IRAMIS : Institut Rayonnement Matlère de Saclay

Saclay

SPEC/LNO

Calcul avec la dynamique non linéaire d'ondes de spin

Spécialité Physique de la matière condensée

Niveau d'étude Bac+5

Formation Master 2

Unité d'accueil SPEC/LNO

Candidature avant le 05/04/2022

Durée 4 mois

Poursuite possible en thèse oui

Contact DE-LOUBENS Gregoire
+33 1 69 08 71 60
gregoire.deloubens@cea.fr

Résumé

Dans les nanostructures magnétiques, les modes propres d'excitation (ondes de spin) sont couplés entre eux via des interactions non linéaires. L'idée est d'utiliser ce système dynamique pour accomplir des tâches de calcul neuromorphique.

Sujet détaillé

Les ondes de spin (OdS) sont les excitations collectives de l'aimantation dans les matériaux ferromagnétiques. Leur fréquence propre se situe typiquement dans la gamme GHz avec des longueurs de propagation de plusieurs microns en fonction de l'amortissement intrinsèque du matériau. En raison des interactions d'échange et dipolaires, leur dynamique est par nature non linéaire et présente une physique très riche. Dans les géométries confinées à base de couches minces, les OdS sont quantifiées avec un spectre fréquentiel contrôlé par les dimensions latérales de l'échantillon. Ce spectre d'OdS peut également être modifié par des stimuli externes comme un champ magnétique ou un couple de transfert de spin. Des stimuli de grande amplitude peuvent aussi déclencher des processus non linéaires comme la conversion de mode et les instabilités de mode, conduisant à une redistribution d'énergie entre OdS [1,2].

Au cours de ce stage, nous étudierons expérimentalement les possibilités offertes par les OdS dans des couches minces nanostructurées pour effectuer du "reservoir computing" [3]. Le mécanisme de contrôle de base est le couplage non linéaire entre OdS, qui permet aux modes propres orthogonaux de l'état d'équilibre d'interagir les uns avec les autres à mesure que leurs amplitudes augmentent. Parce qu'un tel couplage implique des événements de seuil [1], comme observé dans les neurones, il est possible de réaliser des tâches de calcul de nature cognitive, comme par exemple de la classification. Pour cela, nous réaliserons une spectroscopie multifréquence de nanostructures magnétiques à très faible amortissement dans le régime non linéaire [2]. Nous utiliserons un microscope de force à résonance magnétique, une technique de champ proche développée au laboratoire capable de détecter la dynamique d'OdS dans des nanoaimants individuels [4]. Pour analyser les résultats expérimentaux et identifier les configurations utiles pour le reservoir computing basé sur un réseau de neurones récurrent, nous nous appuierons également sur des simulations micromagnétiques basées sur un code python open source [5]. À moyen terme, cela pourrait permettre une implémentation hardware de reservoir computing reposant sur le concept de "liquid

state machine" [6] aux fréquences GHz, qui serait utile entre autres pour le traitement des signaux de télécommunications.

Ce stage se déroulera dans le cadre de deux projets récemment financés, l'un par l'Europe (k-NET) et l'autre par l'ANR (MARIN), et se déroulera donc dans un environnement collaboratif.

Références :
[1] V. Naletov et al., Ferromagnetic resonance spectroscopy of parametric magnons excited by a four-wave process, Phys. Rev. B 75, 140405 (2007)
[2] Y. Li et al., Nutation Spectroscopy of a Nanomagnet Driven into Deeply Nonlinear Ferromagnetic Resonance, Phys. Rev. X 9, 041036 (2019)
[3] W. Maass et al., Real-time computing without stable states: A new framework for neural computation based on perturbations, Neural Computation 14, 2531 (2002)
[4] O. Klein et al., Ferromagnetic resonance force spectroscopy of individual submicron-size samples, Phys. Rev. B 78, 144410 (2008)
[5] http://micromagnetics.org/software/
[6] C. Fernando & S. Sojakka, Pattern Recognition in a Bucket in Lecture Notes in Computer Science, vol 2801 (2003)

Mots clés

Dynamique de l'aimantation ; nanomagnétisme ; magnonique ; systèmes dynamiques ; calcul neuromorphique

Compétences

Microscopie à force magnétique ; techniques hyperfréquence ; simulations micromagnétiques

Logiciels

Python

Computing with nonlinear spin-wave dynamics

Summary

In magnetic nanostructures, the excitation eigenmodes (spin-waves) are coupled together via nonlinear interactions. The main idea is to use this dynamical system to perform neuromorphic computing tasks.

Full description

Spin-waves (SWs) are the collective excitations of magnetization in ferromagnets. Their natural frequency is typically in the GHz range with propagation lengths over several microns depending on the intrinsic damping of the material. Due to exchange and dipole-dipole interactions, their dynamics is inherently nonlinear and can exhibit rich physics. In confined geometries like thin film waveguides and dots, SW modes are quantised with frequency spacings controlled by the lateral dimensions of the magnetic sample, which can be further modified by external stimuli such as applied magnetic fields or spin transfer torques. Large amplitude stimuli can trigger nonlinear processes like mode conversion and mode instabilities, resulting in the redistribution of energy between coupled SW modes [1,2].

During this internship, we will investigate experimentally the capacity of SWs in nanostructured thin films to perform reservoir computing [3]. The basic control mechanism is the nonlinear coupling between SWs, which allows orthogonal eigenmodes of the equilibrium state to interact with each other as their amplitudes increase. Because such coupling involves thresholding events [1], like for spiking neurons, we can achieve computational tasks with a cognitive nature like classification. For this, we will perform a multifrequency spectroscopy of ultra-low damping magnetic nanostructures in the nonlinear regime [2]. We will use a magnetic resonance force microscope, a home made near field technique able to sensitively detect SW dynamics in individual nanomagnets [4]. To analyze the experimental results and identify configurations useful for reservoir computing based on recurrent neural network, we will also rely on micromagnetic simulations based on an open source python code [5]. In the mid-term, this might allow for a new hardware implementation of reservoir computing that relies on the liquid state machine concept [6] at GHz frequencies, which could be useful for processing telecommunications signals.

This internship will take place in the context of two recently funded projects, one by Europe (k-NET), and another one by the French ANR (MARIN), and will therefore be conducted in a collaborative environment.

References:
[1] V. Naletov et al., Ferromagnetic resonance spectroscopy of parametric magnons excited by a four-wave process, Phys. Rev. B 75, 140405 (2007)
[2] Y. Li et al., Nutation Spectroscopy of a Nanomagnet Driven into Deeply Nonlinear Ferromagnetic Resonance, Phys. Rev. X 9, 041036 (2019)
[3] W. Maass et al., Real-time computing without stable states: A new framework for neural computation based on perturbations, Neural Computation 14, 2531 (2002)
[4] O. Klein et al., Ferromagnetic resonance force spectroscopy of individual submicron-size samples, Phys. Rev. B 78, 144410 (2008)
[5] http://micromagnetics.org/software/
[6] C. Fernando & S. Sojakka, Pattern Recognition in a Bucket in Lecture Notes in Computer Science, vol 2801 (2003)

Keywords

Magnetization dynamics ; nanomagnetism ; magnonics ; dynamical systems ; neuromorphic computing

Skills

Magnetic force microscopy; high frequency techniques; micromagnetic simulations

Softwares

Python