

# Capítulo 6

## Conclusões

Neste trabalho nós estudamos o problema da supercondutividade em materiais onde o emparelhamento dos elétrons se dá através de mecanismos não-convencionais, permitindo o aparecimento de estados de par do tipo tripleto. Em geral, para sistemas cuja estrutura cristalina tenha simetria alta, estes estados são caracterizados por parâmetros de ordem multidimensionais. Nós procuramos analisar um destes casos, mais precisamente aquele em que o cristal tem simetria tetragonal e há uma quebra de simetria de spin no sistema tal que o condensado adquire uma polarização magnética. Na prática, situações como essa podem ocorrer nos chamados supercondutores ferromagnéticos. Em alguns deles, como o  $UGe_2$  quando levado a altas pressões, é possível encontrar uma fase supercondutora convivendo com ferromagnetismo itinerante. Cálculos semelhantes aos mostrados nesta dissertação podem ser encontrados na literatura [37]. Nestes trabalhos, porém, não é considerada apropriadamente a simetria pontual da estrutura cristalina do material. A nossa contribuição consistiu em utilizar um parâmetro de ordem e um funcional de energia livre compatíveis com o vínculo criado por uma estrutura cristalina tetragonal.

Uma das propriedades mais marcantes que podem ocorrer em supercondutores ferromagnéticos é o surgimento de fases de vórtices espontâneas. Este foi um dos temas centrais de análise deste trabalho. A criação de vórtices sem a aplicação de um campo magnético externo é possível em duas situações distintas: (i) quando há ordem de longo alcance devido à presença no material de momentos magnéticos localizados; (ii) quando há polarização devido à própria magnetização intrínseca do condensado (natural

quando ocorre desbalanço entre populações de elétrons com orientações de spin diferentes), a qual pode ocorrer em ferromagnetos itinerantes. Por ser menos trivial, nós concentramos nosso estudo no segundo caso. Ou seja, tratamos de situações onde o parâmetro de ordem não só quebra simetria de reversão temporal, mas também fornece um valor esperado do operador de spin total do par não nulo (os chamados estados tripleto ditos não unitários e não bipolares), fazendo com que o próprio condensado gere um campo de indução interna ao material. Quando a intensidade desse campo for suficientemente forte (maior do que um certo valor crítico inferior), a criação de vórtices é energeticamente favorável. O número de vórtices só é limitado pelo custo energético (sempre positivo) da interação (ou superposição) entre eles. Quando vórtices ocorrem de forma espontânea, o supercondutor deixa de ter a fase de Meissner.

Mediante a aplicação de um campo magnético externo, a fase de vórtices pode ser favorecida ou não, dependendo da orientação do campo em relação à magnetização intrínseca do condensado. Neste trabalho, nós analisamos somente as situações de orientação paralela e antiparalela. Utilizando a abordagem de Ginzburg-Landau, foi possível mostrar que quando o campo externo é paralelo à magnetização, ele sempre *favorece* o aparecimento da fase de vórtices. Isto é verdade mesmo que não haja fase de vórtices espontânea (magnetização abaixo do valor crítico). Por outro lado, quando o campo externo for antiparalelo à magnetização, ele, inicialmente, desfavorecerá a fase de vórtices, podendo até mesmo suprimi-la (quando ela já existir espontaneamente). Neste caso, pode-se dizer que a aplicação do campo magnético externo, devido ao efeito de cancelamento do campo de indução interno, ajuda na estabilidade da fase condutora.

Ainda dentro da abordagem de Ginzburg-Landau, nós analisamos o comportamento do supercondutor tripleto ferromagnético próximo à temperatura crítica ( $T_c$ ). Foi visto que, independentemente da orientação do campo externo, a temperatura de transição metal normal-supercondutor *aumenta* com a aplicação do campo, exatamente em oposição ao caso dos supercondutores convencionais do tipo singleto. Isto sempre irá ocorrer em materiais onde o fator giromagnético do spin do par for suficientemente forte (acoplamento Zeeman forte). Caso contrário, a linha crítica  $H \times T$  tem o comportamento usual.

Duas observações importantes devem ser feitas com relação a estes resultados. Primeiramente, eles foram obtidos dentro da suposição de que somente uma das componentes do parâmetro de ordem bidimensional (representação  $E_u$  do grupo tetragonal) é não nula. Na prática, isto equivale a dizer que somente elétrons com uma dada orientação de spin condensam. Isto certamente deve ser válido em uma alguma faixa de temperaturas, ainda que restrita. Em segundo lugar, nós desprezamos contribuições à magnetização provenientes de outros momentos magnéticos além daquele intrínseco ao próprio condensado. Esta aproximação é, na prática, mais problemática do que a primeira, visto que, nos materiais supercondutores ferromagnéticos conhecidos até hoje, o ferromagnetismo ocorre mesmo antes do aparecimento do condensado (ou seja, já existe ordem magnética interna no sistema). A análise completa, contudo, estaria fora do escopo da presente dissertação e envolveria um tratamento analítico (e provavelmente numérico) muito mais complexo.

Alguns outros aspectos importantes do problema também foram deixados de lado. Em particular, a forte anisotropia que supercondutores ferromagnéticos possuem foi tratada de forma muito simplificada, pois se levou em conta somente situações em que o campo externo é paralelo ou antiparalelo à magnetização intrínseca. Este ponto ganha muita importância quando o material apresenta eixos fáceis e a magnetização provém de outros meios além da polarização do próprio condensado. Tudo indica, inclusive, que este deve ser o caso do  $UGe_2$ .

Deve-se observar que este trabalho foi eminentemente fenomenológico, não se tratando de um estudo dos mecanismos microscópicos que levam a um emparelhamento do tipo tripleto. É sabido porém, em analogia com o caso do  $^3He$ , que em sistemas próximos ao ordenamento magnético (paramagnetos fortes), como  $Sr_2RuO_4$ , flutuações ferromagnéticas podem abrir canais efetivos atrativos de interação elétron-elétron. Em situações como essa, na ausência de muita desordem, há sempre a possibilidade do surgimento de supercondutividade não convencional. Surpreendentemente, o mesmo mecanismo parece operar até em sistemas metálicos já ferromagnetizados, como  $UGe_2$ , onde a interação é amplificada pela aplicação de pressão mecânica ao cristal.

Finalmente, deve-se enfatizar que a simetria cristalina do  $UGe_2$  e dos

compostos  $\text{Sr}_2\text{YRu}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_6$  permite a existência de fases não-unitárias e não-bipolares, ou seja, fases que caracterizam uma quebra global de simetria de reversão temporal. A presença dessas fases permite, em tese, a realização da situação física descrita nesse trabalho. Contudo, até o presente momento, não foi ainda observado experimentalmente o aparecimento de vórtices induzidos pela quebra de simetria de reversão temporal no próprio de ordem supercondutor. Especula-se que uma fase de vórtices espontâneos exista no  $\text{ErNi}_2\text{B}_2\text{C}$  [39, 40]. Para este composto supercondutor, a quebra de simetria não seria intrínseca ao parâmetro de ordem, mas sim causada pela existência de momentos magnéticos localizados (fase ferromagnética).