

Märkliga företeelser i materiens plattland

Årets Nobelpristagare öppnade portar till en okänd värld av materia som försätts i märkliga tillstånd. Priset utdelas med ena hälften till **David J. Thouless**, University of Washington, Seattle, och med den andra hälften till **F. Duncan M. Haldane**, Princeton University och **J. Michael Kosterlitz**, Brown University, Providence. Deras upptäckter har inneburit flera genombrott i den teoretiska förståelsen av materiens hemligheter och skapat nya perspektiv för framtida utveckling av nya material.

David Thouless, Duncan Haldane och Michael Kosterlitz har med avancerade matematiska metoder gett förklaringar till flera märkliga fenomen hos ovanliga materiefaser (eller materietillstånd) som till exempel supraledare, supravätskor eller tunna magnetiska filmer. Kosterlitz och Thouless har studerat fenomen som uppkommer i en platt värld – på ytor eller inuti extremt tunna skikt som kan betraktas som tvådimensionella jämfört med de tre dimensioner (längd, bredd och höjd) som verkligheten oftast beskrivs med. Haldane har även studerat materia som format trådar så tunna att de kan betraktas som endimensionella.

Den fysik som utspelar sig i plattlandet skiljer sig en hel del från den vi känner igen från vår vardag. Även mycket tunt fördelad materia består av miljontals atomer, och fastän varje enskilda atoms beteende kan förklaras av kvantfysiken så uppvisar atomerna helt andra egenskaper när de blir många tillsammans. Nya kollektiva fenomen upptäcks ständigt, och den kondenserade materiens fysik är i dag ett av de livligaste områdena inom fysiken.

Avgörande för de tre pristagarnas upptäckter var att de använde topologiska begrepp inom fysiken. Topologi är en gren av matematiken som beskriver egenskaper vilka förändras bara stegvis. Med den moderna topologin som verktyg kunde årets pristagare presentera överraskande resultat. Dessa har öppnat nya forskningsområden och också lett till att skapa nya begrepp av betydelse för flera områden inom fysiken.

Kvantfysiken blir synlig i kylan

All materia följer innerst inne kvantfysikens lagar. I gaser, vätskor och fasta ämnen, som är materiens vanliga faser, döljs dock kvanteffekterna ofta av atomernas slumpmässiga rörelser. Men i den extrema kylan, i närheten av den absoluta nollpunkten (-273 grader Celsius) antar materien märkliga faser och beter sig på oväntade sätt (fig. 1) Kvantfysiken, som annars bara verkar i det lilla, blir plötsligt synlig.

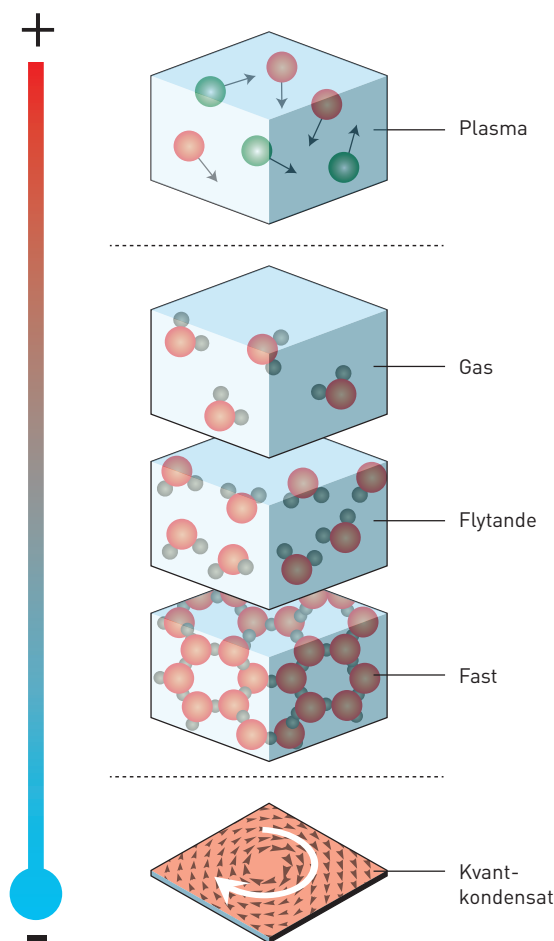


Fig. 1 Materiefaser. De vanligaste faserna är gas, flytande och fast materia. Men i extrem kyla eller hög värme antar materien andra och mer exotiska tillstånd.

