



# Simpósio de Integração Acadêmica

## “Ciências Básicas para o Desenvolvimento Sustentável”

SIA UFV 2023



### CORRENTES DE *SPIN* SUPERFLUIDAS EM MULTICAMADAS

Maxiel Alves de Oliveira - Universidade Federal de Viçosa.  
Antônio Ribeiro de Moura - Universidade Federal de Viçosa.  
Correntes de spin superfluidas, ferromagneto, multicamadas.

#### Introdução

A spintrônica é um área de estudo em ascensão que busca principalmente explorar as propriedades do *spin* para o desenvolvimento de tecnologia. Atualmente, os componentes eletrônicos alcançaram dimensões nanométricas, escala em que os efeitos quânticos passam a ser relevantes. Além disso, a redução das dimensões dos componentes leva a um aumento significativo na geração de calor, o que tornaria os dispositivos inoperáveis nas escalas atuais. Diante dessa realidade, a spintrônica se apresenta como uma necessidade iminente.

Grandes marcos em spintrônica são a descoberta da magnetorresistência gigante (GMR) e a utilização do *spin* como um *bit* quântico (*qubit*). A descoberta da GMR resultou no Prêmio Nobel em Física de 2007, concedido a Albert Fert e Peter Grünberg, reconhecendo o efeito que ampliou consideravelmente a capacidade de armazenamento em discos rígidos. Por outro lado, a computação quântica tem potencial para superar as principais limitações de um computador clássico, pois é baseada na superposição de estados quânticos.

Na spintrônica, uma corrente de *spin* (CS) pura em um meio condutor é definida como o fluxo direcionado de cargas de acordo com as orientações do *spin*. Por outro lado, em sistemas magnéticos isolantes, a CS é propagada por meio de ondas de *spin* (mágnons), que se propagam por pequenas distâncias da ordem do comprimento de onda do mágnon. O transporte de *spin* também pode ocorrer de forma superfluida, i.e., livre de resistências. Nesse caso, a CS é capaz de se propagar por distâncias muito maiores se comparadas ao caso anterior.

#### Objetivos

- Investigar a propagação de CS superfluidas e CS difusivas em sistemas magnéticos compostos por várias camadas ferromagnéticas, separadas por camadas finas metálicas;
- Obter uma teoria para circuitos magnéticos, semelhantes ao caso elétrico.

#### Metodologia

Um caso típico de análise de propagação de CS superfluidas ocorre no estudo de uma interface entre um metal normal (MN) e um ferromagneto (FM). O MN é descrito pelo modelo de elétrons livres, enquanto o FM é descrito pela hamiltoniana de Heisenberg, definida em termos dos operadores de *spin*  $S^+$ ,  $S^-$  e  $S^z$ . Para determinar a dinâmica das ondas de *spin*, é escrita a representação linear de Holstein-Primakoff. Em baixas temperaturas, a hamiltoniana de Heisenberg pode ser descrita considerando apenas o termo quadrático envolvendo os operadores canônicos. Assim o FM pode ser resolvido facilmente pelos procedimentos padrões que envolvem a representação do espaço de Fourier e posterior determinação das médias termodinâmicas. Na interface, descrita por uma interação do tipo sd, o transporte de *spin* do MN para o FM ocorre por meio do processo de transferência de momento angular (*spin-transfer torque*), enquanto do FM para o MN ocorre pelo processo de bombeamento de *spin* (*spin pumping*). Quando a configuração do FM envolve um gradiente linear do campo de *spin* que se distribui por todo o material, é possível alcançar o estado de superfluidez de *spin*. Neste caso, as CS superfluidas no FM são descritas, em temperatura nula, por meio da equação de Landau-Lifshitz-Gilbert.

#### Resultados

Considere um FM entre duas camadas de MN. As camadas metálicas são finas o suficiente para que não ocorra difusão. A difusão também não ocorre no FM, sendo que esse caso será considerado mais adiante. Além disso, as CS possuem componentes apenas na direção  $\hat{x}$ . As densidades de CS nas interfaces *left* - i.e., aquelas nas quais a corrente passa de um MN para o FM - e *right* - aquelas nas quais a corrente passa do FM para um MN - são dadas por:

$$J_L = \frac{g_L^{\uparrow\downarrow} \mu_L}{4\pi} - \frac{(g_L^{\uparrow\downarrow})^2 \mu_L + g_L^{\uparrow\downarrow} g_R^{\uparrow\downarrow} \mu_R}{4\pi(g_L^{\uparrow\downarrow} + g_R^{\uparrow\downarrow} + g_\alpha)}, \quad (1)$$

$$J_R = \frac{g_L^{\uparrow\downarrow} g_R^{\uparrow\downarrow} \mu_L + (g_R^{\uparrow\downarrow})^2 \mu_R}{4\pi(g_L^{\uparrow\downarrow} + g_R^{\uparrow\downarrow} + g_\alpha)} - \frac{g_R^{\uparrow\downarrow} \mu_R}{4\pi}, \quad (2)$$

em que  $g^{\uparrow\downarrow}$  é o acoplamento de *spin* (*spin-mixing*),  $\mu$  é o desbalanço no nível de ocupação entre os portadores com *spin up* e *down* na interface e  $g_\alpha \equiv 4\pi\alpha SL/\hbar$ , sendo  $L$  o comprimento do FM e  $\alpha$  a constante de amortecimento de Gilbert. Adotando uma camada ferromagnética muito fina, o amortecimento é desprezível, o que implica  $g_\alpha \approx 0$  e  $J_L \approx J_R \equiv J$ , sendo que:

$$J = \frac{g_L^{\uparrow\downarrow} g_R^{\uparrow\downarrow}}{4\pi(g_L^{\uparrow\downarrow} + g_R^{\uparrow\downarrow})} (\mu_L - \mu_R). \quad (3)$$

