

Topologiskt ordnad materia

Veckan före midsommar samlades ett femtiotal av världens ledande forskare för ett Nobelsymposium på Lidingö, för att under tre intensiva dagar diskutera egenskaperna hos vad som kallas topologiskt ordnad (TO) materia. I detta nya område inom den kondenserade materiens fysik studerar man materietillstånd som inte passar in i den klassificering av faser som återfinns i de flesta läroböcker.

Ur teoretisk synpunkt är topologiska materietillstånd utomordentligt intressanta eftersom flera av deras egenskaper kan förklaras med matematiska verktyg från det område som kallas topologi. Det innebär att de här egenskaperna är mycket robusta, och kan därför på ett relativt enkelt sätt verifieras i experiment.

Ett enkelt exempel på en topologisk egenskap är begreppet genus för en yta. En europeisk och en amerikansk fotboll har båda genus 0, och den ena kan deformeras till den andra genom att man drar och töjer. En badring har däremot genus 1 – det finns inget sätt att deformera en fotboll till en badring utan att riva sönder den och sen sy ihop. Egenskapen genus är

därför mycket stabil mot störningar, som till exempel sparkar.

De första TO tillstånd observerades redan på 1980-talet, i tunna gränsskikt mellan olika halvledare. I dessa skikt kan elektronerna röra sig nästan fritt, men när provet kyls till nära den absoluta nollpunkten, och placeras i ett mycket starkt magnetfält, bildar de en intrikat starkt växelverkande struktur som kallas för en kvanthallvätska. Elektronerna inuti skiktet är inte längre fria att röra sig och vätskan är därför en isolator. På kanterna av vätskeskiktet är elektronerna dock rörliga, men bara i en riktning (bestämmd av riktningen på magnetfältet, se fig. 1a). Man säger att kvanthallvätskan är en isolator med kirala kantmoder. Det är

bland annat de kirala kantmoderna som ger kvanthallvätskan dess topologiska karaktär.

Kvanthallvätskorna karakteriseras av Hallkonduktansen som beskriver vad som händer om man placerar vätskan i ett elektriskt fält (man får en ström vinkelrätt mot fältet). För vanliga metaller beror denna storhet på exakt hur provet är sammansatt, men för en topologisk vätska får man alltid samma konduktans, som orsakas av de kirala kantmoderna. Dessutom är konduktansen exakt lika med ett rationellt tal gånger en fundamental konstant, $R_K = h/e^2$, uppkallad efter Klaus von Klitzing som tilldelades 1985 års Nobelpris för upptäckten av kvanthalleffekten. Att denna relation är så exakt, beror på att

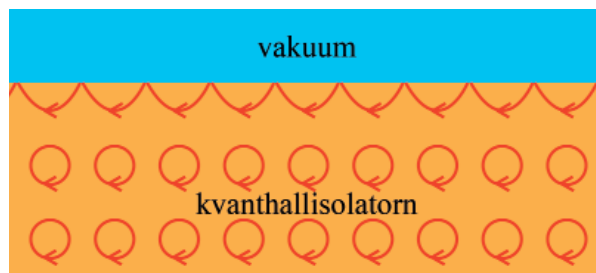
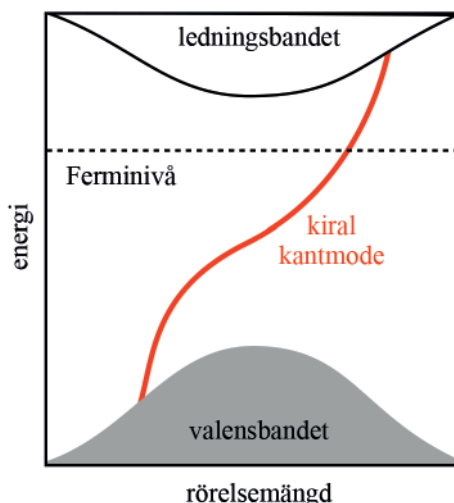


Fig 1.a. Kanten av en kvanthallvätska. Det magnetiska fältet är riktat ut ur pappret. Inuti materialet rör sig elektronerna i små cirklar (Larmor-banor) medan de på kanterna ”studsar sig fram”. Notera att elektronerna enbart rör sig i en riktning på kanten.

