

VIDRO DE SPIN QUÂNTICO EM UMA  
FORMULAÇÃO COM CLUSTERS

EXAME DE QUALIFICAÇÃO

**Aluna:** Cíntia Fernandes da Silva  
**Orientador:** Fábio Mallmann Zimmer

31 de Maio de 2012

# Sumário

- 1 Motivação
- 2 Objetivos
- 3 Introdução
- 4 Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em Presença de um Campo Magnético Transverso
- 5 Resultados
- 6 Considerações Finais e Perspectivas
- 7 Bibliografia

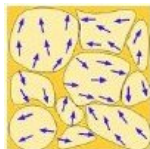
# Sumário

- 1 Motivação
- 2 Objetivos
- 3 Introdução
- 4 Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em Presença de um Campo Magnético Transverso
- 5 Resultados
- 6 Considerações Finais e Perspectivas
- 7 Bibliografia

# Motivação

## Motivação

- ✓ Compostos de Ce, como  $CeNi_{1-x}Cu_x$  (Marcano et. al., 2007),  $CePd_{1-x}Rh_x$  (Westerkamp et. al., 2009);



- ✓ Composto  $LiHo_xY_{1-x}F_4$  a baixas concentrações (Wu et. al., 1993, Ghosh et. al., 2003, Quilliam et. al., 2007, 2008);
- ✓ Existência de Transições Inversas em alguns sistemas físicos;

# Sumário

- 1 Motivação
- 2 **Objetivos**
- 3 Introdução
- 4 Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em Presença de um Campo Magnético Transverso
- 5 Resultados
- 6 Considerações Finais e Perspectivas
- 7 Bibliografia

# Objetivos

## Objetivos

- ✓ Analisar as propriedades termodinâmicas do modelo com cluster de VS na presença de flutuações quânticas;
- ✓ Comparar qualitativamente com o comportamento encontrado para o composto  $\text{LiHo}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$  a baixas concentrações;
- ✓ Investigar as propriedades e mecanismos responsáveis pelo aparecimento espontâneo de congelamento inverso;

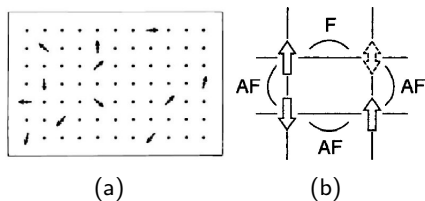
# Sumário

- 1 Motivação
- 2 Objetivos
- 3 Introdução**
- 4 Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em Presença de um Campo Magnético Transverso
- 5 Resultados
- 6 Considerações Finais e Perspectivas
- 7 Bibliografia

# Introdução

## Vidro de Spin

- ✓ Caracterizada pelo congelamento aleatório dos momentos magnéticos abaixo da temperatura de congelamento  $T_f$ ;
- ✓ Duas características fundamentais: Desordem e Frustração;



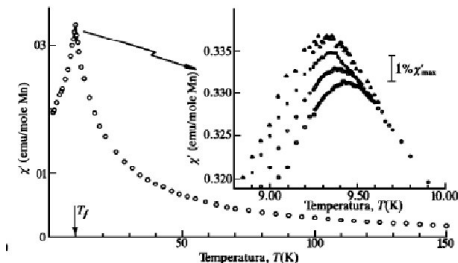
**Figura:** (a) Representação de um sistema VS. (b) Representação esquemática de uma rede frustrada.



# Introdução

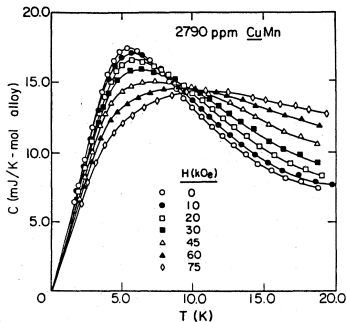
## Vidro de Spin

- ✓ Pico no gráfico da susceptibilidade em função da temperatura, dependente da frequência;

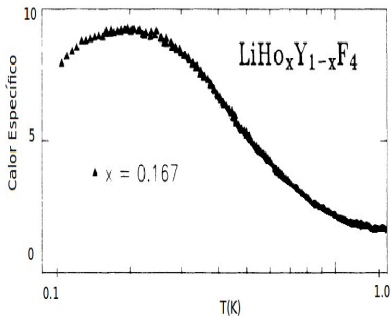


**Figura:** Gráfico da susceptibilidade linear em função da temperatura para um vidro de spin canônico (sistema CuMn (0.94%)) (Fischer and Hertz, 1991).

# Introdução



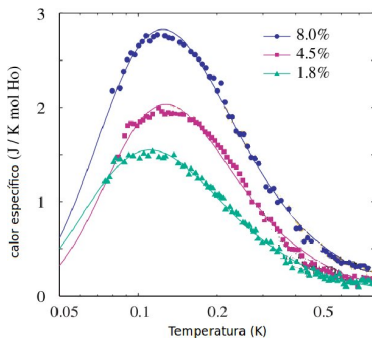
(a)



(b)

**Figura:** (a) Gráficos do calor específico para o sistema de CuMn com 2.79% de Mn, onde o máximo no calor específico está cerca de 20% acima de  $T_f$  (Binder and Young, 1986). (b) Gráfico do calor específico para um sistema de  $\text{LiHo}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$  com concentração de Ho igual a  $x = 0.167$ , com máximo em  $T^* = 0.18\text{K}$  e  $T_f = 0.13\text{K}$  (Reich et. al., 1990).

