

Transições de fases quânticas

Mucio A. Continentino

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

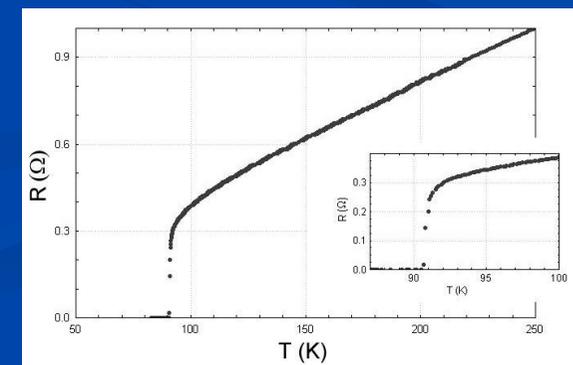
CNPq/CAPES/FAPERJ

O avanço do conhecimento propiciado pelas idéias da mecânica quântica aplicadas na física da matéria condensada vem causando uma profunda transformação tecnológica.

- Semicondutores -> transistores -> computadores
- Manipulação à nível atômico -> Nano-física

Transcorridos 100 anos a física da matéria condensada conserva uma grande vitalidade. Apesar do paradigma quântico se manter, fenômenos emergentes associados a quebra de simetrias em sistemas com grande número de partículas revelam um novo grau de complexidade.

- Supercondutividade
- Superfluidez



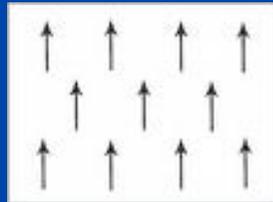
Transições de fases

Competição entre interações e desordem térmica leva a mudanças de estado na matéria acompanhadas de quebra de simetria e propriedades emergentes.

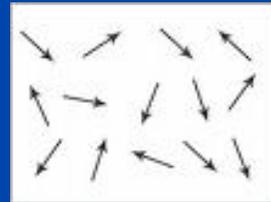
- Sólido -> líquido
- paramagnético -> Ferromagnético
- metal normal -> metal supercondutor

Transições de fases clássicas

Paramagnético-Ferromagnético



$T < T_c$

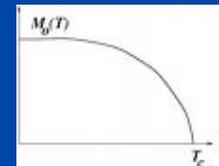


$T > T_c$

T_c é a temperatura crítica onde ocorre a transição de fase.

Transições de fases são caracterizadas por:

- a) quebra de simetria
- b) parâmetro de ordem



Competição entre **ordem** e **desordem**

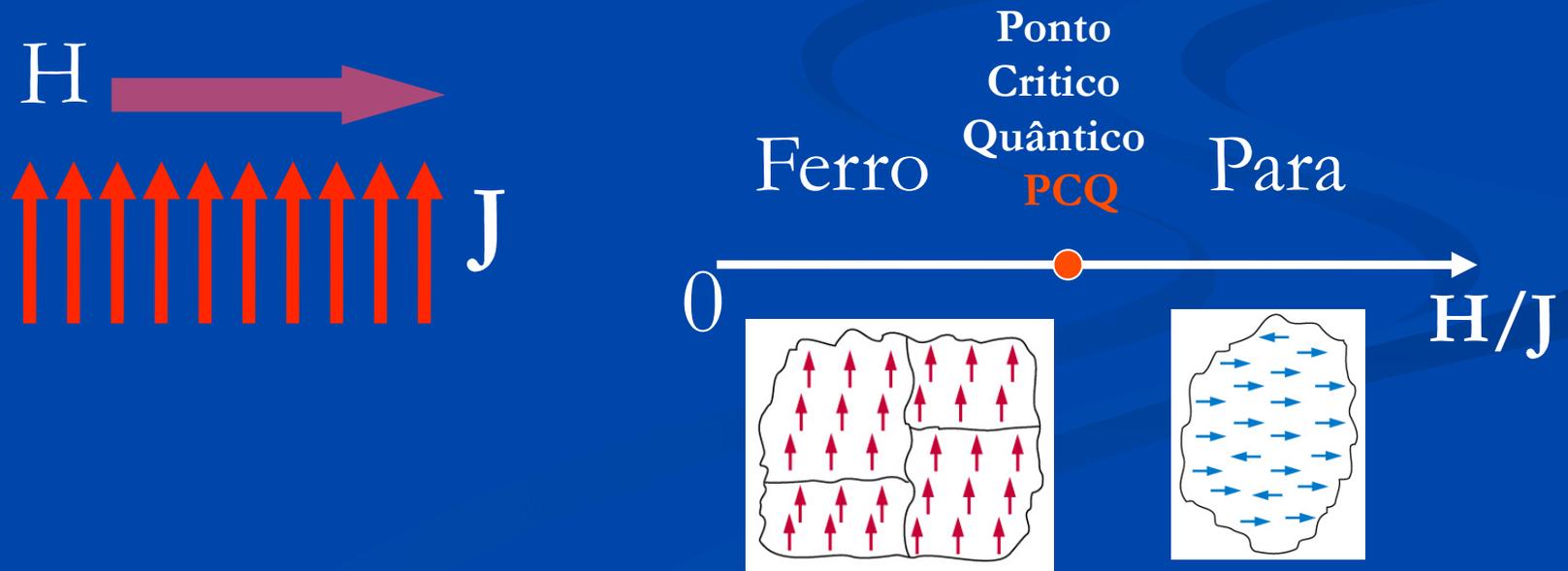
$$E = - \sum_{i,j} J_{ij} S_i^z S_j^z \quad S = -k_B \ln W_N \quad W_N = \frac{N!}{N+!N-!}$$