Fig 1b. Energivådiagram för kvanthallisolatorn i figur 1a



Hallkonduktansen är en topologisk egenskap för kvanthallvätskan.

Länge trodde man att topologiska tillstånd, om än aldrig så intressanta ur grundforskningssynpunkt, inte skulle kunna observeras utom i konstgjorda material som utsätts för extremt starka magnetfält. Det kom därför som en stor överraskning att det finns flera (kanske riktigt många) material som varit kända under lång tid och som, om man analyserar dem på rätt sätt, visar sig vara topologiskt ordnade. Dessa material kallas för topologiska isolatorer, och för att förstå dem måste vi först påminna oss om skillnaden mellan en metall och en isolator.

I en atom kan en elektron bara ha vissa (kvantiserade!) energier, men när

många atomer sitter nära varandra i en kristall sker något märkligt. I stället för att ha enskilda, separerade, energinivåer flyter de tillsammans till kontinuerliga "band" av energier, och dessa band är åtskilda genom ett "bandgap" som illustreras i fig. 2. Från denna bild är det lätt att förstå skillnaden mellan en isolator och en metall.

I metallen är det översta energibandet, ledningsbandet, delvis fyllt, och genom att putta på elektronerna med ett elektriskt fält får de lite mer energi och kan röra på sig. I en isolator är ledningsbandet helt tomt och det näst understa bandet, valensbandet, är helt fullt. Om man nu försöker putta på elektronerna så går det inte, eftersom valensbandet är

helt fullt. För att få en ström måste elektronerna upp till ledningsbandet och för detta krävs väldigt mycket energi. Så för svaga elektriska fält kan elektronerna inte ge upphov till någon ström. Ett sådant tillstånd kallas för en bandisolator.

Vi kan nu komplettera den här enkla bilden för att också förstå vad som händer i en kvanthallisolator där kanterna kan leda elektrisk ström. I fig. 1b ser vi att det finns en enda energinivå som binder samman valens och ledningsbandet, och denna nivå svarar precis mot att elektronerna på kanten kan röra sig fritt. Lutningen på linjen svarar mot hastigheten hos elektronerna så vi ser att de bara kan röra sig i en riktning, precis som visas i fig. 1a.

I en redan klassisk artikel från 2005 visade Charles Kane och Eugene Mele, som båda deltog i Nobelsymposiet, att det är möjligt att ha en situation som påminner om kvanthallisolatorn, men där elektronerna på kanterna kan röra sig i båda riktningarna. Denna situation illustreras i fig. 3b. Att detta var ett så förvånande resultat berodde på att de flesta fysiker tidigare trodde att elektronerna, som i en sådan situation rör sig i olika riktning, skulle kollidera med varandra och därför stoppa kantströmmen.

Kane och Meles stora upptäckt var att skillnaden i topologin i fig. 3a och 3b, gör att de strömledande kantmoderna är stabila i en topologisk isolator. För att förstå detta krävs ytterligare en insikt från kvantmekaniken. Elektroner är inte bara laddade, utan de har också ett spinn. Enklast kan man tänka på dem som små snurrande kulor, men med den märkliga egenskapen att "spinn" endast kan anta två kvantiserade värden, medsols eller motsols (också kallat upp eller ner). Man kan visa att i ett godtyckligt system av elektroner utan några magnetiska effekter, är alla energinivåer dubblerade.

Forts. nästa sida.