Även de vardagliga materiefaserna övergår i varandra när temperaturen ändras. En fasövergång sker till exempel när is, som består av välordnade kristaller, värms upp och smälter till vatten, en mer kaosartad materiefas. Kikar man in i materiens mindre kända platta världar dyker det upp helt andra materiefaser som inte är fullt utforskade än.

Märkliga saker uppenbarar sig i kylan. Till exempel upphör plötsligt det motstånd som annars möter allt som rör sig. Så blir det när elektrisk ström flyter igenom ledningarna utan motstånd i en supraledare, eller när en virvel i en supravätska snurrar för evigt utan att sakta ner. Den förste som på 1930-talet systematiskt studerade supravätskor var ryssen Pjotr Kapitsa. Han kylde den i luften förekommande gasen helium-4 till -271 grader Celsius och fick den att krypa uppför kärlets väggar, alltså uppföra sig just så konstigt som en supravätska ska när viskositeten upphör helt. Kapitsa belönades med Nobelpris i fysik 1978, och sedan dess har flera sorters supravätskor skapats i laboratoriet. Supraflytande helium, tunna filmer av supraledare, tunna skikt av magnetiska material och elektriskt ledande nanotrådar är några av de många nya material som studeras intensivt i dag.

Virvelparen bar på lösningen

Länge trodde forskarna att i den tvådimensionella platta världen så förstör termiska fluktuationer all ordning i materien, till och med vid absoluta nollpunkten. Finns det inga ordnade faser så är inga fasövergångar möjliga. Men i början av 1970-talet möttes David Thouless och Michael Kosterlitz i Birmingham, Storbritannien, där de utmanade den rådande teorin. Tillsammans tog de sig an frågan om fasövergångarna i de platta världarna (den förste av nyfikenhet, den andre av okunskap, enligt egen utsago). Samarbetet ledde till en helt ny förståelse av fasövergångar, och deras modell av den topologiska fasövergången anses vara en av 1900-talets viktigaste upptäckter inom den kondenserade materiens teori. Den kallas KT-övergången (Kosterlitz-Thouless) eller BKT-övergången, där B står för Vadim Berezinskij, en numera avliden teoretisk fysiker i Moskva som kommit med liknande idéer.

Den topologiska fasövergången är ingen vanlig fasövergång som den mellan is och vatten. Huvudrollen i den topologiska övergången spelas av små virvlar i det platta materialet. Vid låga temperaturer bildar de sammanbundna virvelpar. När temperaturen höjs inträffar fasövergången: virvlarna skiljs plötsligt från varandra och seglar iväg i materialet på egen hand (fig. 2).