Assim, ao integrar sobre a área transversal  $A$ , é obtido um análogo para a Lei de Ohm, em que:

$$R \equiv \frac{4\pi(g_L^{\uparrow\downarrow} + g_R^{\uparrow\downarrow})}{g_L^{\uparrow\downarrow} g_R^{\uparrow\downarrow} A} \quad (4)$$

faz o papel da resistência para CS. Nesse caso, as resistências equivalentes obtidas para multicamadas de FM em série e em paralelo são dadas por  $R_{eq} = \sum_i R_i$  e  $R_{eq}^{-1} = \sum_i R_i^{-1}$ , respectivamente, sendo  $R_i$  a resistência devido a cada camada ferromagnética.

Já para o caso com amortecimento, é definida uma densidade de corrente média, considerando o processo de difusão no FM, que é importante quando a camada ferromagnética não é muito fina. Por meio dos resultados obtidos por S. Rezende em (2), de uma média ponderada ao longo do FM e das equações (1) e (2), a densidade de corrente difusiva  $J_{Média}$  é definida como:

$$J_{Média} \equiv \frac{\lambda}{L} \underbrace{\left( \frac{e^{L/\lambda} + e^{-L/\lambda} - 2}{e^{L/\lambda} - e^{-L/\lambda}} \right)}_{4\pi f(L/\lambda)} (J_L + J_R) = f(L/\lambda) \left( \frac{2g_L^{\uparrow\downarrow} g_R^{\uparrow\downarrow} (\mu_L - \mu_R) + g_\alpha (g_L^{\uparrow\downarrow} \mu_L - g_R^{\uparrow\downarrow} \mu_R)}{g_L^{\uparrow\downarrow} + g_R^{\uparrow\downarrow} + g_\alpha} \right), \quad (5)$$

em que  $\lambda$  é o comprimento de difusão do mágnon. Ao assumir  $g_L^{\uparrow\downarrow} = g_R^{\uparrow\downarrow} \equiv g^{\uparrow\downarrow}$ , é obtido:

$$J_{Média} = g^{\uparrow\downarrow} f(L/\lambda) (\mu_L - \mu_R) \quad (6)$$

e é possível prosseguir de forma análoga ao caso sem amortecimento, com  $R \equiv [A g^{\uparrow\downarrow} f(L/\lambda)]^{-1}$ .

#### Discussão

Para o caso sem amortecimento, foi possível obter um análogo para a Lei de Ohm para a corrente superfluida de *spin*, dada pela equação (3). Devido à semelhança com o caso elétrico, os resultados para as resistências equivalentes são similares aos resultados de um resistor em um circuito elétrico.

O caso em que os acoplamentos de *spin* são considerados iguais na corrente difusiva fornece os mesmos resultados. Isso acontece porque a equação (6) independe de  $g_\alpha$ , sendo semelhante ao caso anterior. Note que o limite da equação (5) com  $L/\lambda \rightarrow 0$  é exatamente a equação (3), pois quando  $L$  tende a zero,  $g_\alpha$  também o faz.

A existência de resistência mesmo sem amortecimento pode estar relacionada ao processo de *spin-transfer torque* (STT) nas interfaces. A CS provocada por esse processo depende apenas de  $g^{\uparrow\downarrow}$  e  $\mu$  das interfaces. O STT age como um torque contrário ao amortecimento e por isso existe resistência à CS, mesmo quando o FM é muito pequeno.

Para o caso com amortecimento considerável, a densidade de corrente de difusão média é dada pela equação (5). Note que o limite de  $J_{Média}$  com  $L/\lambda \rightarrow \infty$  resulta em zero. Esse resultado significa que não há passagem de corrente em um FM muito longo, como esperado.

#### Conclusões

Neste trabalho foi investigado o transporte superfluido e difusivo de *spin* em multicamadas ferromagnéticas. O caso de transporte superfluido em uma camada foi estudado por S. Takei e Y. Tserkovnyak em (3). Para o caso sem amortecimento, foi possível definir um análogo da Lei de Ohm e com isso obter as resistências equivalentes para camadas ferromagnéticas em série e em paralelo. Para o caso com amortecimento, foi definida uma densidade de CS difusiva média. Entretanto, não foi possível obter um análogo da Lei de Ohm. O modelo foi composto de múltiplas camadas ferromagnéticas em série ou em paralelo, separadas por finas camadas metálicas. Foi analisada a passagem de corrente superfluida de *spin* em camadas ferromagnéticas muito finas e a passagem de corrente difusiva em FM de comprimento considerável. Os FM foram descritos pela hamiltoniana de Heisenberg, enquanto os MN foram descritos pelo modelo de elétrons livres.

#### Referências

- [1] DE OLIVEIRA, M. A., AND DE MOURA, A. R. Correntes de *spin* superfluidas em multicamadas. Tech. rep., Universidade Federal de Viçosa, 2023.
- [2] REZENDE, S. *Fundamentals of Magnonics*. Lecture Notes in Physics. Springer International Publishing, 2020.
- [3] TAKEI, S., AND TSERKOVNYAK, Y. Superfluid spin transport through easy-plane ferromagnetic insulators. *Physical Review Letters* 112, 22 (2014), 227201.

#### Apoio Financeiro