Estado de equilíbrio é dado pelo mínimo da energia livre F

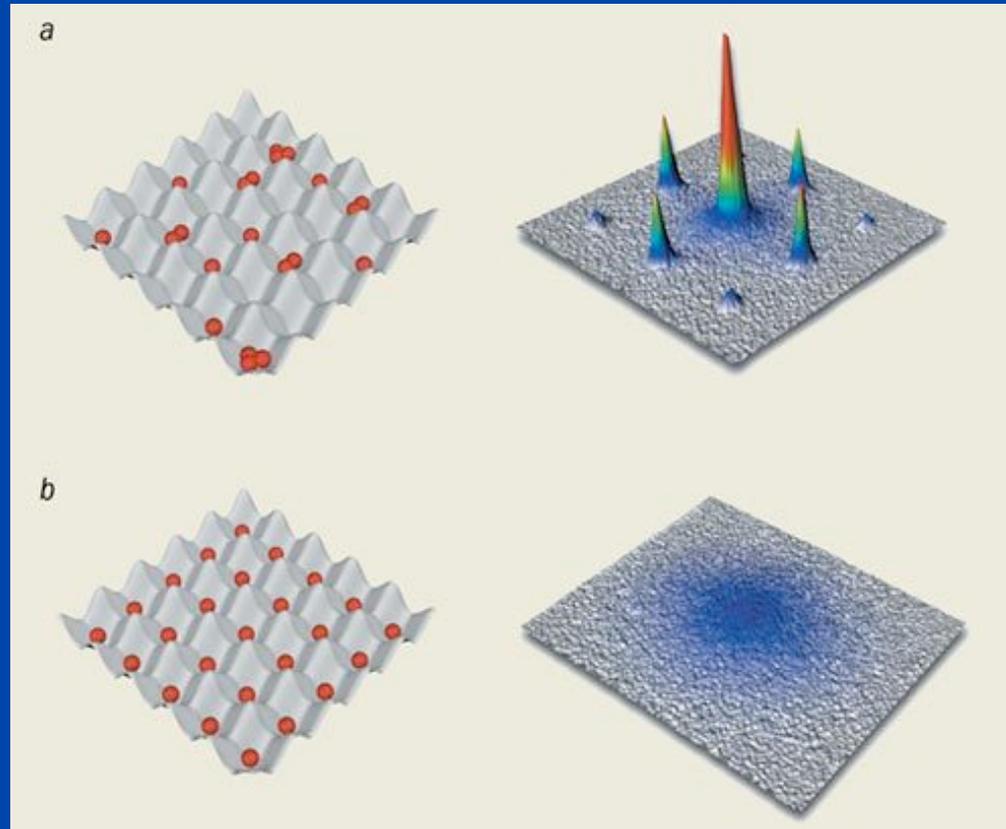
$$\mathbf{F} = \mathbf{E} - \mathbf{T} \mathbf{S}$$

Transições de fase quânticas

Ocorrem a temperatura nula ($T = 0$), não há entropia ou desordem térmica! Entretanto pode haver competição entre as diferentes interações atuando nas partículas do sistema e que eventualmente produz uma mudança de fase.



Transição superfluido-isolante de Mott



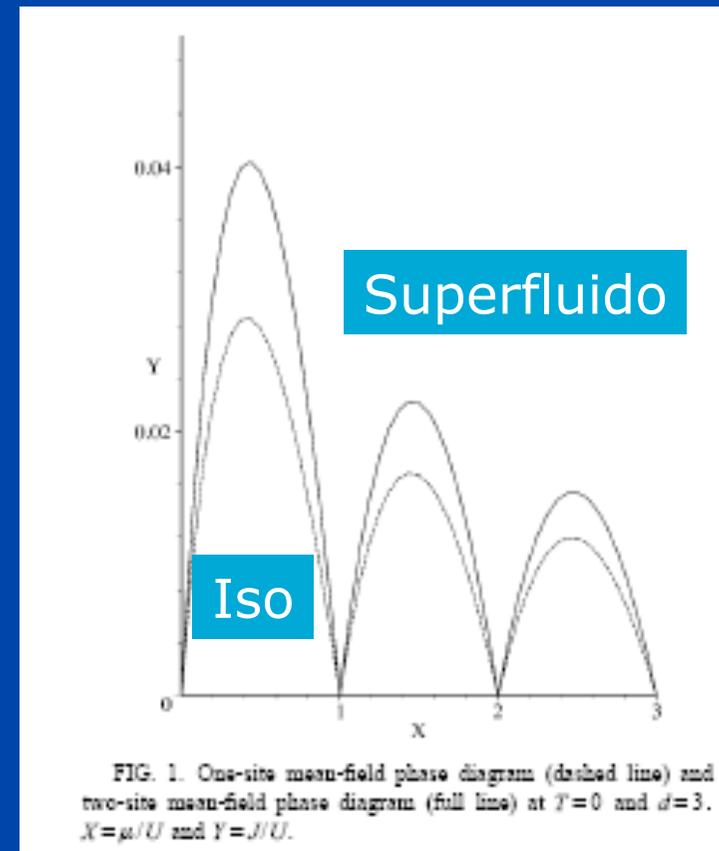
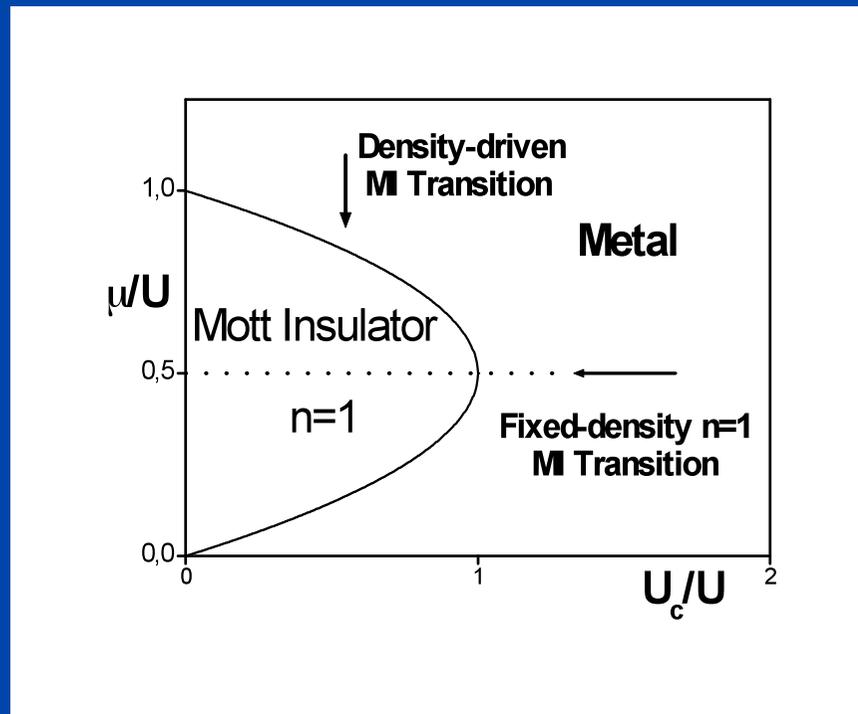
Transição superfluido-isolante de Mott (Greiner et al, Nature 415, 39 (2002). a) No superfluido os átomos estão livres para pular entre os sítios da rede. Existe coerência entre os estados e quando eles são liberados e expandem uma interferência das ondas de matéria é observada. b) No isolante de Mott há exatamente um átomo por sítio sem coerência entre os sítios e nenhuma interferência é observada.

