

# Curriculum in Fisica della Materia

## Nanomagnetismo e spintronica



Consiglio Nazionale  
delle Ricerche



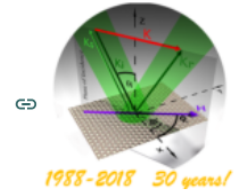
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI PERUGIA

Perugia – 24/03/2023

# Nanomagnetismo e spintronica



Group of High-resolution Optical Spectroscopy and related Techniques



website: <http://ghost.fisica.unipg.it/>



**Giovanni Carlotti**

Dipartimento di Fisica e Geologia  
[giovanni.carlotti@unipg.it](mailto:giovanni.carlotti@unipg.it)



**Gianluca Gubbiotti**

CNR-IOM  
[gubbiotti@iom.cnr.it](mailto:gubbiotti@iom.cnr.it)



**Marco Madami**

Dipartimento di Fisica e Geologia  
[marco.madami@unipg.it](mailto:marco.madami@unipg.it)

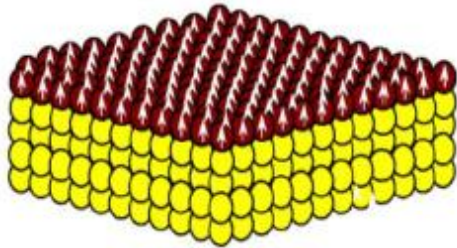


**Silvia Tacchi**

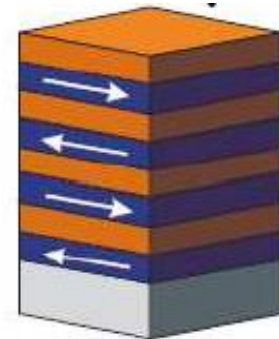
CNR-IOM  
[tacchi@iom.cnr.it](mailto:tacchi@iom.cnr.it)

# Nanomagnetismo

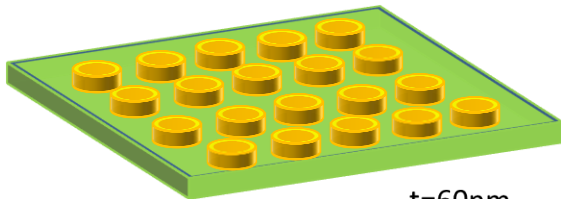
Magnetic films



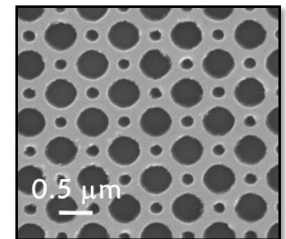
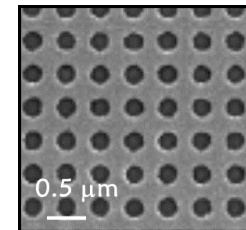
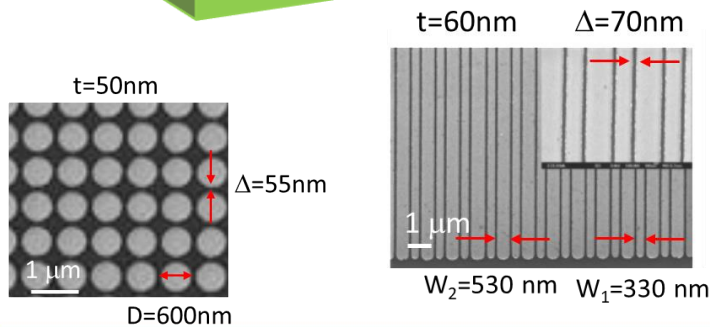
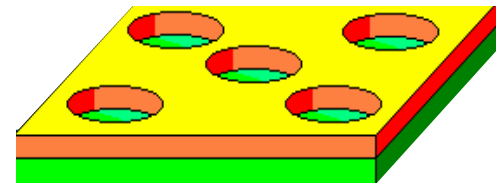
Multilayers



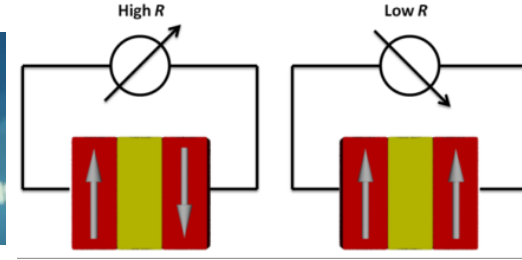
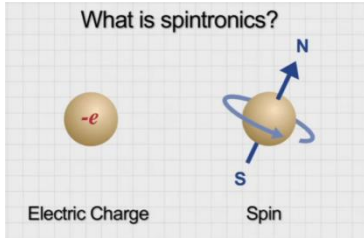
Dot arrays