# Introdução



**Figura:** Gráficos do calor específico para sistema de  $\text{LiHo}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$  com concentrações de Ho  $x = 0.08$ ,  $x = 0.045$ , e  $x = 0.018$ , onde para  $x = 0.045$ ,  $T^* = 0.15\text{K}$  e  $T_f = 0.043\text{K}$  (Quilliam et. al., 2007, 2008).

# Introdução

## Modelos Teóricos

- ✓ Modelo Sherrington-Kirkpatrick (modelo SK) (Sherrington and Kirkpatrick, 1978);

$$H = - \sum_{(ij)} J_{ij} S_i \cdot S_j - h \sum_i S_i \quad , \quad (1)$$

- ✓  $h$  é um campo magnético externo,  $S_i$  variáveis de spin, que podem assumir valores  $\pm 1$  e  $J_{ij}$  são variáveis aleatórias que obedecem uma distribuição de probabilidade Gaussiana:
- ✓ Pico no gráfico do calor específico em função da temperatura abaixo de  $T_f$ ;
- ✓ Entropia negativa devido à aproximação de simetria de réplicas;

# Introdução

## Modelos Teóricos

- ✓ Soukoulis e Levin propuseram um modelo clássico considerando clusters correlacionados capaz de melhorar a descrição termodinâmica do VS (Soukoulis and Levin, 1978);

$$H = - \sum_{\nu < \lambda}^{N_{cl}} J_{\nu\lambda} S_{\nu} S_{\lambda} - \sum_{\nu=1}^{N_{cl}} \sum_{i < j}^{N_{sp}} J_{ij}^0 S_{i\nu} S_{j\nu} \quad , \quad (2)$$

- ✓ onde  $J_{ij}^0$  representa a interação de troca entre spins dentro do cluster (intracluster) e  $J_{\nu\lambda}$  a interação de troca entre clusters (intercluster);
- ✓ Pico em  $T_f$  na curva da susceptibilidade linear;
- ✓ Máximo arredondado no gráfico do calor específico em função da temperatura acima de  $T_f$ ;

# Introdução

## Transições Inversas

- ✓ Transformações reversíveis entre uma fase ordenada e uma desordenada;
- ✓ Há uma inversão da ordem natural do conteúdo entrópico das fases envolvidas;
- ✓ A fase desordenada tem entropia menor que a fase ordenada;
- ✓ Classificação: Derretimento inverso e Congelamento inverso

# Introdução

## Transições Inversas

- ✓ Exemplos de sistemas físicos: Isótopos de He, alguns supercondutores e nano partículas de ouro;
- ✓ Modelos para descrição do derretimento inverso:
- ✓ Modelo Blume-Capel:

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} S_i S_j + D \sum_{i=1}^N S_i^2, \quad (3)$$

com  $S_i = 0, \pm 1$ .

- ✓ É necessária a adição de um parâmetro de degenerescência:  
 $r = l/k \geq 1$ ;

# Introdução

## Transições Inversas

- ✓ Modelos para a descrição do congelamento
- ✓ Modelo Ghatak-Sherrington

$$H = - \sum_{\langle i,j \rangle} J_{ij} S_i S_j + D \sum_i S_i^2 \quad (4)$$

- ✓ Transição reentrante a partir da fase paramagnética (PM) a fase vidro de spin (VS) sob aquecimento;
- ✓ Apresenta congelamento inverso espontaneamente;



# Introdução

## Transições Inversas

- ✓ Modelo vidro de spin de Ising fermiônico:

$$\hat{\mathcal{H}} = - \sum_{ij} J_{ij} \hat{S}_i \hat{S}_j - \mu \sum_i \hat{n}_i, \quad (5)$$

- ✓ onde os operadores de spins atuam sobre o espaço de Fock com quatro estados por sítio: dois estados não magnéticos  $|\uparrow\uparrow\rangle$  e  $|\downarrow\downarrow\rangle$ , e dois magnéticos  $|\uparrow\downarrow\rangle$ ,  $|\downarrow\uparrow\rangle$ ;

# Sumário

- 1 Motivação
- 2 Objetivos
- 3 Introdução
- 4 Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em Presença de um Campo Magnético Transverso**
- 5 Resultados
- 6 Considerações Finais e Perspectivas
- 7 Bibliografia

# Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

## Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

- ✓ Analisar um modelo teórico de cluster de VS Quântico no formalismo fermiônico;
- ✓ Considera interações desordenadas entre clusters distintos (interação intercluster);
- ✓ Interações entre spins pertencentes ao mesmo cluster (interação intracluster), podem ser ferromagnéticas ou antiferromagnéticas;
- ✓ Adicionar um campo magnético transversal que introduz flutuações quânticas;

# Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

## Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

- ✓ Hamiltoniano:

$$\hat{H} = - \sum_{\nu\lambda} J_{\nu\lambda} \hat{S}_{\nu}^z \hat{S}_{\lambda}^z - \sum_{\nu} \sum_{ij} J_{ij}^{\circ} \hat{S}_{i\nu}^z \hat{S}_{j\nu}^z - 2\Gamma \sum_{\nu} \sum_i \hat{S}_{i\nu}^x, \quad (6)$$