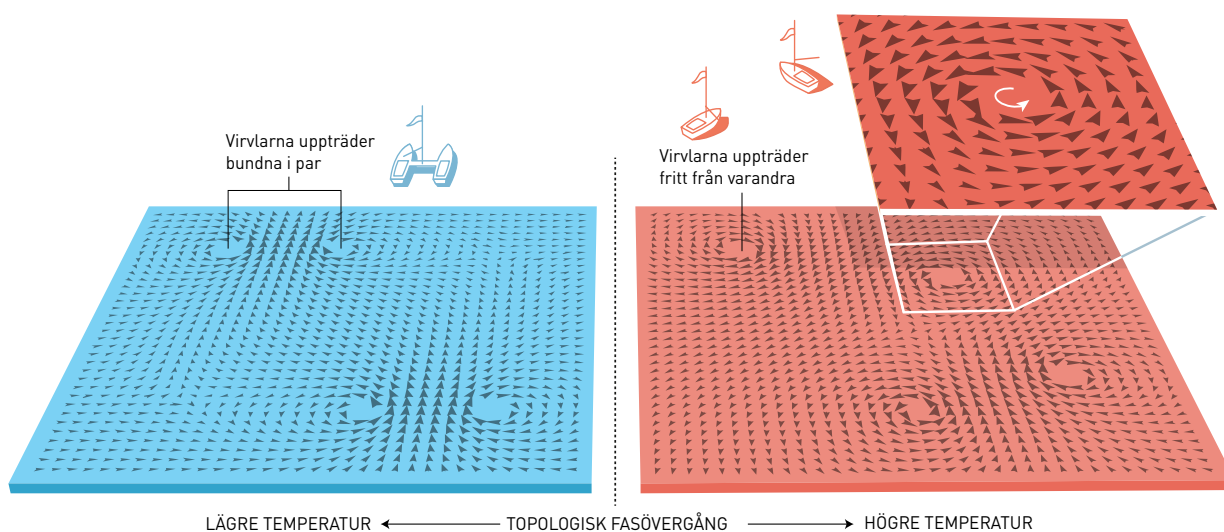


Fig. 2 Fasövergång. Den inträffar när materiefaserna övergår i varandra, som när is smälter till vatten. Med hjälp av matematikens topologi beskrev Kosterlitz och Thouless en topologisk fasövergång i ett tunt skikt av mycket kall materia. I kylan bildades virvelpar som plötsligt löstes upp vid temperaturen för fasövergången. Det blev en av 1900-talets viktigaste upptäckter inom den kondenserade materiens fysik.

Tjusningen med denna modell är att den beskriver olika sorters material – KT-övergången är universell. Den har blivit ett användbart verktyg inte bara inom den kondenserade materiens idévärld, utan även inom andra grenar av fysiken, som atomfysik eller statistisk mekanik. Därmed har teorin för KT-övergången också utvecklats vidare av både sina upphovsmän och andra, och även bekräftats experimentellt.

Gåtan med de exakta kvantsprången

Den experimentella utvecklingen frambringade så småningom en mängd nya materiefaser som krävde sin förklaring. På 1980-talet presenterade David Thouless och Duncan Haldane nya banbrytande teoretiska arbeten som utmanade tidigare teorier. En av dem var den kvantmekaniska teorin för att avgöra vilka material som är elektriskt ledande. Denna började utvecklas redan på 1930-talet och några decennier senare ansågs denna del av fysiken vara väl förstådd.

Det kom därför som en stor överraskning när David Thouless år 1983 visade att den tidigare bilden var ofullständig – vid låga temperaturer och starka magnetfält krävdes en ny typ av teori där topologiska begrepp utgör det centrala. Ungefär samtidigt drog även Duncan Haldane en liknande och lika oväntad slutsats när han analyserade magnetiska atomkedjor. Bådas arbeten har haft en avgörande betydelse för den senare dramatiska utvecklingen av teorin för nya materiefaser.

Det gåtfulla fenomen som David Thouless förklarade teoretiskt med hjälp av topologin är den kvantiserade Halleffekten. Effekten upptäcktes 1980 av den tyske fysikern Klaus von Klitzing, vilket belönades med Nobelpriset 1985. von Klitzing studerade ett tunt ledande skikt kylt till bara några grader över den absoluta nollpunkten, där elektroner rör sig mellan två halvledare i ett starkt magnetfält.

Att drastiska saker händer när man sänker temperaturen är inte ovanligt i fysiken, till exempel blir många material magnetiska. Detta går att förklara med att alla de små atomära magneterna i materialet plötsligt pekar i samma riktning och ger upphov till ett starkt magnetfält, vilket också kan bekräftas med mätningar.

