

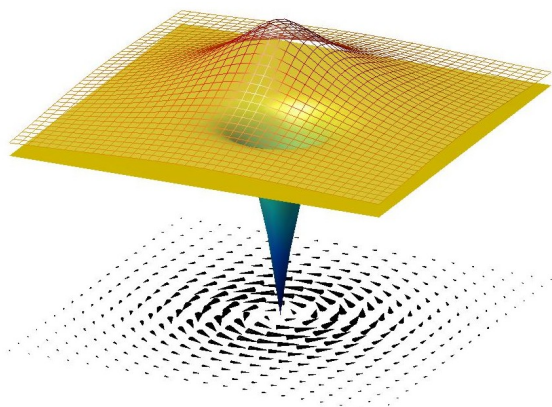
Kvantetornadoer i superledere studeret med neutroner

Af Asger Bech Abrahamsen, Afdelingen for Materialeforskning, Forskningscenter Risø, Danmarks Tekniske Universitet.

Et fundamentalt spørgsmål er, hvordan periodiske gitter påvirkes af punkt-uorden, og vortexgitteret i superledere er et interessant modelsystem, da gitteret består af rørformede superstrømhvirvler, som man kan ændre tætheden af ved at ændre det påtrykte magnetfelt. Urenheder eller defekter i en superlederkristal har tendens til at uordne vortexgitteret. Vi vil her illustrere hvordan det medfører forskellige glasfaser, som kan studeres med småvinkel-neutronspreddning. Fastholdelse af vortexgitteret på defekter har stor teknologisk betydning, da vortexlinier ellers bevæger sig under påvirkning af en strøm og giver anledning til tab, hvormed superlederen får en endelig elektrisk modstand. En teoretisk forudsigtelse af, at den spredte neutron intensitet i Bragg glasfasen skal aftage, som en potensfunktion med afvigelsen fra optimal spredningsbetingelse, er blevet bekræftet eksperimentelt.

Fluks kvantisering i superledere

Mange faste stoffer bliver superledende ved lave temperaturer, fordi en tiltrækkende vekselvirkning mellem nogle af elektronerne får dem til at kondensere i en fælles grundtilstand. Ud over fraværet af elektrisk modstand har superlederkondensatet den egenskab, at det begynder at rotere, hvis det udsættes for et magnetfelt. Der kan i visse tilfælde opstå et tornado-lignende bevægelses-mønstre, som medfører en kvantisering af den magnetiske fluks. En sådan kvantetornado kaldes for en vortex. Figur 1 viser, at jo tættere man kommer på vortexkernen, jo hurtigere roterer det superledende kondensat, som består af elektron par. Disse par har dog en endelig bindingsenergi og rives fra hinanden inde i vortexkernen, som ikke er superledende. Pardannelsen er beskrevet i artiklen af Kim Lefmann på side 15.

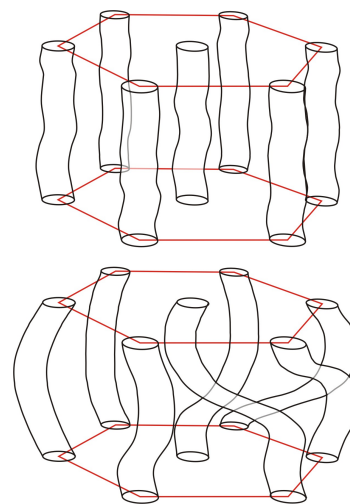


Figur 1. Vortexstrømmønster (pile) af et superlederkondensat, hvor tætheden (flade) går mod nul i vortexkernen med en udstrækning givet ved koherenslængden ζ . Den magnetiske flukstæthed (net) falder af med indtrængningsdybden λ og den samlede fluks er givet ved flukskvantet $\Phi_0 = h/2e$. Vortexmønsteret eksisterer i superledere, hvor forholdet $\kappa = \lambda/\zeta > 1/\sqrt{2}$ og som påtrykkes et magnetfelt af en vis størrelse.