Transição superfluido-isolante de Mott

- Metal-Isolante (Transição de Mott)
- Superfluido-isolante

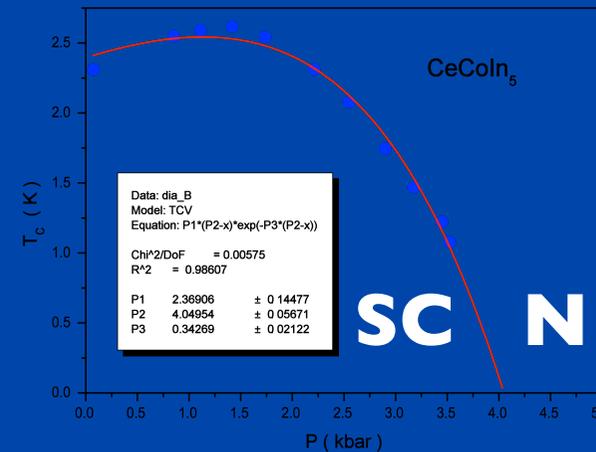
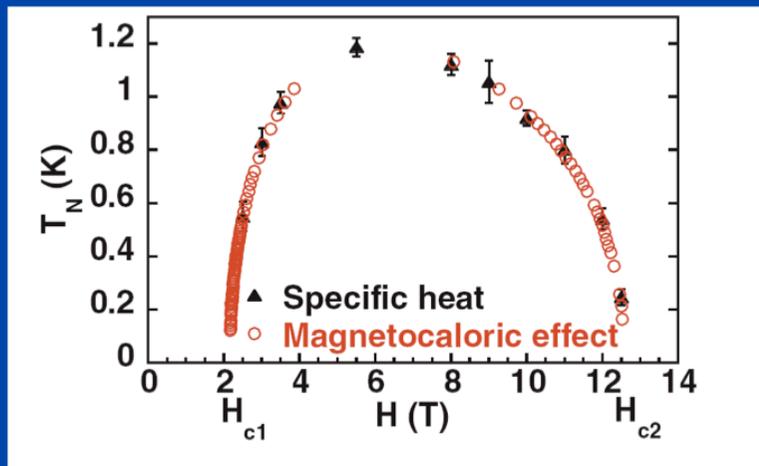
Modelo de Hubbard

$$H = \sum_{i,j,\sigma} t_{ij} c_{i\sigma}^\dagger c_{j\sigma} + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow} - \mu \sum_i n_{i\sigma}$$



Transições quânticas (T=0)

Neste caso a entropia é nula e não ha competição com a energia



$$\mathcal{H} = \sum_{j,\nu} J_\nu \mathbf{S}_j \cdot \mathbf{S}_{j+e_\nu} + \sum_j [D(S_j^z)^2 + g\mu_B H S_j^z]$$

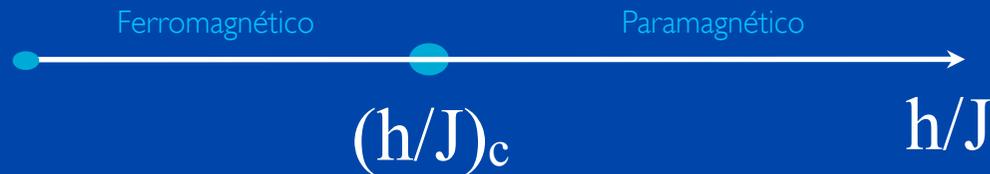
$$H = \sum_{k\sigma} \epsilon_k^a a_{k\sigma}^\dagger a_{k\sigma} + \sum_{k\sigma} \epsilon_k^b b_{k\sigma}^\dagger b_{k\sigma} + g\hbar \sum_{kk'\sigma} b_{k'\sigma}^\dagger b_{-k'-\sigma} b_{-k-\sigma} b_{k\sigma} + \sum_{k\sigma} V_k (a_{k\sigma}^\dagger b_{k\sigma} + b_{k\sigma}^\dagger a_{k\sigma}).$$

Competição entre os termos da energia

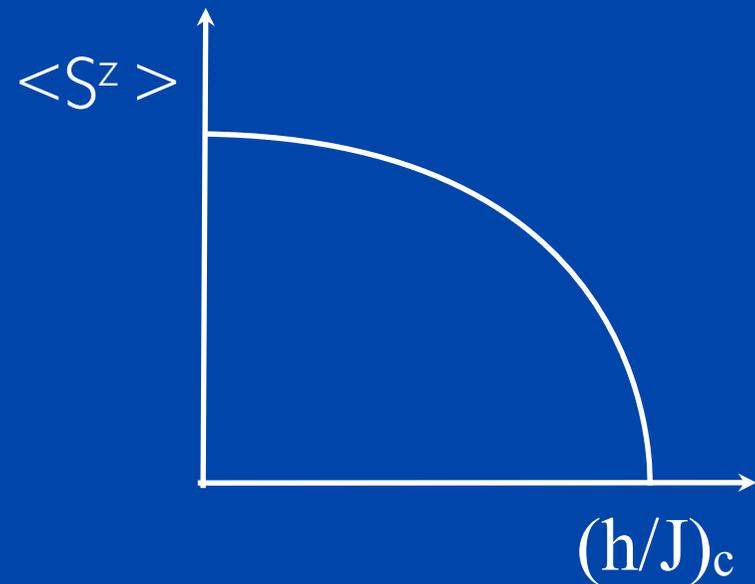
Modelo de Ising em campo transverso

$$H = - \sum_{ij} J_{ij} S_i^z S_j^z - h \sum_i S_i^x$$

$$T = 0$$



Ponto crítico quântico



Caracterização das transições de fases

Grandezas físicas apresentam singularidades: expoentes críticos

$$m \propto |g|^\beta$$

$$\chi = \partial m / \partial h \propto |g|^{-\gamma}$$

$$\xi \propto |g|^{-\nu}$$

$$m(g=0) \propto h^{1/\delta}$$

$$\tau = \xi^z \propto |g|^{-\nu z}$$

$$f \propto |g|^{2-\alpha}$$

Transições térmicas

$$g = T - T_c$$

Transições quânticas

$$g = h - h_c$$

Expoentes críticos não são Independentes

$$\alpha + 2\beta + \gamma = 2$$

Leis de escala

Leis de Hiperescala
Caso classico

$$2 - \alpha = \nu d$$

Caso quantico

$$2 - \alpha = \nu(d + z)$$

Como calcular os expoentes criticos?

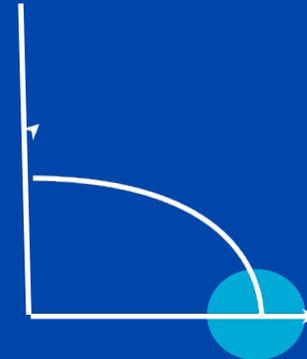
Teoria de Landau

Expansão da energia livre próxima do ponto critico

$$F = a + gm^2 + cm^4 - hm$$

com $g = T - T_c$ e fazendo $\partial F / \partial m = 0$, obtemos:

$$m \propto |g|^{1/2}$$



Expoentes de campo médio

$$\alpha = 0$$

O problema é que estes expoentes não descrevem os experimentos.

$$\beta = 1/2$$

$$\gamma = 1$$

Note que eles são completamente universais!