Men den kvantiserade Halleffekten är svårare att förstå: den elektriska ledningsförmågan i skiktet visar sig bara kunna anta vissa värden som dessutom är extremt exakta, vilket är ovanligt i fysiken. Mätningar ger precis samma resultat även om temperaturen, magnetfältet eller mängden föroreningar i halvledarmaterialet varierar något. Om magnetfältet ändras tillräckligt mycket, ändras även ledningsförmågan i skiktet, fast bara stegvis. När styrkan hos magnetfältet minskas, blir ledningsförmågan plötsligt först exakt dubbelt så stor, så tredubblas den, fyrdubblas, och så vidare. Dessa heltalssteg gick inte att förklara med redan känd fysik. David Thouless fann som sagt lösningen på gåtan med hjälp av topologi.

Topologin gav svaret

Topologi beskriver de egenskaper som förblir intakta när objekten dras ut, vrids eller deformeras. Dock inte om de slits itu. Topologiskt sett ingår ett klot och en skål i samma kategori – en sfärisk lerklump går att omvandla till en skål. Medan en bagel med ett hål i mitten och en kaffekopp med ett hål i handtaget ingår i en annan kategori, de kan också knådas om i varandra. Topologiska objekt kan alltså innehålla ett hål, två, tre, fyra – antalet kan bara anges med heltal. Detta visade sig användbart för att beskriva vad som händer med ledningsförmågan i den kvantiserade Halleffekten, som alltså bara förändras i steg, som en exakt multipel av heltal (fig. 3).

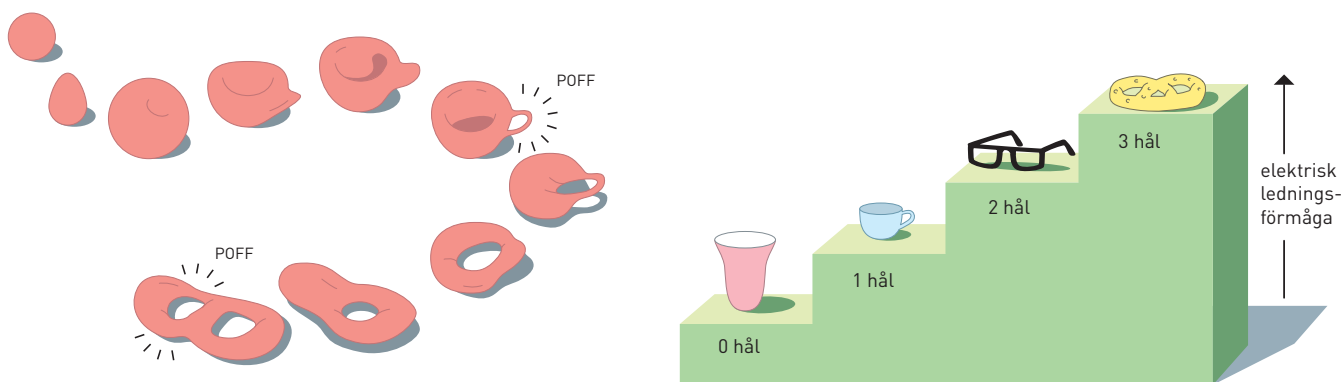


Fig 3. Topologi. Denna gren av matematiken intresserar sig för de egenskaper som förändras stegvis, som antalet hål ovan. Topologin blev nyckeln till Nobelpristagarnas upptäckter, och den förklarar varför den elektriska ledningsförmågan inuti tunna skikt ändras stegvis och bara anges med heltal.

I den kvantiserade Halleffekten rör sig elektronerna i skiktet mellan halvledarna relativt fritt och bildar vad som kallas en *topologisk kvantvätska*. På samma sätt som det ofta dyker upp helt nya egenskaper när många partiklar uppträder tillsammans, så uppvisar även elektronerna i den topologiska kvantvätskan överraskande drag. Liksom det inte går att avgöra om det finns ett hål i en kaffekopp genom att bara titta på en liten del av koppen, så går det inte heller att avgöra om elektronerna har bildat en topologisk kvantvätska om man bara mäter vad som sker med en del av dem. Det är bara elektronernas samlade rörelse som ger den totala ledningsförmågan. Den varierar som sagt stegvis, den är kvantiserad. Ett annat kännetecken hos den topologiska kvantvätskan är att dess gränsområden uppvisar ovanliga egenskaper. Dessa förutsades av teorin och har också så småningom bekräftats med experiment.