- ✓ Os operadores de spin são escritos em segunda quantização em termos dos operadores fermiônicos:

$$\hat{S}_{i\nu}^z = \frac{1}{2}(\hat{n}_{i\uparrow} - \hat{n}_{i\downarrow}) \quad \text{e} \quad \hat{S}_{i\nu}^x = \frac{1}{2} \left( c_{i\uparrow}^{\dagger} c_{i\downarrow} + c_{i\downarrow}^{\dagger} c_{i\uparrow} \right), \quad (7)$$

- ✓ onde  $\hat{n}_{i\sigma} = c_{i\sigma}^{\dagger} c_{i\sigma}$  é o operador número e  $c_{i\sigma}^{\dagger}$  e  $c_{i\sigma}$  são os operadores quânticos de criação e destruição, respectivamente.
- ✓ Espaço de Fock com quatros estados por sítio:  
 $|0\ 0\rangle, |\uparrow\ 0\rangle, |0\ \downarrow\rangle, |\uparrow\ \downarrow\rangle.$

# Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

## Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

- ✓ O método adotado aqui faz distinção entre dois modelos:
- ✓ um que admite os quatro estados por sítio, mas exige uma ocupação média de  $n_s$  férmions por cluster, onde a ocupação média é controlada através do potencial químico  $\mu$  (modelo irrestrito ou modelo 4S);
- ✓ e outro que permite somente os estados magnéticos, restringe o operador de spin a um subespaço equivalente ao espaço dos spins (modelo restrito ou modelo 2S);

# Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

## Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

- ✓ Função de partição no formalismo das integrais de caminho fermiônicas:

$$Z\{\mu\} = \int D[\phi_j^*, \phi_j] \int_0^{2\pi} \prod_{\nu=1}^{N_{cl}} \prod_{j=1}^{n_s} \frac{dx_{\nu j}}{2\pi} e^{-\mu_{\nu j}} e^{A\{\mu\}}, \quad (8)$$

- ✓ onde os operadores fermiônicos são escritos em termos de campos de Grassmann, com o funcional:

$$\int D[\phi^*, \phi] = \lim_{M \rightarrow \infty} \int \prod_{k=1}^M \prod_j \prod_{\sigma=\uparrow, \downarrow} d\phi_{j\sigma}^* d\phi_{j\sigma}, \quad (9)$$

- ✓ e a ação é:

$$A\{\mu\} = \int_0^\beta d\tau \left\{ \sum_{\nu} \sum_{i=1}^{n_s} \sum_{\sigma=\uparrow, \downarrow} \phi_{j\nu\sigma}^*(\tau) \left[ \frac{\partial}{\partial \tau} + \mu_{\nu} \right] \phi_{j\nu\sigma}(\tau) - H(\phi^*(\tau), \phi(\tau)) \right\},$$

# Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

## Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

- ✓ Potencial termodinâmico:  $\Omega = -\frac{1}{\beta} \langle \ln Z(J_{\nu\lambda}) \rangle_{J_{\nu\lambda}}$ ;
- ✓ A desordem é tratada através do método das réplicas:  
 $\ln Z = \lim_{n \rightarrow 0} \frac{Z^n - 1}{n}$ , desse modo:

$$Z_n = \int \prod_{\nu\lambda} \sqrt{\frac{N_{cl}}{32\pi J^2}} dJ_{\nu\lambda} P(J_{\nu\lambda}) \int_0^{2\pi} \prod_{\nu} \prod_j \frac{1}{2\pi} dx_{\nu j} e^{-i\mu_{\nu j}} \int D[\phi_{\nu}^*, \phi_{\nu}]$$

$$\times \exp \left\{ \sum_{\alpha} B_{\alpha} - \sum_{\nu\lambda} \frac{J_{\nu\lambda}^2 N_{cl}}{32J^2} + \sum_{\alpha} \sum_{\nu\lambda} J_{\nu\lambda} \int_0^{\beta} d\tau S_{\nu}^{z\alpha}(\tau) S_{\lambda}^{z\alpha}(\tau) \right\}, \quad (10)$$

com

$$B_{\alpha} = - \int_0^{\beta} d\tau \left[ \sum_{\nu} \phi_{\nu}^*(\tau) \left( \frac{\partial}{\partial \tau} - \mu \right) \phi_{\nu}(\tau) + \sum_{\nu} \sum_{ij} J_{ij}^{\alpha} S_{i\nu}^{z\alpha}(\tau) S_{j\nu}^{z\alpha}(\tau) \right. \\ \left. + 2\Gamma \sum_{\nu} \sum_i S_{i\nu}^{x\alpha}(\tau) \right], \quad (11)$$

# Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

## Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

- ✓ Realizando a média sobre a desordem e usando transformações de Hubbard-Stratonovich, o potencial termodinâmico por cluster é obtido:

$$\frac{\beta\Omega}{N_{cl}} = \lim_{n \rightarrow 0} \frac{1}{n} \left\{ \frac{J^2}{2} \sum_{\alpha\beta} \int_0^\beta d\tau \int_0^\beta d\tau' Q_{\alpha\beta}^2(\tau, \tau') - \ln \int D[\phi_\alpha^*, \phi_\alpha] \right. \quad (12)$$

$$\left. \times \exp \left[ \int_0^\beta d\tau \left( \sum_\alpha B^\alpha(\tau) + \int_0^\beta d\tau' 4J^2 \sum_{\alpha\beta} Q_{\alpha\beta}(\tau, \tau') S_\nu^{z\alpha}(\tau) S_\nu^{z\beta}(\tau') \right) \right] \right\}.$$

As integrais funcionais podem ser resolvidas usando o método ponto de sela, que resulta em:  $Q_{\alpha,\beta}(\tau, \tau') = \langle TS_\nu^{z\alpha}(\tau) S_\nu^{z\beta}(\tau') \rangle$  e  $Q_{\alpha,\alpha}(\tau, \tau') = \langle TS_\nu^{z\alpha}(\tau) S_\nu^{z\alpha}(\tau') \rangle$ .



# Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

## Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

- ✓ Assume-se duas aproximações: Aproximação estática:  
 $Q_{\alpha\beta}(\tau, \tau') = Q_{\alpha\beta}$  e esquema de um passo de quebra de  
 simetria de réplicas de Parisi:  $Q_{\alpha\alpha} = P$ ,

$$Q_{\alpha\beta} = Q_1, \quad \text{se } I(\alpha/a) = I(\beta/a), \quad (13)$$

$$Q_{\alpha\beta} = Q_0, \quad \text{se } I(\alpha/a) \neq I(\beta/a), \quad (14)$$

onde  $I(x)$  dá o menor inteiro que é maior ou igual a  $x$ .

$$Q_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} P & Q_1 & Q_1 & & & & \\ Q_1 & P & Q_1 & & & & \\ Q_1 & Q_1 & P & & & & \\ & & & & P & Q_1 & Q_1 \\ & & & & Q_1 & P & Q_1 \\ & & & & Q_1 & Q_1 & P \end{pmatrix} \quad (15)$$

# Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

## Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

- ✓ Assim, o potencial termodinâmico por cluster ( $\Omega = \frac{\Omega}{N_{cl}}$ ) em termos dos operadores de spin para o modelo irrestrito fica:

$$\beta\Omega = \left[ \frac{\beta^2 J^2}{2} (P^2 + a(Q_1^2 - Q_0^2) - Q_1^2) - \frac{1}{a} \int DZ \ln \int Dv (\theta(Z, v))^a \right], \quad (16)$$

com  $\theta(Z, v) = \int D\xi \text{Tr} e^{-\beta \hat{H}_{ef}}, \int Dx = \int_{-\infty}^{\infty} dx \exp(-x^2/2)/\sqrt{2\pi}$  ( $x = Z, v$  ou  $\xi$ ), e  $\hat{H}_{ef} = -\sum_{ij} J_{ij}^0 \hat{S}_{i\nu}^z \hat{S}_{j\nu}^z - 2h \hat{S}_{\nu}^z - 2\Gamma \hat{S}_{\nu}^x - \mu \sum_i \hat{N}_{i\nu}$ , onde

$$h = J\sqrt{2(Q_1 - Q_0)}v + J\sqrt{2Q_0}z + J\sqrt{2(P - Q_1)}\xi. \quad (17)$$

# Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

## Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico

- ✓ Para a energia livre por cluster, para o modelo restrito, é necessária a adição da restrição. Assim,

$$\beta F = \left[ \frac{\beta^2 J^2}{2} (P^2 + a(Q_1^2 - Q_0^2) - Q_1^2) - \frac{1}{a} \int DZ \ln \int Dv (\theta(Z, v))^a \right], \quad (18)$$

com  $\hat{H}_{ef} = -\sum_{ij} J_{ij}^o \hat{S}_{i\nu}^z \hat{S}_{j\nu}^z - 2h \hat{S}_\nu^z - 2\Gamma \hat{S}_\nu^x$ .

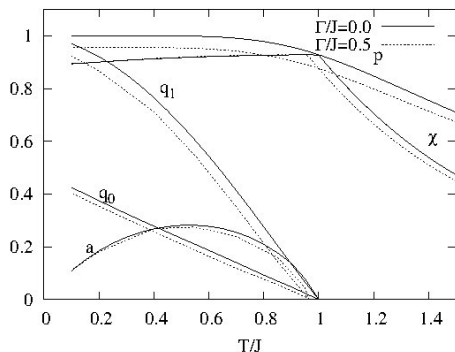
- ✓ Resultados numéricos;

# Sumário

- 1 Motivação
- 2 Objetivos
- 3 Introdução
- 4 Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em Presença de um Campo Magnético Transverso
- 5 Resultados**
- 6 Considerações Finais e Perspectivas
- 7 Bibliografia

# Resultados

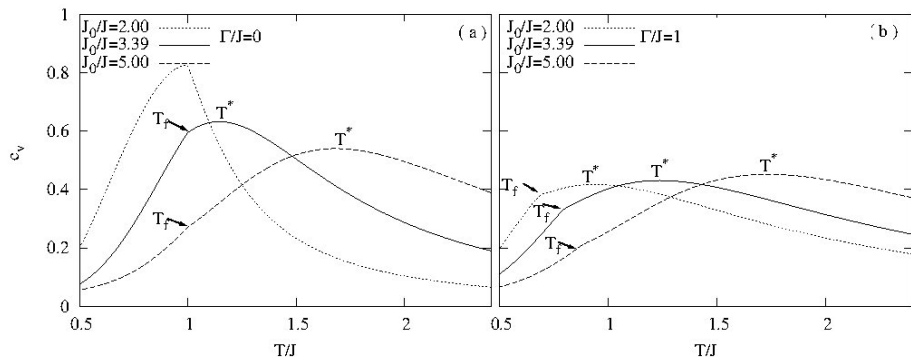
## Cluster de Vidro de Spin em Presença de um Campo Transverso



**Figura:** Parâmetros de ordem com 1P-QSR normalizados e susceptibilidade linear em função de  $T/J$  para  $n_s = 6$ ,  $J_0/J = 3.80$  e para  $\Gamma = 0$  (linhas sólidas) e  $\Gamma/J = 0.5$  (linhas pontilhadas) (Zimmer, Silva, Magalhaes, 2010).