$$\delta = 3$$

$$\nu = 1/2$$

Note que se substituirmos os expoentes de campo médio na lei de hiperescala,

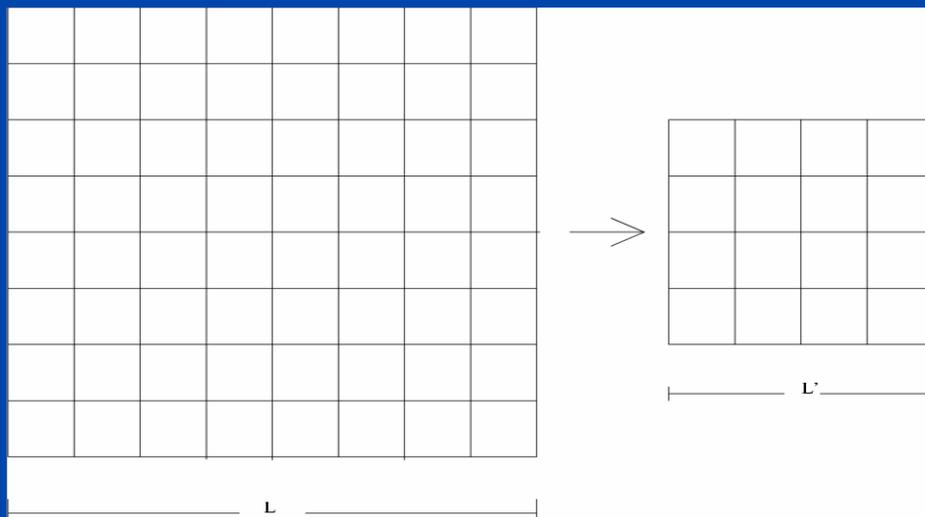
$$2 - \alpha = \nu d$$

obtemos que ela é satisfeita para $d=4$.

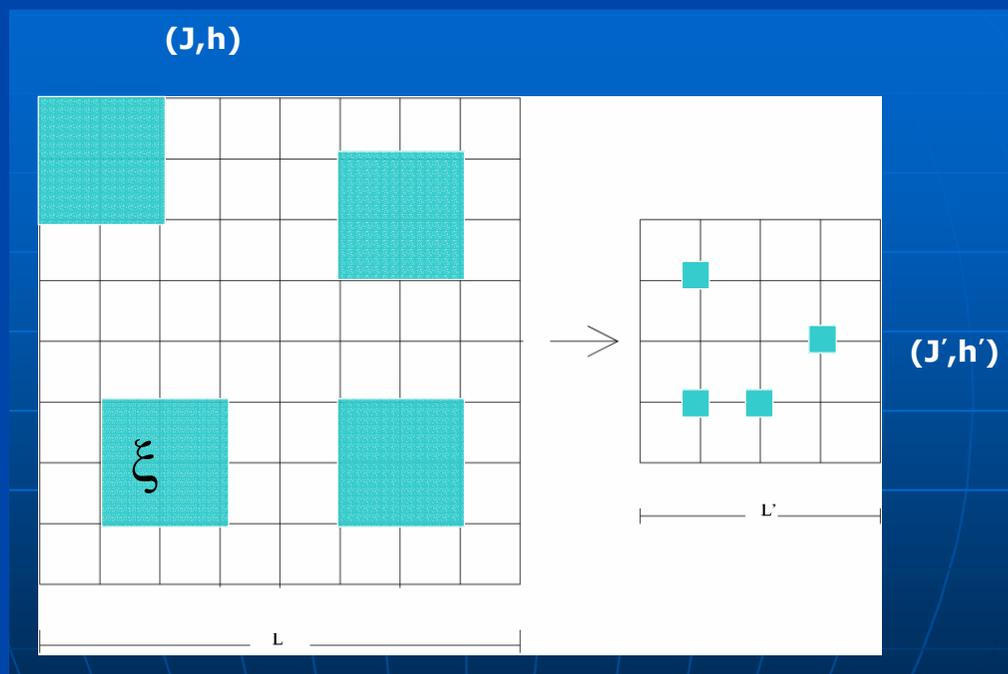
Dimensão crítica superior

Grupo de renormalização

Transformações de escala



Ponto critico = Ponto fixo



$$J' = b^{-y} J$$

$$h' = b^{-y} h$$

$$g' = b^a g$$

$$H' = b^x H$$

Forma invariante de escala da energia livre para uma transição de fase quântica.

$$f \propto |g|^{2-\alpha} F\left(\frac{T}{|g|^{\nu_z}}, \frac{H}{|g|^{\beta+\gamma}}\right)$$

Nas transições quânticas devido ao princípio de incerteza, $\Delta E \Delta \tau \geq h/2\pi$,
estática e dinâmica estão inextricavelmente acopladas.

$$2 - \alpha = \nu (d + z)$$

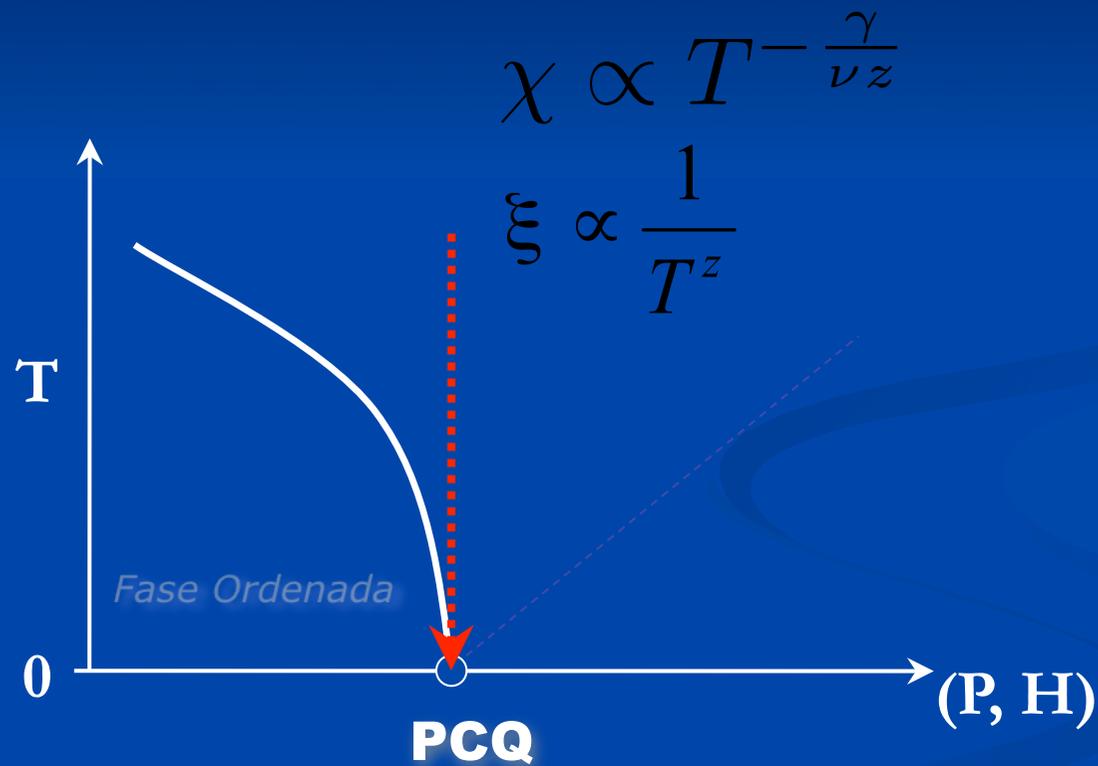
d dimensão espacial
z dimensão temporal

Dimensão efetiva

$$d_{\text{eff}} = d + z$$

Como obter os expoentes críticos de uma transição de fase quântica, se ela ocorre em temperatura zero e esta temperatura não é acessível fisicamente?