En annan milstolpe kom år 1988 när Duncan Haldane upptäckte att topologiska kvantvätskor, som den i kvantiserade Halleffekten, kan bildas i tunna halvledarskikt även utan något magnetfält. Han sade sig inte ens kunna drömma om att hans teoretiska modell någonsin skulle kunna påvisas i ett experiment. Men så sent som 2014 bekräftades modellen i ett experiment med atomer som kylts ner till nästan den absoluta nollpunkten.

På väg mot nya topologiska material

Redan långt tidigare, i ett arbete från 1982, gjorde Duncan Haldane en förutsägelse som förbluffade till och med experterna inom området. I teoretiska studier av kedjor av små magneter som förekommer i vissa material, fann han att kedjorna hade fundamentalt olika egenskaper beroende på karaktären hos de atomära magneterna. Enligt kvantfysiken finns det två typer av atomära magneter, udda och jämna. Haldane visade att en kedja bildad av jämna magneter är *topologisk* medan en kedja med udda magneter inte är det. I likhet med den topologiska kvantvätskan går det inte att avgöra om atomkedjan är topologisk bara genom att undersöka en liten del av kedjan. Och precis som i fallet med kvantvätskan avslöjar sig de topologiska egenskaperna i kanten, i det här fallet i kedjans ändpunkter där den kvantfysikaliska storheten som kallas spinn halveras i ändarna på en topologisk kedja.

Från början trodde ingen på Haldanes resonemang om atomkedjorna, forskarna var övertygade om att de redan förstod dem fullt ut. Men det visade sig att Haldane upptäckte ett första exempel på en ny typ av topologiska material vilka numera utgör ett livligt forskningsfält inom materialfysiken. Både kvantvätskan och den jämna magnetiska atomkedjan ingår i denna nya grupp av topologiska

materiefaser. Senare upptäckte forskarna flera andra oväntade topologiska faser, inte bara i kedjor och i tunna gränsskikt utan också i helt vanliga tredimensionella material.

Numera talas det bland annat om topologiska isolatorer, topologiska supraledare och topologiska metaller. Detta är ett område som under det senaste decenniet utgjort frontlinjeforskning inom den kondenserade materiens fysik, inte minst på grund av förhoppningen om att topologiska material ska kunna användas i nya generationer av elektronik och supraledare, eller i framtidens kvantdatorer. Men redan nu avslöjar forskarna materiens hemligheter i dessa exotiska platta världar som upptäckts av årets Nobelpristagare.

LÄNKAR OCH LÄSTIPS

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

Kungl. Vetenskapsakademien har beslutat utdela Nobelpriset i fysik 2016

med ena hälften till

och med andra hälften till

DAVID J. THOULESS

Född 1934 (82 år) i Bearsden, Storbritannien. Fil.dr 1958 vid Cornell University, Ithaca, NY, USA. Emeritus Professor vid University of Washington, Seattle, WA, USA.

<https://sharepoint.washington.edu/phys/people/Pages/view-person.aspx?pid=85>

F. DUNCAN M. HALDANE och

Född 1951 (65 år) i London, Storbritannien. Fil.dr 1978 vid Cambridge University, Storbritannien. Eugene Higgins Professor of Physics vid Princeton University, NJ, USA.

www.princeton.edu/physics/people/display_person.xml?netid=haldane&display=faculty

J. MICHAEL KOSTERLITZ

Född 1942 (73 år) i Aberdeen, Storbritannien. Fil.dr 1969 vid Oxford University, Storbritannien. Harrison E. Farnsworth Professor of Physics vid Brown University, Providence, RI, USA.

<https://vivo.brown.edu/display/jkosterlitz>

”för teoretiska upptäckter av topologiska fasövergångar och topologiska materiefaser”