## Resultados

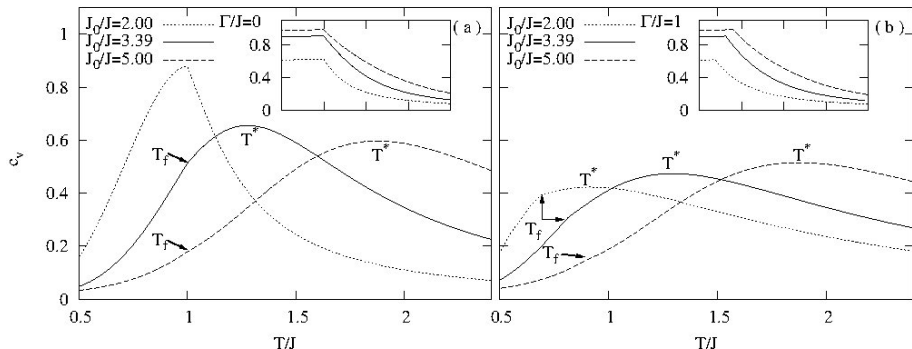
## Cluster de Vidro de Spin em Presença de um Campo Transverso



**Figura:** Calor específico versus  $T/J$  para  $n_s = 6$  e  $J_0/J = 2.0, 3.39$  e  $5.0$  para  $\Gamma/J = 0.0$  (a) e  $\Gamma/J = 1.0$  (b) (Zimmer, Silva, Magalhaes, 2010).

## Resultados

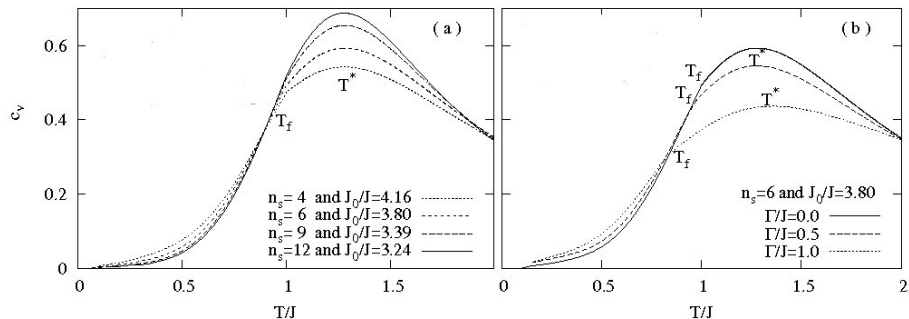
## Cluster de Vidro de Spin em Presença de um Campo Transverso



**Figura:** Calor específico versus  $T/J$  para  $n_s = 9$  e  $J_0/J = 2.0, 3.39$  e  $5.0$  para  $\Gamma/J = 0$  (a) e  $\Gamma/J = 1.0$  (b). Ao fundo, o comportamento de  $\chi$  correspondente a cada  $J_0$  (Zimmer, Silva, Magalhaes, 2010).

# Resultados

## Cluster de Vidro de Spin em Presença de um Campo Transverso

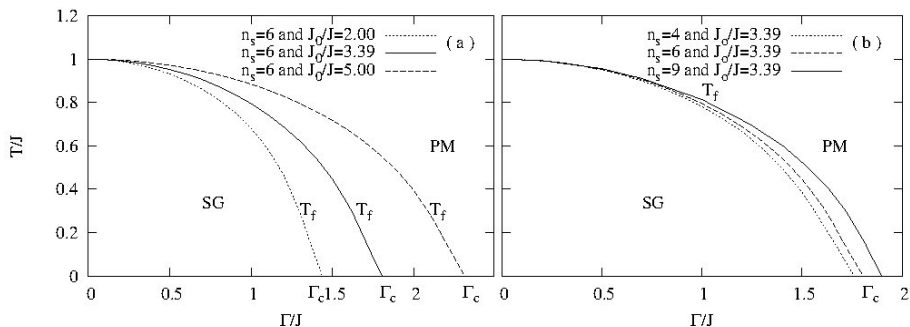


**Figura:** Calor específico versus  $T/J$  para: (a)  $n_s = 4, 6, 9$  e  $12$  com  $J_0/J$  escolhido para manter o mesmo  $T^*/T_f = 1.28$  com  $\Gamma = 0$ ; (b)  $n_s = 6$  e  $J_0/J = 3.8$  para  $\Gamma/J = 0, 0.5$  e  $1.0$  (Zimmer, Silva, Magalhaes, 2010).