Diagrama de fases

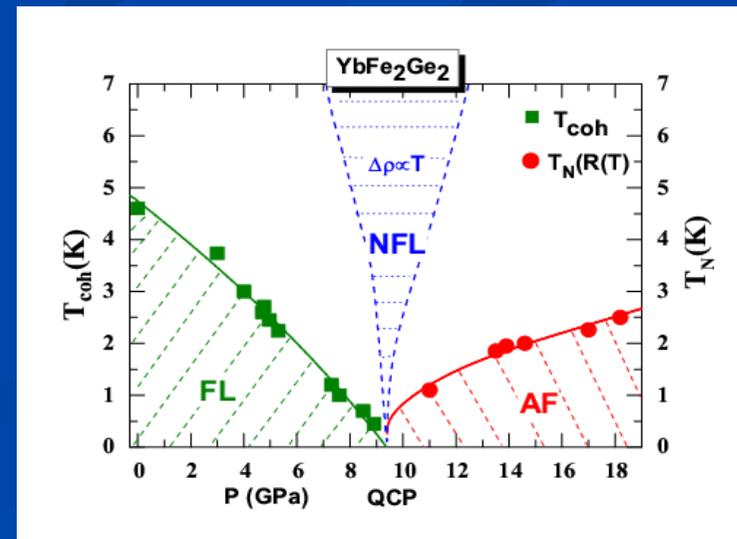
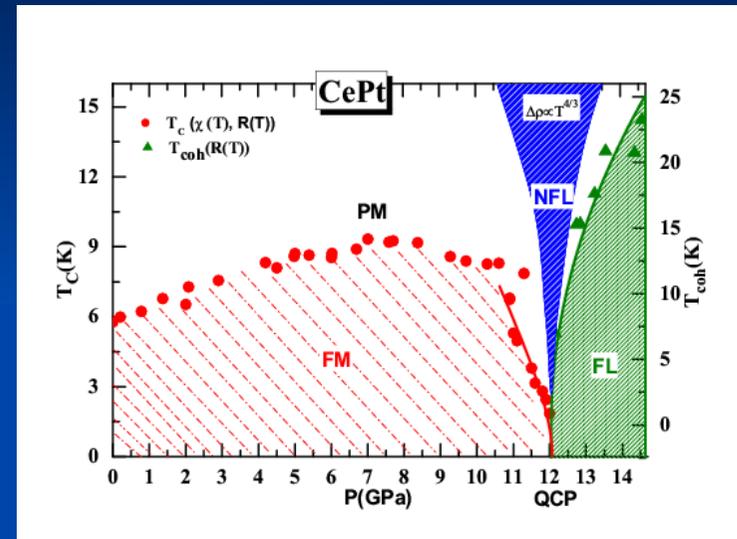


MAC, Japiassu and Troper, 1989

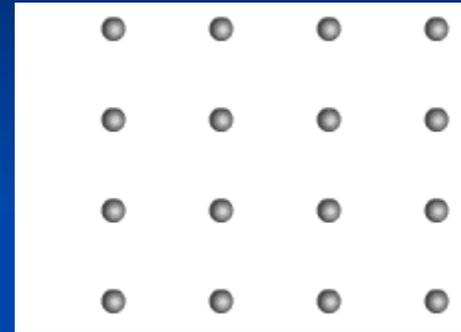
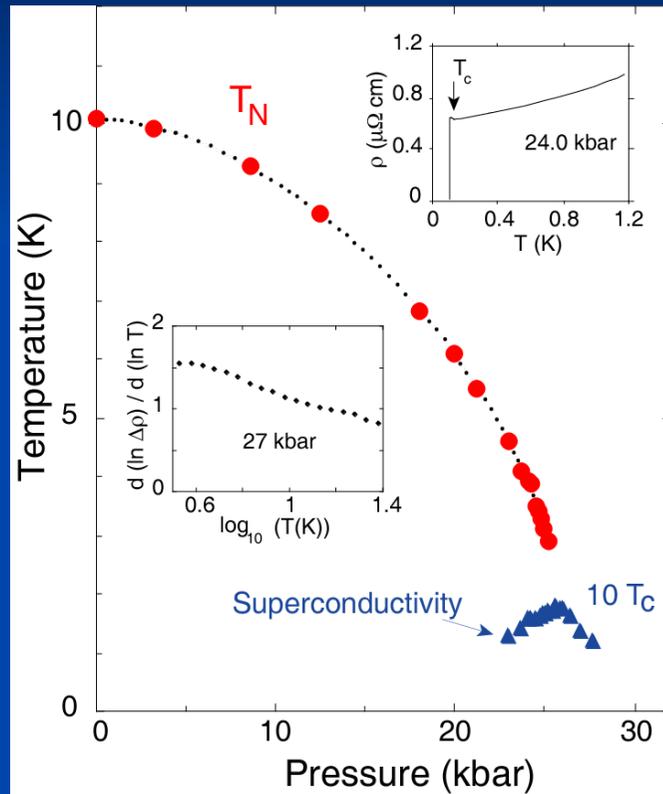
Férmions pesados

- Pressão reduz a temperatura da transição de fase, que eventualmente se anula no PCQ.
- Necessário altas pressões e muito baixas temperaturas.

Larrea et al., 2005-2006



Supercondutividade na vizinhança de um ponto critico quântico

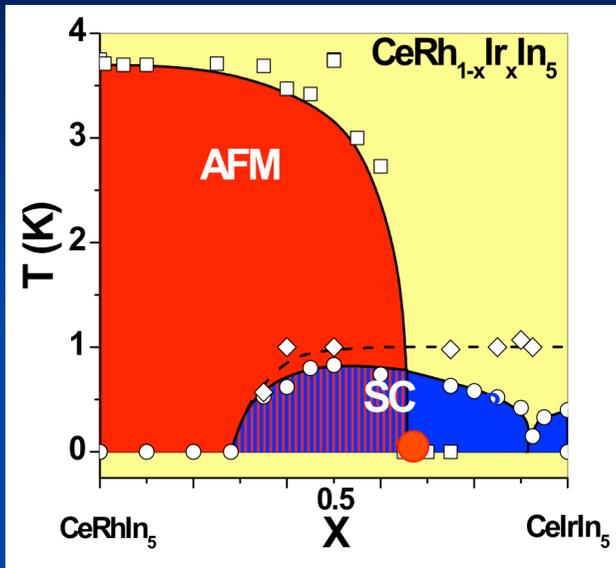


Novo tipo de *cola* entre elétrons!
Flutuações magnéticas devido a
proximidade do ponto critico quântico
magnético.