Antidot arrays

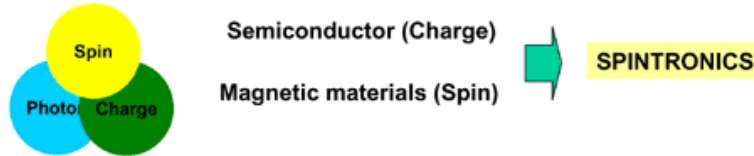


# Spintronica: sfruttare lo **spin** degli elettroni oltre che la loro **carica elettrica**



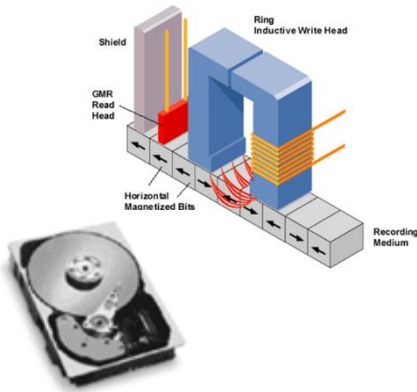
1988: Giant magnetoresistance (**GMR**) – **Nobel Prize 2007**

## Spintronics (Spin + Charge)



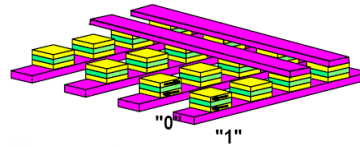
## Applicazioni

### Disk read head

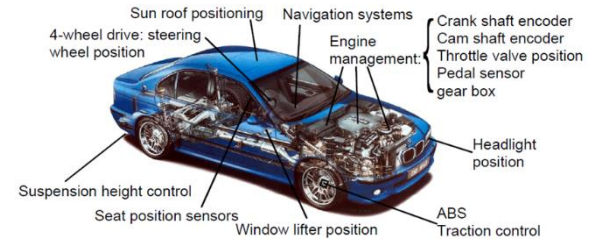


### MRAM

(Magnetic Random Access Memory)