## Resultados

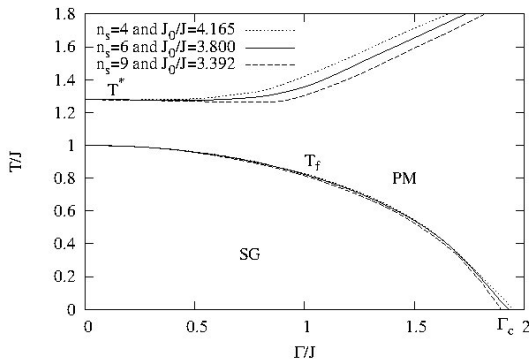
## Cluster de Vidro de Spin em Presença de um Campo Transverso



**Figura:** (a) Diagramas de fase  $T \times \Gamma$  para  $n_s = 6$  e três valores de  $J_0/J$ :  $J_0 = 2.0, 3.39$  e  $5.0$ .  
 (b) Diagramas de fase  $T \times \Gamma$  para  $J_0/J = 3.39$  e três valores de  $n_s$ :  $n_s = 4, 6$  e  $9$  (Zimmer, Silva, Magalhaes, 2010).

# Resultados

## Cluster de Vidro de Spin em Presença de um Campo Transverso



**Figura:** Comportamento de  $T_f$  e  $T^*$  em função de  $\Gamma$ , onde  $n_s$  e  $J_0/J$  são escolhidos para manter  $T^*/T_f = 1.28$  (Zimmer, Silva, Magalhaes, 2010).

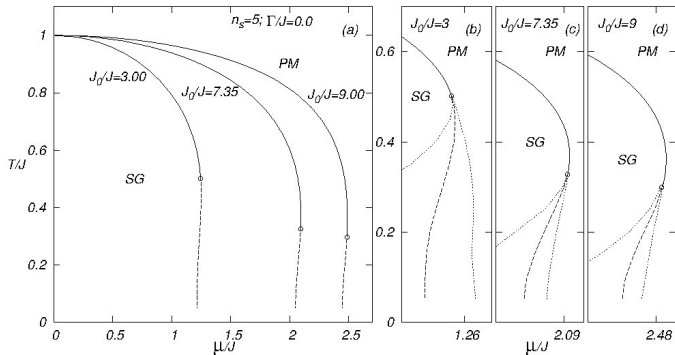
# Resultados

## Cluster de Vidro de Spin em Presença de um Campo Transverso

- ✓ Modelo de Cluster de Vidro de Spin em um  $\Gamma$ ;
- ✓ O aumento de  $\Gamma$  aumenta a separação entre  $T^*$  e  $T_f$ ;
- ✓ A presença de  $\Gamma$  pode levar o  $C_V$  a apresentar um máximo muito acima de  $T_f$ , comportamento encontrado por Quilliam et. al. para a liga de  $\text{LiHo}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$  a baixas concentrações;
- ✓ O modelo de cluster de VS em presença de  $\Gamma$  pode ser um primeiro passo para o entendimento das características complexas desse sistema físico.
- ✓ Resultados publicados em Physica A, vol. 389, p. 5594, 2010 (Zimmer, Silva, Magalhaes, 2010).

# Resultados

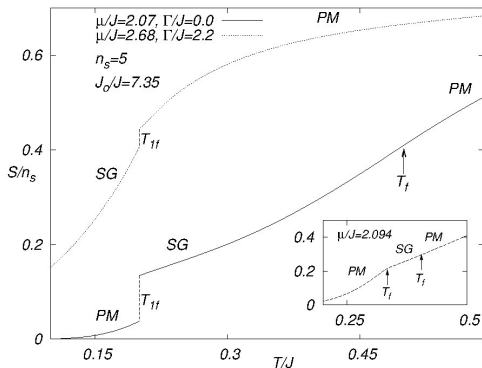
## Congelamento Inverso para Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em um Campo Transverso



**Figura:** Diagramas de fase  $T/J \times \mu/J$  para  $\Gamma/J = 0$ ,  $n_s = 5$  e vários  $J_0/J$  (Zimmer, Silva, Morais, Magalhaes, 2011).

# Resultados

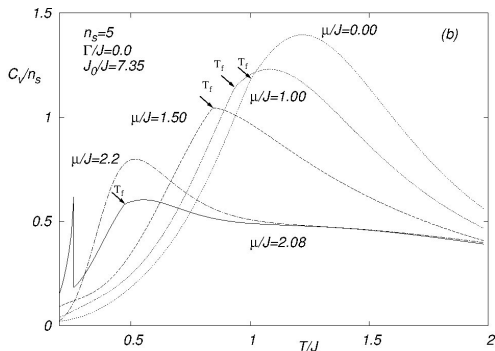
## Congelamento Inverso para Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em um Campo Transverso



**Figura:** Entropia em função da temperatura para  $n_s = 5$ ,  $J_0/J = 7.35$  (Zimmer, Silva, Morais, Magalhaes, 2011)

# Resultados

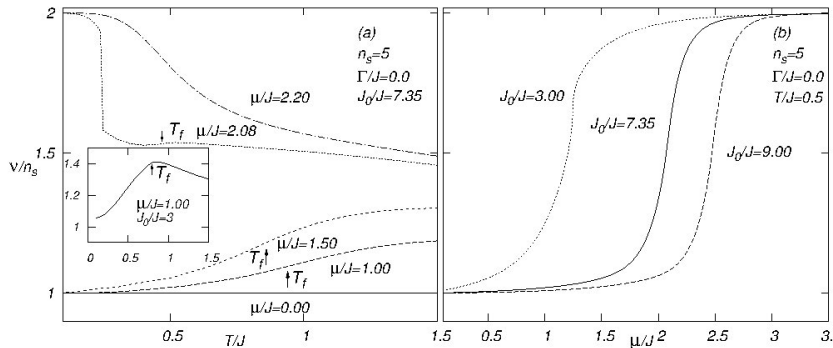
## Congelamento Inverso para Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em um Campo Transverso



**Figura:** Calor específico versus  $T/J$  para  $\Gamma/J = 0$ ,  $n_s = 5$  com  $J_0/J = 7.35$  e vários valores de  $\mu$  (Zimmer, Silva, Morais, Magalhaes, 2011).