N.D. Mathur et al., Nature **394**, 39 (1998)

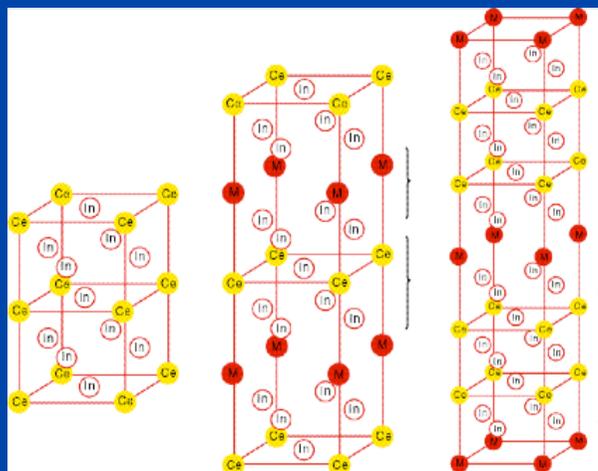
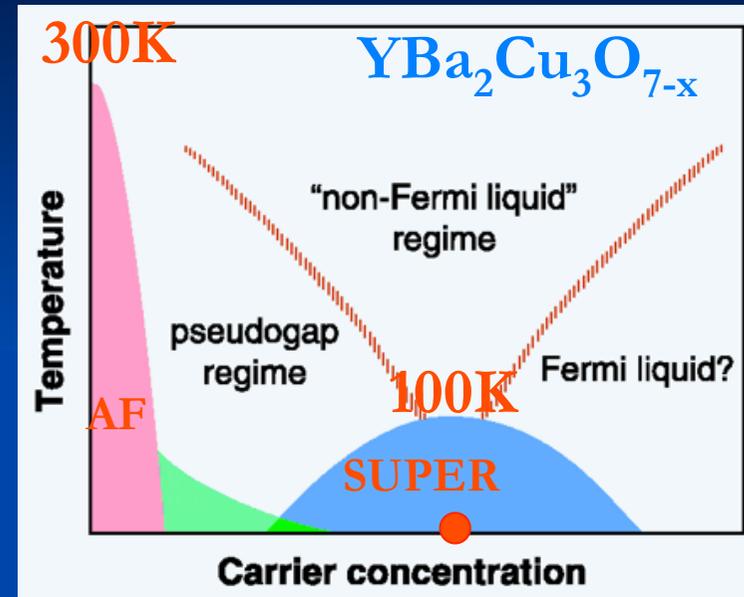
Férmions pesados e supercondutores de alta temperatura critica

$Ce(Rh, Ir)_5In_5$

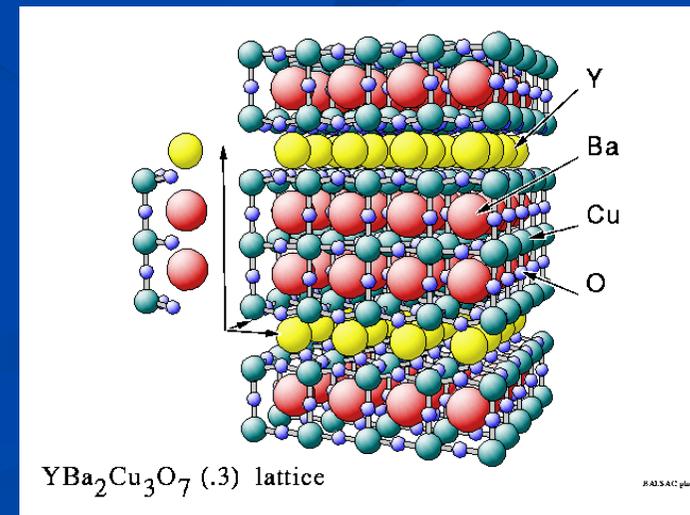


P.G. Pagliuso et al. 2001-2002

Diferentes escalas de energia

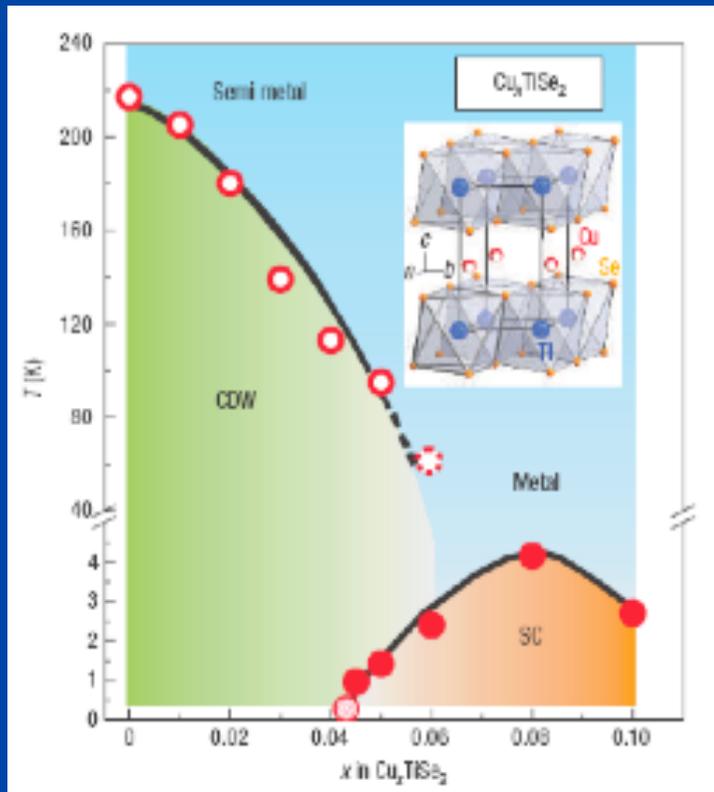


Bidimensionalidade
Fortes Correlações
entre elétrons

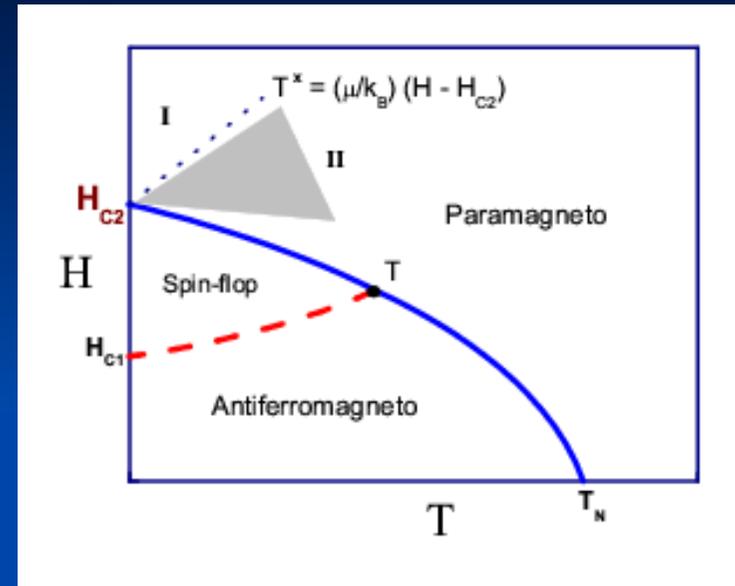


Outras transições quânticas

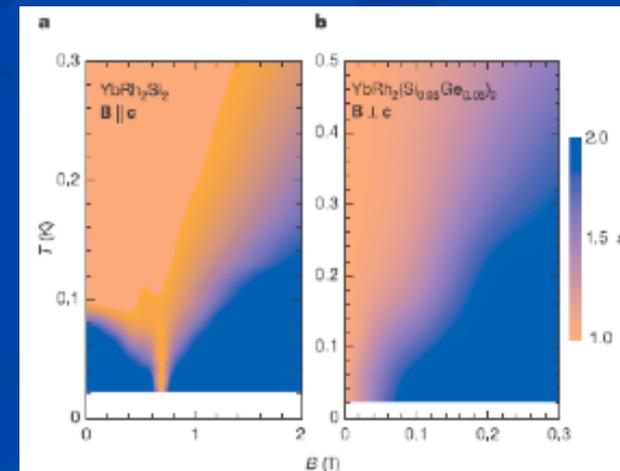
Condensação de Bose-Einstein de magnons em H_{C2}