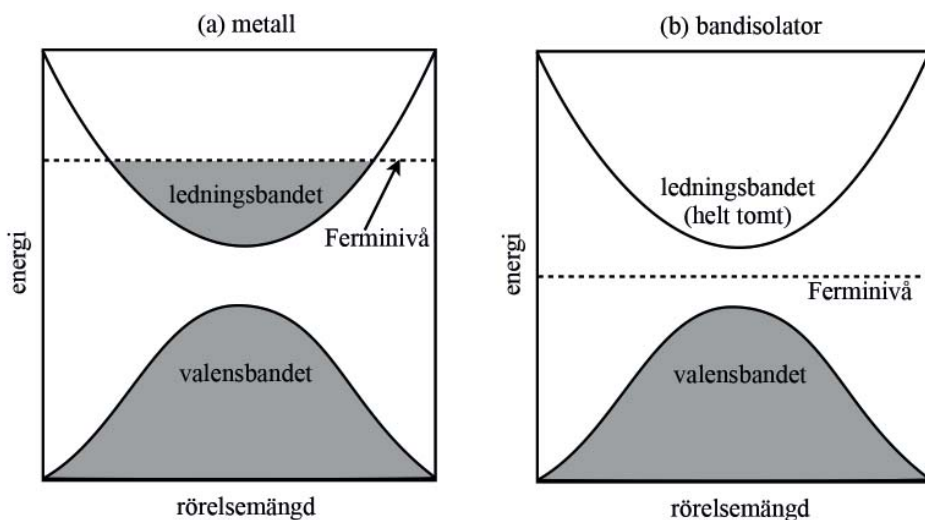


Fig 2. Metall (a) och bandisolator (b). Den prickade linjen är Ferminivån som bestäms av hur många elektroner som finns tillgängliga, dvs. hur många elektroner som har frigjort sig från atomerna.

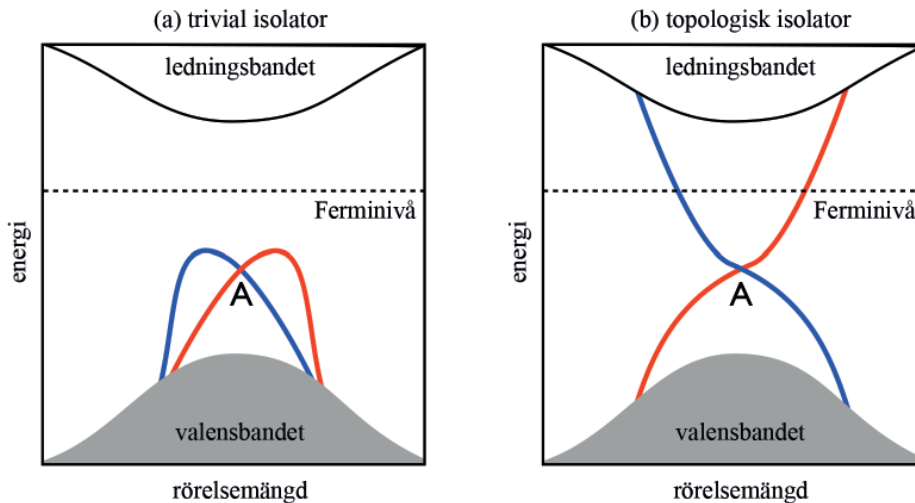


Fig 3. Energinivådiagram för en vanlig isolator (a) och en topologisk isolator (b). I en topologisk isolator finns det två energinivåer (en för spinn upp och en för spinn ner), som binder samman valens och ledningsbandet. Eftersom man inte får blanda dem, kan de inte kontinuerligt deformeras till energinivåerna för den triviala isolatorn i fig. 2b.

I riktiga material kan man ha två slags magnetiska effekter, dels från yttre magnetfält, dels från de magnetfält som genereras av strömmar i materialet självt – de senare brukar man kalla spinn-bankopplingar. Vad Kane och Mele insåg var att för vissa värden på elektronernas rörelsemängd ("x"-axeln i fig. 2 och 3) finns det inga magnetiska effekter och där måste energinivåerna komma i par.

