

**FÍSICA da MATÉRIA CONDENSADA**  
Mestrado em Engenharia Física Tecnológica  
Série 3

1. Considere um electrão num determinado estado, acoplado aos electrões de uma banda de condução, de acordo com o Hamiltoniano

$$\mathcal{H} = \hbar\Omega a^\dagger a + \sum_k \hbar\omega_k b_k^\dagger b_k + \sum_k (V_k a^\dagger b_k + V_k^* b_k^\dagger a)$$

Obtenha as equações de movimento dos operadores  $a(t)$  e  $b_k(t)$ . Resolva formalmente as equações de movimento dos operadores  $b_k(t)$  da banda de condução e obtenha uma equação de movimento efectiva para o operador  $a(t)$  do electrão naquele estado. Interprete fisicamente.

2. Considere electrões numa banda de condução, com energia  $\epsilon(\vec{k})$  e que interactivam de acordo com o Hamiltoniano  $\mathcal{H}_I = U \sum_i N_{i\uparrow} N_{i\downarrow}$ , em que  $N_{i\uparrow}, N_{i\downarrow}$  são os operadores de ocupação electrónicos, no ponto  $i$  da rede (modelo de Hubbard).

a) Considere a aproximação de campo médio e faça o desacoplamento dos operadores de modo a definir o campo efectivo sentido pelos electrões de cada polarização de spin. Considere uma situação ferromagnética, uniforme no espaço.

b) Considere que os electrões são descritos pelo conjunto grande canónico e escreva as equações autoconsistentes de campo médio.

c) Obtenha a linha da transição de fase, onde a magnetização  $m$  se anula, na ausência de campo aplicado  $h$ . Particularize para  $T = 0K$  e indique para que valores de  $U$  existe transição de fase (critério de Stoner).

d) Obtenha a susceptibilidade estática  $\frac{\partial m}{\partial h}$ , em termos da susceptibilidade de Pauli.

3. Considere o modelo de Hubbard para a interacção entre electrões de condução. Usando as equações de movimento e o formalismo canónico obtenha

- a) a teoria de campo médio para as energias dos electrões,
- b) a teoria de Stoner para as ondas de spin.