## Resultados

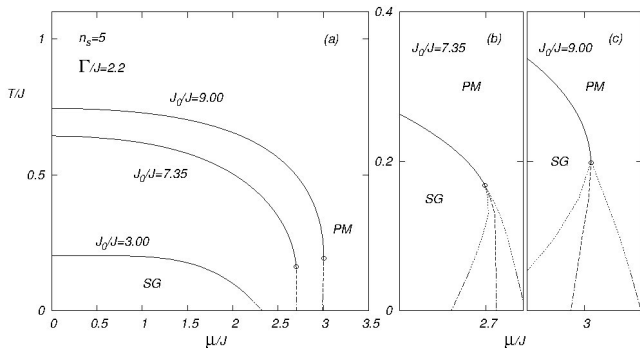
## Congelamento Inverso para Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em um Campo Transverso



**Figura:** Ocupação média por cluster  $\nu$  para  $n_s = 5$  (a)  $\nu \times T/J$  para  $J_0/J = 7.35$  e (b)  $\nu \times \mu/J$  para  $T/J = 0.5$  (Zimmer, Silva, Morais, Magalhaes, 2011).

# Resultados

## Congelamento Inverso para Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em um Campo Transverso



**Figura:** Diagramas de fase  $T/J$  versus  $\mu/J$  são exibidos para  $\Gamma/J = 2.2$  e  $n_s = 5$  com  $J_0/J = 3.00, 7.35$  e  $9.00$ . (Zimmer, Silva, Morais, Magalhaes, 2011).



# Resultados

## Congelamento Inverso para Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em um Campo Transverso

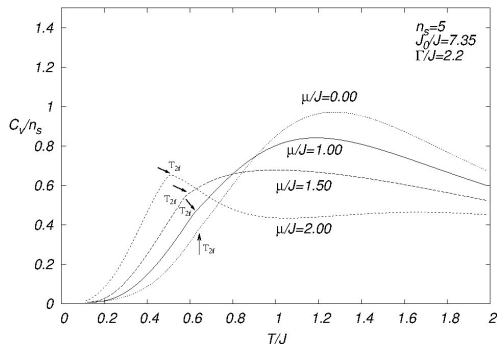


Figura:  $C_v$  em função de  $T$  para  $\Gamma/J = 2.2$ ,  $n_s = 5$  com  $J_0/J = 7.35$  e vários  $\mu$  (Zimmer, Silva, Morais, Magalhaes, 2011).

# Resultados

## Congelamento Inverso para Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em um Campo Transverso

- ✓ Diagramas de fase  $T/J \times \mu/J$ , onde para uma certa região de  $\mu$ , um congelamento inverso surge;
- ✓ As interações de curto-alcance alteram a linha de transição: a região VS aumenta com o aumento de  $J_0$  e uma transição reentrante de segunda ordem pode surgir;
- ✓ O aumento de  $\Gamma$  destrói o congelamento inverso;
- ✓ Resultados publicados na revista Journal of Statistical Mechanics, vol. 2011, p. P05026, 2011 (Zimmer, Silva, Morais, Magalhaes, 2011.);

# Sumário

- 1 Motivação
- 2 Objetivos
- 3 Introdução
- 4 Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em Presença de um Campo Magnético Transverso
- 5 Resultados
- 6 Considerações Finais e Perspectivas
- 7 Bibliografia

# Considerações Finais

## Considerações Finais

- ✓ Modelo de Cluster de VS na presença de um campo magnético transversal;
- ✓ Reproduzir o comportamento do  $C_v$  para o composto  $\text{LiHo}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$  a baixas concentrações encontrado por (Quilliam et. al., 2007; Quilliam et. al., 2008);
- ✓ Resultados publicados em Phys. A, vol. 389, p. 5594-5601 (Zimmer, Silva, Magalhaes, 2010);

# Considerações Finais

## Considerações Finais

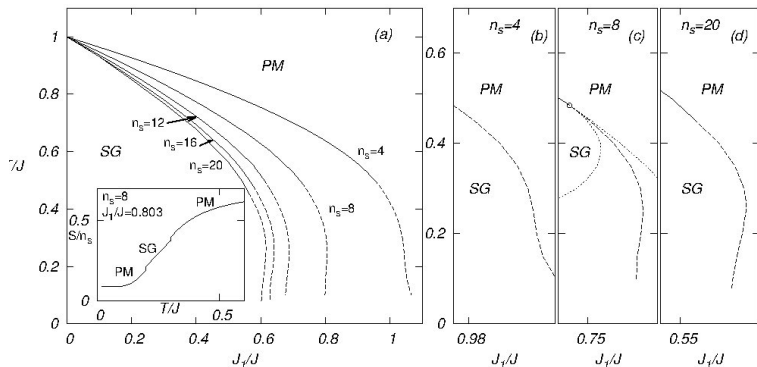
- ✓ Análise do aparecimento espontâneo de congelamento inverso para o modelo proposto;
- ✓ Transição reentrante de primeira ordem entre as fases PM/VS;
- ✓ Interações de curto-alcance FE podem fazer com que apareça transição reentrante de segunda ordem para um  $J_0$  suficientemente grande;
- ✓ Resultados publicados em Journal of Statistical Mechanics, v. 2011, p. P05026, (Zimmer, Silva, Morais, Magalhaes, 2011);