I fig. 3 är A en punkt där det inte finns några magnetiska effekter, och vi ser att det bara finns två topologiskt skilda sätt att rita ett energinivådiagram, nämligen fig. 3a och 3b. I det första diagrammet kan vi genom att kontinuerligt ändra nivåerna i bandgapet komma till fig. 2b som är den vanliga, eller "triviala", bandisolatorn. För diagrammet i fig. 3b är detta omöjligt – detta tillstånd är topologiskt annorlunda än en vanlig bandisolator, det är en topologisk isolator! Precis som kvanthallisolatorn har en topologisk isolator kantmoder vilka binder samman valens och ledningsbandet, och dessa kantmoder ger upphov till en kvantiserad konduktans.

Kane och Meles artikel handlade faktiskt inte om vanliga material, utan om grafen (se Fysikaktuellt 2010 nr 4 och 2014 nr 2). Emellertid är spinn-bankopplingen i grafen väldigt svag, så det är inte möjligt att experimentellt studera ledningen på kanterna. Nästa stora insikt kom från gruppen kring Shou-Cheng Zhang som visade att i en legering av

kvicksilver och tellur är spinn-bankopplingen tillräckligt stark för att kunna mätas. De föreslog också hur man skulle kunna göra ett experiment som sedan genomfördes år 2007 av en tysk grupp ledd av Laurens Molenkamp. Experimenten visade klart att det rörde sig om en topologisk isolator, och ett nytt forskningsområde var etablerat!

Utvecklingen på området topologiskt ordnad materia har sedan gått mycket snabbt. Teorin för topologiska isolatorer generaliserades till tredimensionella kristaller där ytorna är elektriskt ledande och man föreslog också vilka material (olika legeringar av vismut, antimon, tellur och selen) som skulle vara lämpliga kandidater. Även dessa förutsägelser verifierades snabbt genom experiment vid Princeton och Stanford.

Som väl framgått av den här beskrivningen har teorin i många fall legat före experimenten. Detta har ofta varit fallet inom elementarpartikelfysiken (positronen, W och Z-partiklarna, Higgspartikeln etc.) men är mindre vanligt inom den kondenserade materiens fysik där experimenten nästan alltid kommer före teorin (och ibland långt före – supraledning upptäcktes 1911 och fick sin förklaring först 1957). En möjlig anledning till detta är att riktiga material ofta är väldigt komplicerade och det är svårt att förstå vilka egenskaper som är viktiga.

De topologiska egenskaperna intar en särställning genom att vara mycket

robusta, och därför är de teoretiska förutsägelseerna baserade på topologi också mycket säkra. En annan intressant historisk aspekt på de topologiska isolatorerna är att det inte krävs speciellt svår matematik för att förstå dem – teorin skulle mycket väl ha kunnat utvecklas för över femtio år sedan. Lärdomen för den yngre forskaren är att det ibland kan löna sig att tänka på gamla problem på nya sätt!

En viktig distinktion mellan olika topologiska material som vi inte har berört, är den mellan de som karaktäriseras av heltal och de som karaktäriseras av bråk, eller fraktioner (engelskans "integer" and "fractional"). Kvanthallvätskor finns av båda typerna (ett andra Nobelpris gavs för upptäckten av de bråktalsvätskorna), men man har hittills endast observerat topologiska isolatorer av heltalstyp.

De fraktionella tillstånden är speciellt fascinerande eftersom de ger upphov till kvasipartiklar med märkliga egenskaper som till exempel laddningar som är bråkdelar av en elektronladdning. Mycket av intresset för dessa bråktalstillstånd beror på att under vissa förutsättningar kan dessa kvasipartiklar användas för att på ett mycket robust sätt lagra kvantinformation. Men det är en annan historia.

EDDY ARDONNE
FYSIKUM, STOCKHOLMS UNIVERSITET

THORS HANS HANSSON
FYSIKUM, STOCKHOLMS UNIVERSITET