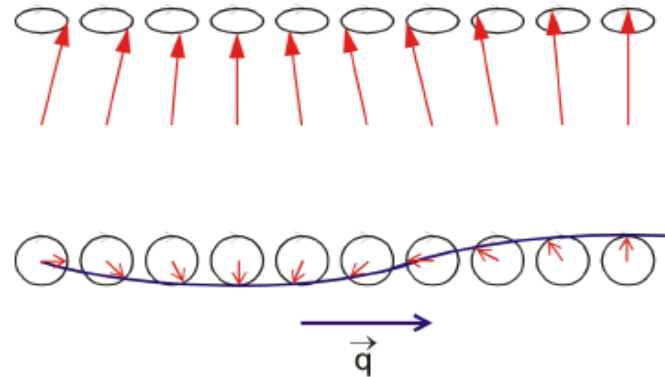
### Magnetic sensors



Up to 70 sensors for drive-by-wire, security, navigation, comfort

## Magnonica: studio della propagazione di onde di spin

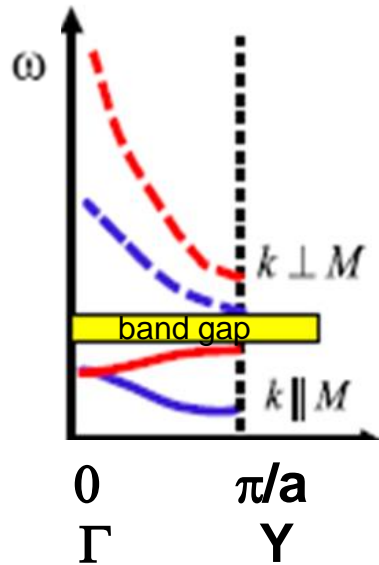
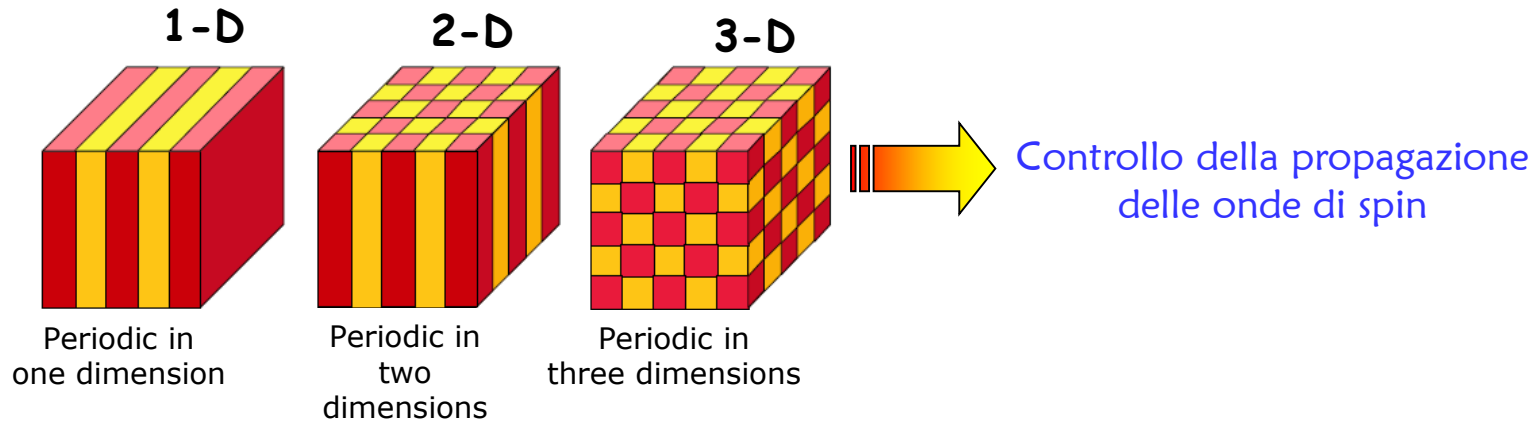
La magnonica è un campo di ricerca nuovo nel nanomagnetismo che ha come obiettivo quello di utilizzare le onde di spin (magnoni) a: (i) trasmettere, (ii) archiviare e (iii) elaborare le informazioni.



### Vantaggi delle onde di Spin:

- La lunghezza d'onda delle onde di spin sono più corte di quelle delle onde elettromagnetiche e questa proprietà offre buone opportunità per la miniaturizzazione dei dispositivi alle frequenze del GHz e del THz.
- Non si ha l'effetto Joule poiché non c'è spostamento di cariche.
- E' possibile realizzare dei dispositivi riprogrammabili

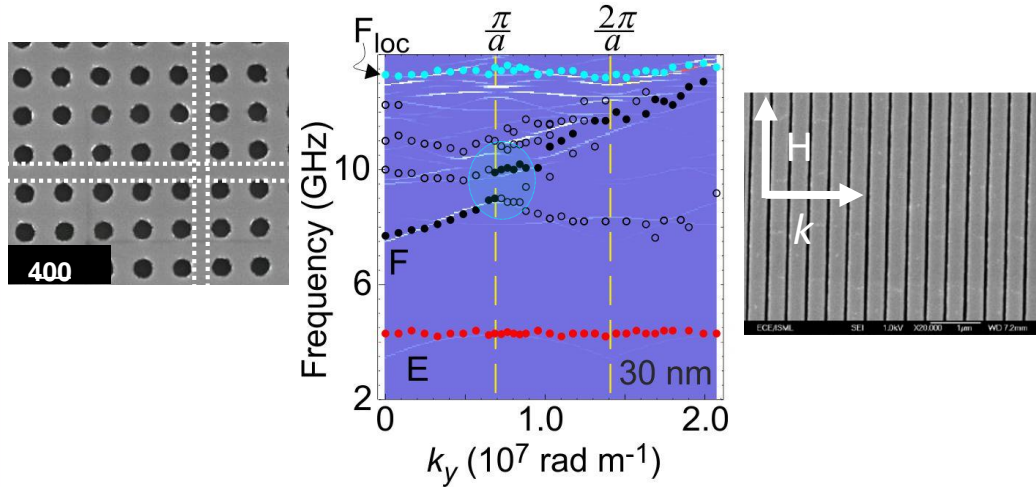
**Cristalli magnonici**: sistemi con una modulazione periodica delle proprietà magnetiche



