

## Válasz Dóra Balázs bíráló kérdéseire

Köszönöm a bíráló munkáját és értékes észrevételeit. Az alábbiakban válaszolok a feltett kérdésekre.

1. *A topológikus jelenségek tárgyalásánál gyakran előkerül a tömbi-él megfeleltetés. A Weyl-pontokkal kapcsolatban ez azt jelenti, hogy eltérő töltésű pontok a minta felületén össze vannak kötve ún. Fermi-ívekkel. Kérdésem, hogy a szerző által vizsgált összeállításban hogy jelenik meg a tömbi-él megfeleltetés, lehetnek-e benne Fermi-ívek vagy hasonló objektumok, illetve, hogy jelennének meg a kísérletekben ezek?*

Egyes fémekben sávszerkezetében Weyl-pontok találhatóak, és ezen anyagok felületén Fermi-ívek tudnak megjelenni. Ezen rendszerekben a Weyl pontok a  $(k_x, k_y, k_z)$  térben definiált E energiadiszperzióban jelennek meg. A Fermi-ívek pedig egy véges méretű minta felületén megjelenő állapotok spektrumában. Esetünkben a mágneses Weyl-pontok a mágneses tér  $(B_x, B_y, B_z)$  függvényében definiált E energiában vannak értelmezve és nem a  $(k_x, k_y, k_z)$  térben. A B tér esetén nem tudok olyan analógiát, amiben a minta véges mérete értelmezhető lenne, és a mintahatárfelületén lehetne a spektrumot definiálni. Így a tömbi-él megfeleltetésnek nem látom a megfelelőjét.

2. *A mágneses kicserélődéssel kapcsolatban kérdezem, hogy a ferro-és antiferromágneses csatoláson túl lehet-e másféle, pl. altermágneses csatolást létrehozni atomcsoportok jelenlétében? Vagy a tömbi ferromágnes kicserélve altermágnesre vagy más mágneses tulajdonságú anyagra, milyen fizikai jelenséget várhatunk, lenne-e bármiféle eltérés a ferromágneses esethez képest?*

Altermágnesség speciális tércsoporttal rendelkező kristályokban tud létrejönni, melyekben a szomszédos mágneses atomok kristálytere meghatározott mintázatot követ. Valódi atomokból felépülő rendszerekben, a rendszert alkotó atomok identikus tulajdonsága miatt az atompályák, energiájuk és a környezetük által előidézett felhasadás egyértelműen meghatározottak. Mesterséges atomokból felépített rendszerek tulajdonságai messze nem ennyire reprodukálhatók, hiszen az őket alkotó mesterséges atomok nem identikusak: az atompályák pontos alakját és energiáit a bezáró potenciál nanoszkópikus részletei szabják meg. Mindezek okán komoly kísérleti kihívásnak tartanám, egy olyan rendszer létrehozását, amiben egy mesterséges kristálytérnek olyan domináns szerepe tudna lenni, hogy ez határozza meg a mágneses állapotot. Esetleg olyan anyagi rendszerből lehetne ilyen mesterséges mágnes létrehozni, melyben van a mesterséges atomok spektrumában valami belső szimmetria által védett szabadsági fok (pl. grafénben a völgy), és ennek felhasználása lehetne kontrolláltan, alternált módon előidézni a szomszédos rácshelyeken. Egyszerű ferromágneses és antiferromágneses kicserélődésen kívül, pl. szuper kicserélődést jól lehet vizsgálni mesterséges atomokkal. Ilyenkor a mágneses atomok egy köztes atomon keresztül hatnak kölcsön. Az atompályák energiáját mesterséges atomokban könnyen tudjuk állítani és ennek függvényében a mágneses kölcsönhatás vizsgálható, amit normál atomokból felépülő rendszerekben kihívás lenne elvégezni. Altermágneseket természetes hozzá lehetne kapcsolni egy mesterséges atomhoz, és vizsgálni az általa keltet mágneses rendet. Ez esetben nem várok jelentős eltérést a ferromágnes-mesterséges atom rendszeréhez képest. A csatolás az altermágnes Fermi-felület környéki, spin függő állapotsűrűségétől, ezen állapotok és a mesterséges atom állapota közötti csatolástól, valamint a mesterséges atom energiaszintjének helyzetétől fog függeni. Ezek összjátéka ferro- illetve antiferromágneses csatolást is eredményezhet a dolgozatban tárgyalt ferromágnes-mesterséges atom rendszerhez hasonlóan.

*3. A Cooper-pár felhasítás esetén érdemes lehet-e ezt magas hőmérsékletű szupravezetőben megvizsgálni? Ekkor a szupravezető tiltott sáv sokkal nagyobb lehet a momentum tér bizonyos irányában, de más esetekben el is tűnik. Egy ilyen összeállításnak lennének-e előnyei a tárgyalt esethez képest? Alkalmaz-e a módszer a szupravezető rendparaméter szimmetriájának meghatározására? Hogy működne mindez egy triplet szupravezető esetén? Hasonlóan: ha egy topológikus szupravezetőben végezzük el a Cooper-pár hasítást, lehetne-e egy topológikus járulékot leválasztani, alkalmazható-e a kísérlet topológikus szupravezető kimutatására?*

A Cooper-pár szétválasztás vizsgálata magas hőmérsékletű szupravezetőben egy izgalmas felvetés. Valóban a tiltott sáv szélessége, valamint a működési hőmérséklet lényegesen nagyobb lehetne, ami ígéretes alkalmazások szempontjából. Ugyanakkor a kis koherencia hossz miatt kis mesterséges atom-mesterséges atom távolságot ( $\sim$ nm) kellene létrehozni, ami fabrikációs értelemben komoly kihívás. Komolyabb probléma, hogy a tiltott sáv eltűnése adott orientációkban jelentősen lerontaná a hatásfokot, hiszen az első elektron kivételét követően a másik elektron energiaköltség nélkül a szupravezetőben maradhatna. A rendparaméter szimmetriáját olyan geometriában lehetne vizsgálni, ahol a szupravezetőből történő kilépés csak adott irányú hullámszámmal rendelkező elektronok számára preferált, erre lehetőséget kínálhat ha a fő kristálytani orientáció mentén marják el a szupravezetőt, és a mesterséges atomokat oldalsó kontaktuson keresztül hozzák létre a szupravezető mellett.

Triplet szupravezetők esetében a Cooper-pár szétválasztó alkalmas lehetne, hogy a kilépő elektron pár triplet hullámfüggvényét az elektronok spin korrelációs méréseivel vagy a 4.5 fejezetben ismertetett spin qubit eszköztár segítségével meg lehessen mérni.

Topológikus szupravezetőkben (gondoljunk egy Kitaev-láncre) Cooper-pár szétválasztót építve a szupravezető topológikus volta is tanulmányozható. A lánc végén elhelyezett atomról kontrollált módon elektront helyezve a szupravezetőbe, az elektron lényegesen könnyebben el tud jutni a szupravezető másik végén található atomra, ha a topológikus szupravezetés jelen van.

Köszönettel:



Aachen, 2025. 07. 03.

Csonka Szabolcs

BME Fizika Tanszék