Morosan et al. 2006



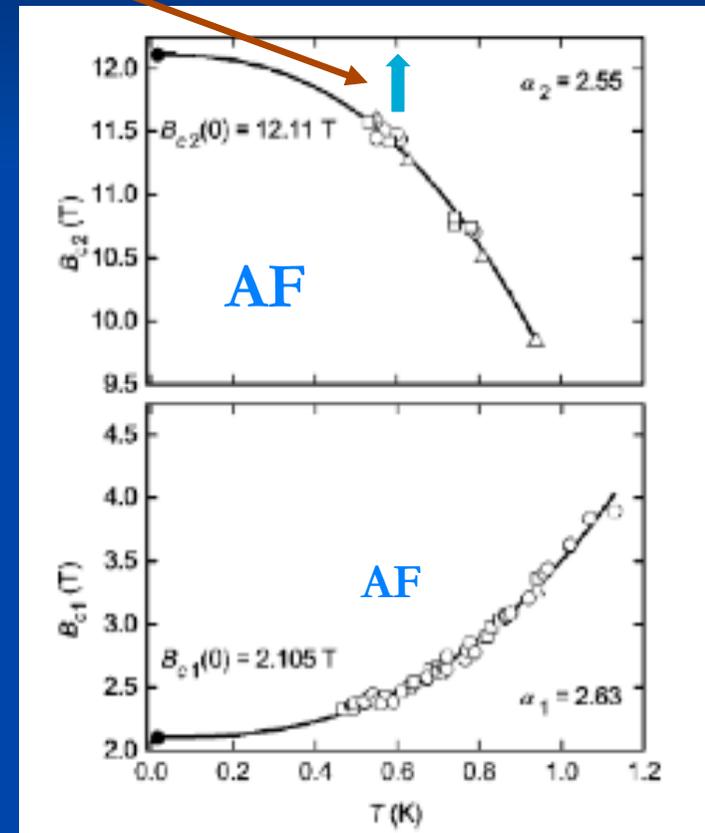
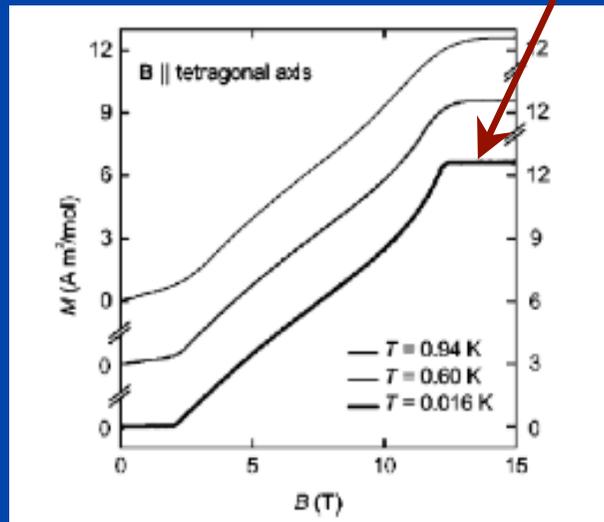
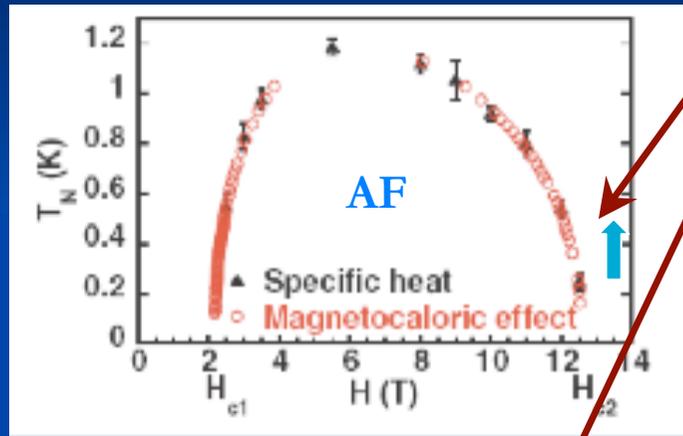
MAC, 2006



Custers et al. 2003

Condensação de Bose-Einstein

Paramagneto supersaturado

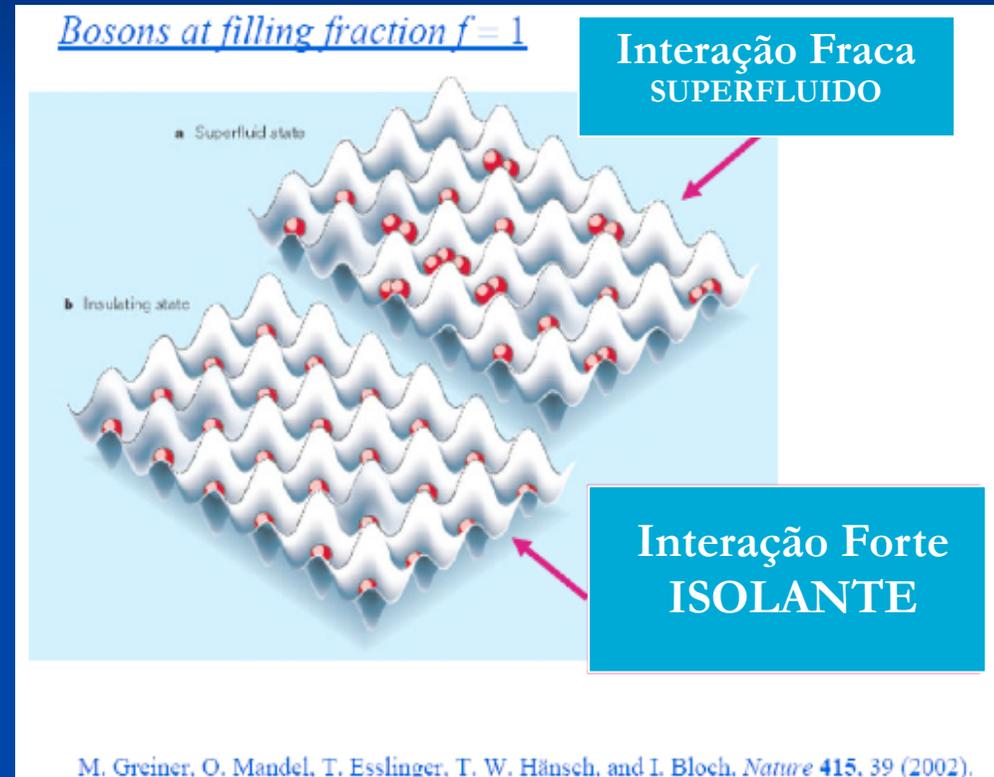
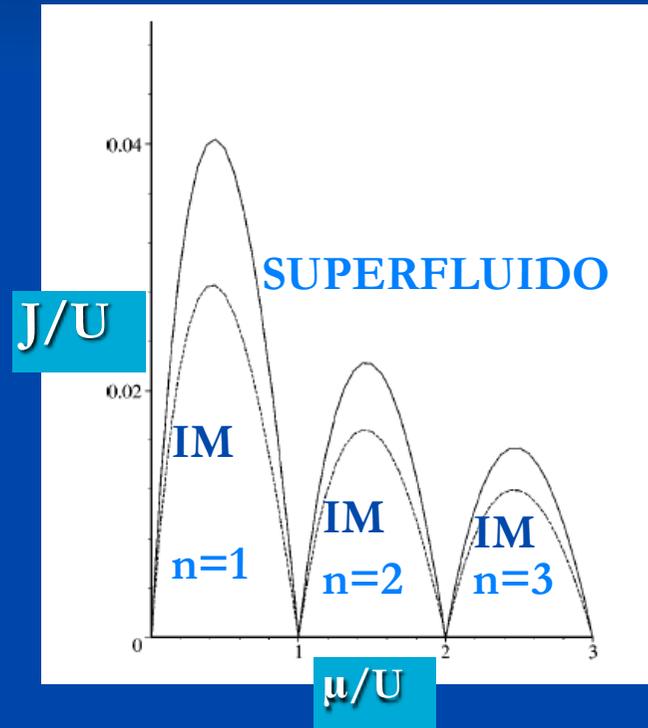


