

## Prosjekt-oppgaver/Master-oppgaver, teoretisk fysikk. Våren 2015.

Veileder: Asle Sudø,  
e-mail: asle.sudbo@ntnu.no  
E5-131

### Spinn-bane koblede multi-komponent Bose-Einstein kondensater

Bose-Einstein kondensater (BEC) er bosoniske mangepartikkel-tilstander der et makroskopisk antall av partiklene (bosonone) i systemet har kondensert i en grunntilstand og okkuperer en og samme en-partikkel-tilstand. Slike systemer studeres for tiden intenst både teoretisk og eksperimentelt, fordi de er modellsystemer der en kan variere parametre i en Hamilton-funksjon i en helt annen grad enn det man kan gjøre i naturlig forekommende systemer som er kjente idag. Spesielt gjelder dette dersom BEC-ene består av flere komponenter, dvs flere typer bosoner kondenserer sammen. Disse BEC-ene kan dermed betraktes som syntetiske materialer, der en kan fremheve egenskaper som gir ulike ønskede funksjonaliteter. En slik egenskap er spinn-bane kobling, som kan gi opphav til kvantemekaniske egenstilstander med helt spesielle egenskaper. Blant annet kan tilstandene være svært robuste mot perturbasjoner som vil forårsake spredning av slike tilstander dersom spinn-bane kobling ikke hadde vært tilstede. Enkelt sagt er det slik at robustheten øker med styrken på spinn-bane-koblingen. Robusthet i, og fravær av spredning av, kvantetilstander er en svært attraktiv egenskap med tanke på anvendelser. Typisk betyr det at dissipasjon er fraværende eller sterkt redusert, og at lineær-kombinasjoner av slike tilstander kan manipuleres til feks å utføre logiske operasjoner uten at tilstandene ødelegges.

For i det hele tatt å kunne ha spinn-bane-kobling i et BEC, må det være et multi-komponent kondensat. Dette kan feks være en blanding av  $^{87}\text{Rb}$  (Rubidium)-atomer i to ulike hyperfine tilstander. Det kan også være  $^6\text{Li}$ -atomer i tre ulike hyperfine tilstander. Det første er et to-komponent kondensat, det andre er et tre-komponent kondensat. Det første blir dermed et syntetisk spinn-1/2boson system (!), det andre blir et syntetisk spinn-1boson-system. I det tilfellet der en har en ubalanse (ulik tetthet) i de to/tre komponentene i systemet, er dette analogt det å på et ytre magnetfelt på kondensatet, slik at ulike "spinn-tilstynder" blir ulikt okkupert. Dette vil påvirke effekten av spinn-bane-koblingen på systemet.

#### Oppgave 1

Oppgaven går ut på å bruke enkel statistisk mekanikk, sammen med kvantefelt-teori for kondenserte medier for slike systemer, til å se på termodynamiske egenskaper og transport egenskaper til to- og tre-komponent BEC. Når ubalansen i kondensat-komponentene blir stor nok, vil effekten av spinn-bane-kobling forsvinne. Oppgaven vil gå ut på studere hvordan endelig temperatur påvirker konkurransen mellom effekten av spinn-bane-kobling og effekten av ubalanse mellom de ulike komponentene. Spesielt er dette av interesse med tanke på anvendelser av reelle spinn-bane koblede systemer, da mange av de potensielle anvendelsene av slike system er tenkt ved romtemperatur, mens de fleste teoretiske studier saa} langt er utført med null temperatur i problemet. Oppgaven passer for studenter p bde Prosjekt- og Master-nivå (1-2 studenter).

#### Oppgave 2

Et annet viktig aspekt ved multi-komponent Bose-Einstein kondensater, er å ta hensyn til vekselvirkninger mellom bosonone i kondensatet. Dette er kun i liten grad gjort i teoretiske studier av slike systemer så langt. Hva samspillet mellom spinn-banekobling og vekselvirkninger er, er interessant fra et fundamental fysisk synspunkt. Dette aspektet er også avært viktig med tanke på anvendelser, fordi rposbustheten av kvantetilstandene som spinn-banekobling medfrer, er stort sett forutsagt for ikke-vekselvirkende systemer. Den enkleste måten å gjøre dette på er ved en enkel selvkonsistent dekobling av mangepartikkel vekselvirkningene i problemet, en såkalt mean-field tilnærming. Denne tilnæ]rmingen har også den fordel at

man igjen kan studere temperatur-effekter. Denne oppgavcen kan også lett tilpasses slik at en kan studere tilsvarende spinn-bane koblede superledere av en type som kan koesistere med magnetsime, såkalte spin-triplett superleder. Oppgaven passer best for studenter p Master-nivå (1-2 studenter).

## Sterkt anisotrope spinn-bane koblede Dirac-materialer

### Oppgave 3

Det finnes idag nye materialer som er isolatorer i bulkfasen, men som er metalliske på overflaten, såkalte topologiske isolater. Overflate-tilstandene i disse materialene kan en studere i detalj eksperimentelt ved såkalt vinkel-oppløst og vinkel-spinn-oppløst foto-emisjon. Nye eksperimentelle resultater viser at Fermi-nivåene i en viktig klasse overflate-dopede topologiske isolater er svært anisotrope, selv når Fermi-nivået ligger svært nær senteret i Brillouin-sonen. I eksperimentelle arbeider publisert i januar 2015, har dette blitt modellert enkelt med en kontinuums-modell og en fenomenologisk anisotropi-parameter i energi-tilstanden med spinn-bane-kobling.

Oppgaven går ut på å gjøre en tight-binding beregning av elektron-tilstandene, med et realistisk hexagonalt gitter, og med spinn-bane-kobling formulert i real-space, og finne energi-spekteret til elektronene i denne typen system. Utgangspunktet for beregningene er en modell for elektroner definert på det relevante gitteret i annen-kvantisering. Med slike anisotrope Fermi-nivå, blir også spinn-teksturen på Fermi-nivå i disse systemene anderledes enn for isotrope Fermi-nivå. Siden egentilstanden for disse spinn-bane-koblede systemene også er egentilstander med bestemt helisitet, er det mulig å studere spinn-teksturen når man kjenner spekteret til systemet. Dette vil også være en del av oppgaven. Oppgaven egner seg godt for studenter som har tatt et videregende kurs i faststoff-fysikk og et kurs i mangepartikkel-fysikk.