# Perspectivas

## Resultados em Andamento: Congelamento Inverso no Modelo Cluster de Vidro de Spin com Interação Intracluster Antiferromagnética

- ✓ Aparecimento espontâneo de congelamento inverso para modelo de spins de Ising;
- ✓ Modelo de cluster de VS com interação intracluster antiferromagnética;

# Congelamento Inverso no Modelo Cluster de Vidro de Spin com Interação Intracluster Antiferromagnética



**Figura:** (a) Diagrama de fase  $T/J \times J_1/J$ , em módulo, para diversos tamanhos de clusters  $n_s$ . Ao fundo, a entropia em função da temperatura para  $n_s = 8$  com  $J_1/J = 0.803$ . Os painéis (b), (c) e (d) mostram a linha de primeira ordem em detalhes para  $n_s = 4, 8$  e  $20$ , respectivamente.

# Considerações Finais

## Perspectivas

- ✓ Analisar as quantidades termodinâmicas para o modelo Cluster de VS com spins de Ising para interações intracluster antiferromagnéticas;
- ✓ Estudar o aparecimento espontâneo de congelamento inverso para o modelo restrito com interações intracluster antiferromagnéticas;
- ✓ Realizar este estudo também para modelo fermiônico em presença de um campo  $\Gamma$ ;



# Considerações Finais

## Perspectivas

- ✓ Considerar interações intracluster entre primeiros e segundos vizinhos Antiferromagnéticas para o modelo restrito;
- ✓ Assim, além de frustração nas interações, tem-se frustração geométrica;
- ✓ Analisar o efeito da frustração geométrica nas propriedades termodinâmicas;
- ✓ Realizar esta análise para o modelo fermiônico;

# Sumário

- 1 Motivação
- 2 Objetivos
- 3 Introdução
- 4 Modelo Cluster de Vidro de Spin Fermiônico em Presença de um Campo Magnético Transverso
- 5 Resultados
- 6 Considerações Finais e Perspectivas
- 7 Bibliografia

# Bibliografia

## Bibliografia

- ✓ Wu, Wenhao; Bitko, D.; Rosenbaum, T. F. and Aeppli, G. *Quenching of the Nonlinear Susceptibility at a  $T=0$  Spin Glass Transition*, Phys. Rev. Lett., v. 71, n. 12, p. 1919–1922, Set. 1993;
- ✓ Ghosh, S.; Rosenbaum, T. F.; Aeppli, G and Coppersmith, S. N., *Entangled Quantum State of Magnetic Dipoles*, Nature, v. 425, p. 48, 2003;
- ✓ Quilliam, J. A.; Mugford, C. G. A.; Gomez, A.; Kycia, S. W. and Kycia, J. B. *Specific Heat of the Dilute Ising Magnet  $\text{LiHo}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$* , Phys. Rev. Lett., v. 98, p. 037203, Jan., 2007; Quilliam, J. A. and Meng, S. and Mugford, C. G. A. and Kycia, J. B. *Evidence of Spin Glass Dynamics in Dilute  $\text{LiHo}_x\text{Y}_{1-x}\text{F}_4$* , Phys. Rev. Lett., v. 101, p. 187204, Out., 2008;

# Bibliografia

## Bibliografia

- ✓ Marcano; N., Gómez Sal; J. C., De Teresa; J. M., Algarabel; P. A., Paulsen; C., Iglesias; J. R., *Mesoscopic Magnetic States in Metallic Alloys with Strong Electronic Correlations: A Percolative Scenario for CeNi<sub>1-x</sub>Cu<sub>x</sub>*, Physical Review Letters, v. 98, p. 166406, abril 2007;
- ✓ Westerkamp, T.; Deppe, M.; Kuchler, R.; Brando, M.; Geibel, C.; Gegenwart, P.; Pikul, A. P. and Steglich, F., *Kondo-Cluster-Glass State Near a Ferromagnetic Quantum Phase Transition*, Phys. Rev. Lett., v. 102, p. 206404, mai. 2009;
- ✓ Binder; K., Young; A. P., *Spin glasses: Experimental facts, theoretical concepts, and open questions.*, Rev. Mod. Phys., v. 58, n. 4, p. 801-976, out. 1986;
- ✓ K. H. Fischer and J. A. Hertz, *Spin Glasses*, 1991;

# Bibliografia

## Bibliografia

- ✓ Sherrington; D., Kirkpatrick; S., *Infinite-ranged models of spin-glasses*, Physical Review B, v. 17, n. 11, p. 4384-4403, jun. 1978;
- ✓ Soukoulis; C. M., Levin; K., *Cluster mean-field model of the spin glasses: static properties*, Physical Review B, v. 18, n. 3, p. 1439-1445, ago. 1978.
- ✓ Zimmer, F. M.; Silva, C. F. and Magalhaes, S. G., *Cluster Fermionic Ising Spin Glass Model with a Transverse Field*, Phys. A, v. 389, p. 5594-5601, set. 2010.