Field-induced magnetic ordering in $NiCl_2 \cdot 4SC(NH_2)_2$

A. Paduan-Filho,* X. Gratens, and N. F. Oliveira, Jr.

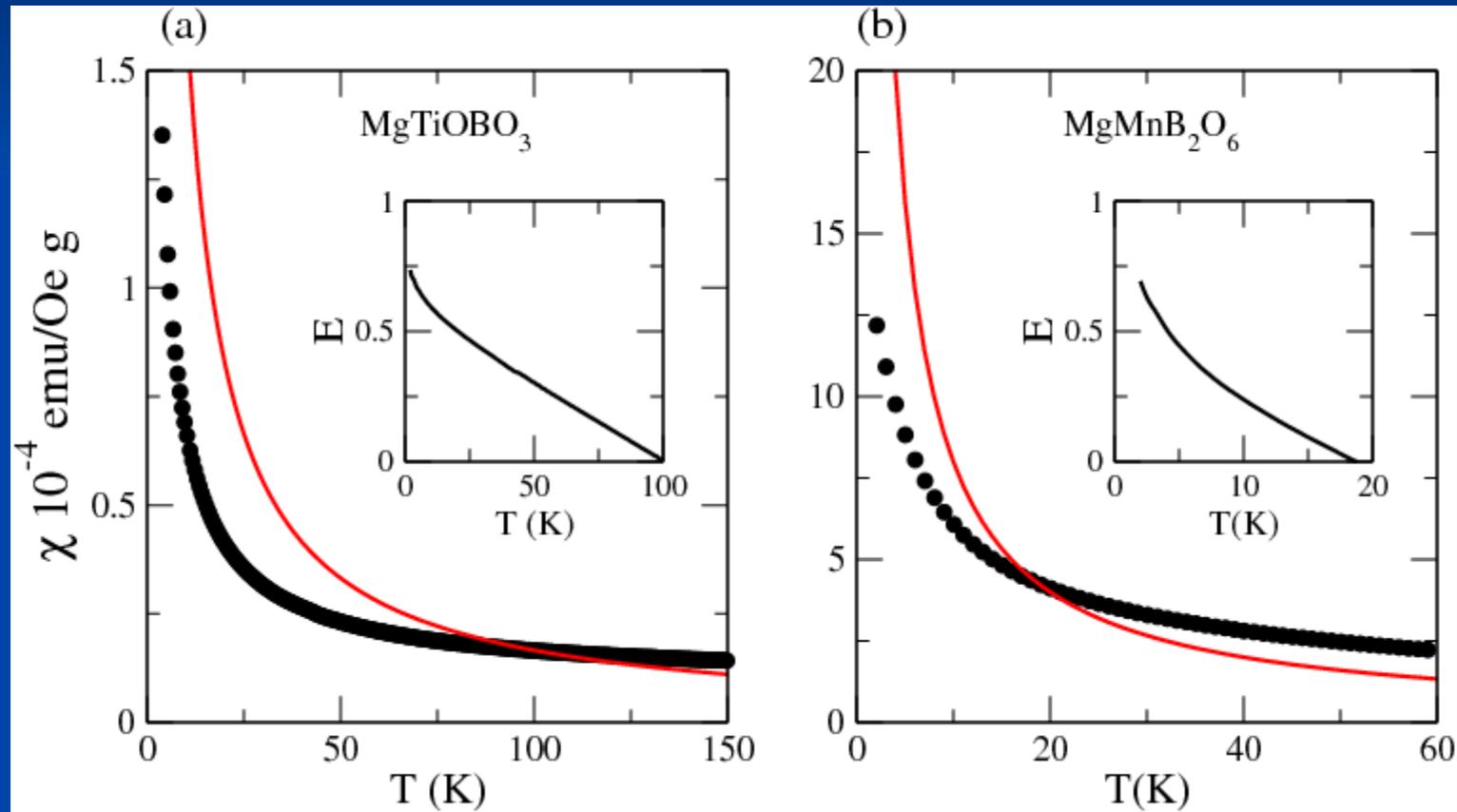
Redes Óticas

$$\mathcal{H} = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \hat{b}_i^\dagger \hat{b}_j - \mu \sum_i \hat{n}_i + \frac{U}{2} \sum_i \hat{n}_i (\hat{n}_i - 1),$$



A. Ferreira and M.A.C. 2002

Emaranhamento em sistemas macroscópicos



Rappoport et al. 2006

Novos materiais

- **Magneto-resistência colossal nas manganitas.**
Resistência elétrica extremamente sensível ao campo magnético
- **Supercondutividade nas cobaltitas de Sódio.**
Sistemas supercondutores com planos de Cobalto.
- **Coexistência de ferromagnetismo e supercondutividade**
Rutenatos com planos alternados ferromagnéticos de Rutênio e supercondutores de Cobre.

Física da Matéria condensada

- Uma área fascinante da física. Problemas na fronteira do conhecimento.
- Dialogo intenso entre teoria e experiência.
- Conduz a descoberta e *construção* de novos materiais.
- Traz no seu desenvolvimento progresso tecnológico.