenhet i en kristall.

**1** Under mitten av 1970-talet lyckas matematikern Roger Penrose lägga en aperiodisk mosaik vars mönster aldrig upprepas med hjälp av enbart två olika kakelplattor: en smal och en fet romb.

smal romb      fet romb

**2** 1982 gör Alan Mackay ett teoretiskt experiment där han ritar in ringar, som får representera atomer, i skärningspunkter i Penroses mosaik. Han lyser med en lampa på modellen och får fram ett tiotaligt diffraktionsmönster.

*Mackays teoretiska diffraktionsmönster*

**3** 1984 kopplar Paul Steinhardt och Dov Levine ihop Mackays teoretiska och Shechtmans riktiga diffraktionsmönster. De inser att aperiodiska mosaiker kan hjälpa till att förklara Shechtmans märkliga kristaller.

*Shechtmans riktiga diffraktionsmönster*

*1982 ger Dan Shechtmans elektronmikroskop ett mönster mot all logik. De tio ljusstarka prickarna i varje ring skvallrar om en tiotalig symmetri. Men det var mot naturlagarna.*

Bild 4

## Regelbundet utan upprepning

Tidigare tolkade kemister kristallers regelbundenhet som ett periodiskt mönster som upprepar sig. Men fibonacciserien är också regelbunden, den följer en matematisk regel, men den upprepar sig aldrig. Atomavstånden i kvasikrystaller följer fibonacciserien, atomerna är regelbundet ordnade och en kemist kan förutse hur en kvasikrystall ser ut inuti. Men denna regelbundenhet är inte samma sak som att kristallen är periodisk.

Denna insikt har fått The International Union of Crystallography att 1992 ändra sin definition av vad en kristall är. Tidigare hade en kristall beskrivits som ”en substans i vilken de utgörande atomerna, molekylerna, eller jonerna är packade i ett regelbundet ordnat, upprepat tredimensionellt mönster”. Nu blev definitionen ”ett fast ämne som i huvudsak har ett diskret diffraktionsdiagram”. Det är en vidare definition, öppen för att man i framtiden kan hitta andra slags kristaller.

## Kvasikrystaller i naturen...

Sedan upptäckten 1982 har hundratals olika kvasikrystaller tillverkats på laboratorier runt om i världen, alla framtagna på konstgjord väg. Men sommaren 2009 kom den första rapporten om naturliga kvasikrystaller. Forskare hittade ett nytt slags mineral i prover från Khatyrkafloden som ligger i östra Ryssland. Mineralen består av aluminium, koppar och järn och ger ett diffraktionsmönster med tiotalig symmetri. Det har fått namnet ikosaedrit, efter ikosaedern, en kropp med 20 regelbundna trehörningar som sidor och som har det gyllene snittet inbyggt i sin geometri.

## ...och i ett av världens starkaste stål

Kvasikrystaller kan också förklara styrkan i ett av världens mest hållbara stål. Ett svenskt företag fick fram ett stål med förvånansvärt bra egenskaper när de provade olika metallblandningar. Studier av atomstrukturen har visat att stålet består av två olika faser: hårda kvasikrystaller som ligger inbäddade i en mjukare form av stål. Kvasikrystallerna fungerar som en slags armering. Stålet används bland annat i rakblad och i tunna nålar för ögonkirurgi.

Förutom att de är hårda (men ändå sköra, ungefär som glas), har kvasikrystaller, tack vare sin unika atomstruktur, andra speciella egenskaper. De leder värme och elektricitet dåligt, och ytan är avstötande. Kvasikrystallers dåliga värmeledningsförmåga gör att de kan bli användbara som så kallade termoelektrika, material som omvandlar värme till elektrisk ström. Det stora målet med sådan forskning är att kunna återanvända spillvärme från till exempel bilar och lastbilar. Idag experimenterar forskare också med kvasikrystaller som till exempel beläggning i stekpannor, värmeisolerande material i motorer och komponenter i energisnåla ljusemitterande dioder (LED).

## En viktig lärdom för vetenskapen

Dan Shechtmans historia är ingalunda unik. Under vetenskapshistorien har forskare gång på gång fått slåss mot ”sanningar”, som i eftertankens kranka blekhet visat sig vara rena antaganden. En av Dan Shechtmans och kvasikrystallernas hårdaste motståndare var Linus Pauling, belönad med Nobelpriset två gånger. Det visar att ingen är immun mot att fastna i konventionerna. Att vara öppen i sinnet och våga ifrågasätta etablerad kunskap, är kanske den viktigaste egenskap en forskare kan ha.

---

## LÄNKAR OCH LÄSTIPS

Mer information om årets priser, bland annat en vetenskaplig bakgrundsartikel på engelska, finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats, <http://kva.se> och på <http://nobelprize.org>. Där kan man också se presskonferensen som webb-TV. Mer information om utställningar och aktiviteter kring Nobelprisen och Ekonomipriset finns på [www.nobelmuseet.se](http://www.nobelmuseet.se).

### Webbplatser

**Shechtman, D.**, Technion – Israel Institute of Technology, <http://materials.technion.ac.il/shechtman.html>

**Lifshitz, R.**, Introduction to quasicrystals, [www.tau.ac.il/~ronlif/quasicrystals.html](http://www.tau.ac.il/~ronlif/quasicrystals.html)

### Intervjuer och föreläsningar (video och bildspel)

**Shechtman, D.** (2010) Quasicrystals, a new form of matter, [www.youtube.com/watch?v=EZRTz0MHQ4s](http://www.youtube.com/watch?v=EZRTz0MHQ4s)

**Senechal, M.** (2011) Quasicrystals gifts to mathematics,

[www.youtube.com/watch?v=pjao3H4z7-g&feature=relmfu](http://www.youtube.com/watch?v=pjao3H4z7-g&feature=relmfu)

**Steurer, W.** (2011) Fascinating quasicrystals, [www.youtube.com/watch?v=jM4AipG0dk](http://www.youtube.com/watch?v=jM4AipG0dk)

**Steinhardt, P.J.**, What are quasicrystals?, [www.physics.princeton.edu/~steinh/QuasiIntro.ppt](http://www.physics.princeton.edu/~steinh/QuasiIntro.ppt)

### Populärvetenskapliga artiklar

**Rose, J. och Olovsson, I.** (2007) Matematiken erövrar ytan, *Forskning & Framsteg*,

[www.fof.se/tidning/2007/5/matematiken-erovrar-ytan](http://www.fof.se/tidning/2007/5/matematiken-erovrar-ytan)

**Shtull-Trauring, A.** (2011) Clear as crystal, *Haaretz*,

[www.haaretz.com/weekend/magazine/clear-as-crystal-1.353504](http://www.haaretz.com/weekend/magazine/clear-as-crystal-1.353504)

*Scientific American*, [www.scientificamerican.com](http://www.scientificamerican.com), sök på quasicrystals.

### Böcker

**Hargittai, B. and Hargittai, I.** (2005) *Candid Science V: Conversations with Famous Scientists*,

Imperial College Press, London.

### Originalartikel

**Shechtman, D., Blech, I., Gratias, D., and Cahn, J.W.** (1984) Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry, *Phys. Rev. Lett.* 53(20):1951-1954.

---

## PRISTAGARE

### DAN SHECHTMAN

Israelisk medborgare. Född 1941 (70 år)  
i Tel Aviv, Israel. Fil.dr 1972 vid Technion  
– Israel Institute of Technology, Haifa,  
Israel. Distinguished Professor, The  
Philip Tobias Chair vid Technion – Israel  
Institute of Technology, Haifa, Israel.