Pinning af vortexlinier

I en perfekt superlederkristal er en vortexlinie beskrevet ved en ret linie orienteret langs det påtrykte magnetfelt, men hvis der er urenheder eller defekter i krystallen, vil det være favorabelt at placere defekten inde i vortexkernen. Dette kan forklares ud fra superlederens

energiregnskab, hvor systemet vinder kondensationsenergien ved at skabe den superledende tilstand, men taber energi ved at skabe den roterende superstrøm, flukskvantet og den ikke-superledende vortexkerne. Da en urenhed skaber et ikke-superledende område vil det koste mindre energi, at placere en vortexkerne ovenpå urenheden end i et område med fuld superledning. Vortexlinien fastholdes dermed af urenheden, som kaldes et pinningcenter og det kræver en vis kraft at trække vortexlinien fri. Når mange vortexlinier vekselvirker dannes et gitter (figur 2), som deformeres af pinning centrene, men på bekostning af elastisk energi.



Figur 2. Bragg glas fasen (top) eksisterer ved lav vortex-tæthed og pinningcentre medfører kun små forskydninger fra et middel vortexgitter. Hver enhedscelle indeholder en flukskvant og tætheden er derfor: $n = 1/A = B/\Phi_0$, hvor A er cellearealet og B den gennemsnitlige flukstæthed i cellen. Mellem $B = 0,2$ og $0,5$ Tesla varierer afstanden mellem to vortexlinier fra $a = 102$ nm til 64 nm. Ved høje vortextætheder (bund) opstår der fejl i gitteret og denne fase kaldes et amorf vortexglas [1].

Neutronspreddning på Bragg-glasfasen

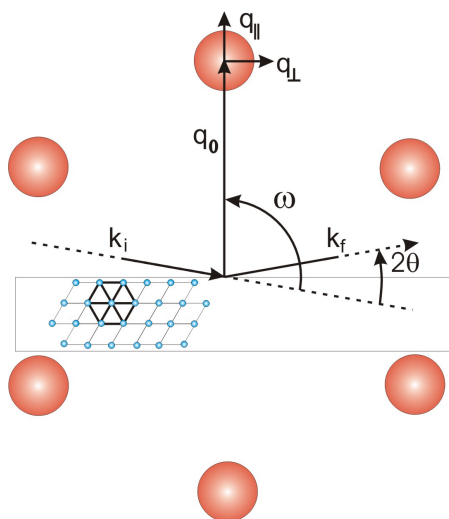
Den første teoretiske model for svag uorden i vortexgitter blev formuleret som et random-walk problem [2]. Udbredelsen af en random-walk er proportional med kvadratroden af antallet af skridt, man tager, og

i vortextilfældet vil udbredelsen repræsentere energi-gevinsten i et lille volumen, mens at antal skridt svarer til antallet af pinningcentre, som vortexlinierne går igennem. Ved at inkludere gitter periodiciteten er det blevet forudsagt, at pinning ikke vil nedbryde vortexgitteret ved små vortextætheder, og at et middel gitter vil bestå, som vist på figur 2. Dette gitter vil kunne sprede neutroner, fordi neutroner har et magnetisk moment, og da spredningen er beskrevet ved Bragg's lov, kaldte man faser for et Bragg glas. Ved højere vortextætheder opstår der defekter i gitteret, som så kaldes for et amorf vortexglas [1].

Diffractionsmønsteret af neutroner spredt på et vortexgitter er givet ved Fouriertransformationen af magnetfelt fordelingen i superlederen. Dette kan formuleres ved produktet af en formfaktor, der beskriver, hvordan en isoleret vortexlinie ser ud (net på figur 1) og en strukturfaktor, som beskriver, hvor vortexlinierne er placeret i prøven (se figur 2). Eksistensen af Bragg glasfasen blev indirekte eftervist ved hjælp af lavopløst småvinkel-neutronspredning på vortexgitteret i (Ba,K)BiO₃ [3], men Bragg-glasset er forudsagt til at have en strukturfaktor, som kan måles direkte og er givet ved en potenslov:

$$s(q_{\perp}) \sim q_{\perp}^{-\alpha} \quad (1)$$

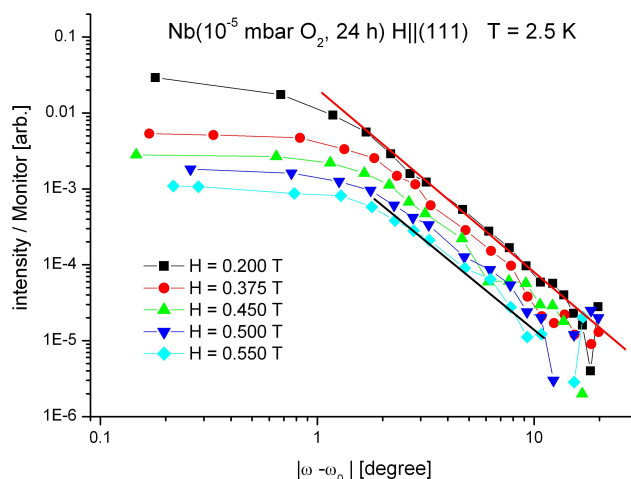
hvor vektoren \mathbf{q}_{\perp} afspejler orienteringskorrelationerne mellem vortexpar i gitteret og eksponenten α angiver hvor langtrækkende korrelationerne er [1].



Figur 3. Planer i vortexgitteret (blå) giver anledning til småvinkel neutronspredning af den indkomne bølgevektor \mathbf{k}_i med spredningsvinklen 2θ givet ved Bragg's lov: $\lambda = 2d \sin(\theta)$, hvor λ er bølgelængden af neutronerne og d er afstanden mellem gitterplanerne. \mathbf{q}_0 viser den reciproke vektor for de vandrette gitter planer og Bragg spredningen opstår, når $\mathbf{q}_0 = \mathbf{k}_f - \mathbf{k}_i$. Hvis afstanden mellem eller orienteringen af planerne varierer, bliver \mathbf{q}_0 mere udbredt henholdsvis langs $\mathbf{q}_{||}$ og \mathbf{q}_{\perp} . Man kan måle bredden langs \mathbf{q}_{\perp} ved at rotere krystallen vinklen ω i forhold til \mathbf{k}_i . Intensiteten som funktion af ω kaldes en rokkekurve.

Figur 3 viser geometrien af et neutronspredningseksperiment, som gør det muligt at måle strukturfaktoren med høj opløsning. Denne geometri blev realiseret ved at bygge en ny prøveholder til kryomagneten på Paul Scherrer Institutet (PSI, CH) [4]. Figur 4 viser rokkekurver af vortexgitteret i en Niobium énkrystalskive, hvor pinningcentre er blevet introduceret ved at diffundere ilt ind i krystallen. Intensiteten er vist på dobbeltlogaritmiske skalaer og den rette linie bekræfter, at strukturfaktoren falder af som en potensfunktion med $\alpha = 2,23$, der er noget større end forudsagt.

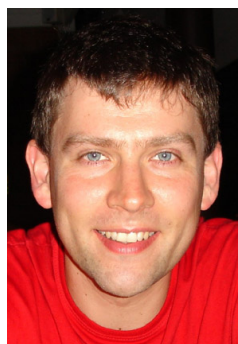
Målet med studierne af Bragg-glasfasen er at blive i stand til at identificere overgangen til vortex-glasfasen ved høje felter, da strukturfaktoren i de to faser har indflydelse på bestemmelsen af de karakteristiske længdeskalaer λ og ζ for superlederen. Denne overgang er dog ikke observeret endnu.



Figur 4. Rokkekurver af vortexgitteret i en Niobium énkrystal med lille pinningcenter koncentration. De rette linier illustrerer, at strukturfaktoren af Bragg glas fasen er givet ved en potenslov som forudsagt, da $q_{\perp} = q_0|\omega - \omega_0|$.

Litteratur

- [1] T. Giamarchi et. al. (1995), *Phys. Rev.* **B52**, 1242.
- [2] A.I. Larkin et. al. (1979), *J. Low Temp. Phys.* **34**, 409.
- [3] T. Klein et. al. (2001), *Nature* **413**, 404.
- [4] A.B. Abrahamsen et. al., Experimental report at PSI, http://sinq.web.psi.ch/sinq/er/ii_04r_8.pdf



Asger B. Abrahamsen er seniorforsker ved Afdelingen for Materialeforskning på Risø og arbejder med spredning af neutroner og røntgenfotoner på superledere, samt anvendelse af disse til energiteknologier.