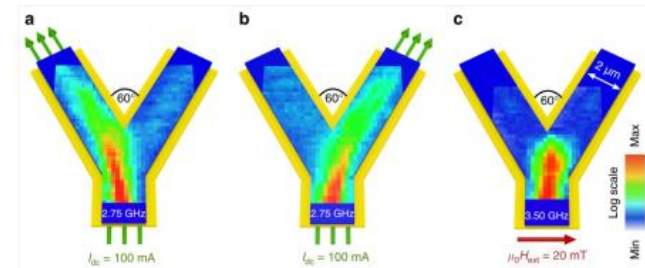
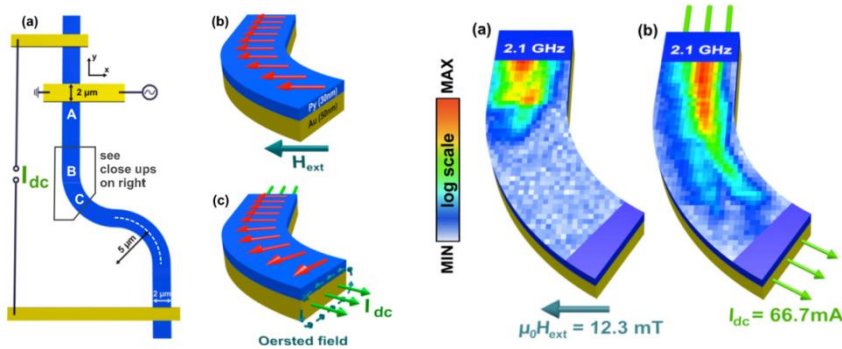
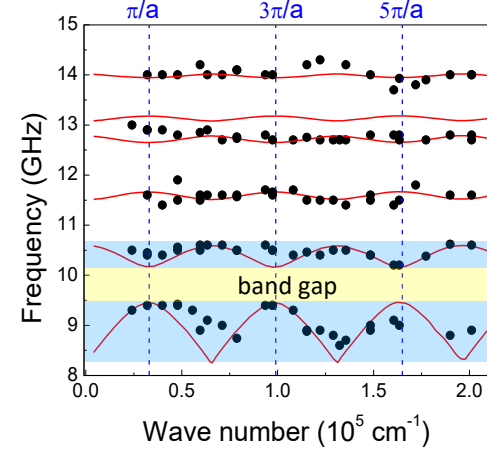
La dispersione delle onde di spin è caratterizzata da **bande magnoniche**, cioè regioni dello spettro in cui le onde di spin si possono propagare, separate **band gap magnoniche**, regioni dello spettro in cui la propagazione delle onde di spin è proibita.

**Magnonica:** studio della propagazione di onde di spin (cristalli magnonici)

Matrici di antidot



Matrici di dot



# Dzyaloshinskii–Moriya interaction (DMI): Interazione di scambio anti-simmetrica

## Metrology for topological spin structures

Short Name: TOPS, Project Number: 17FUN08



PARTICIPATING EURAMET NMIS AND DIS

INRIM (Italy)

NPL (United Kingdom)

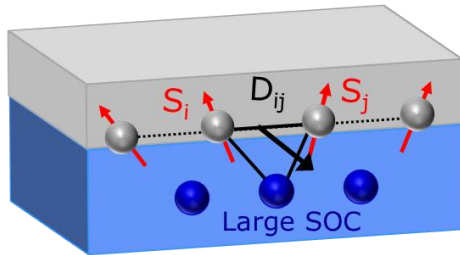
PTB (Germany)

OTHER PARTICIPANTS

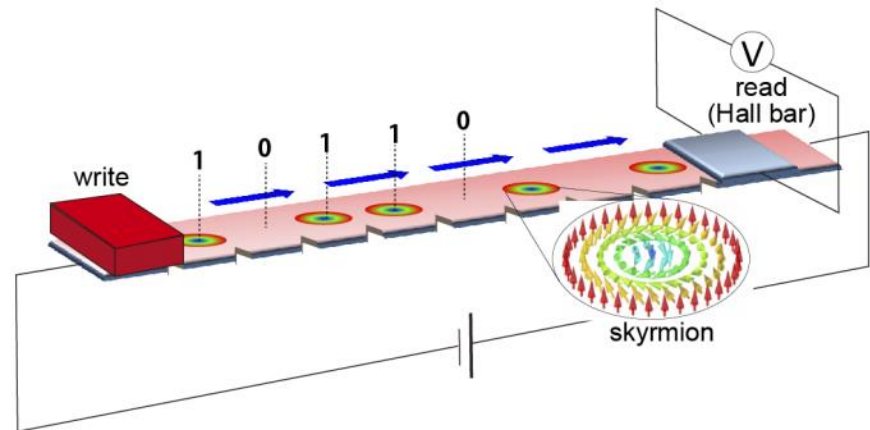
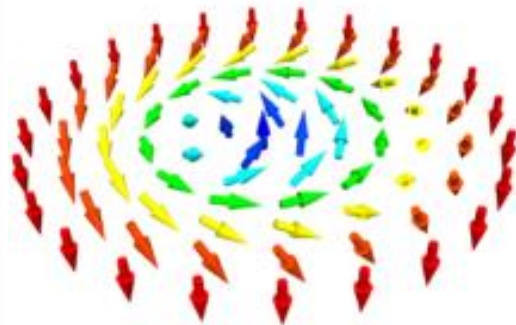
Singulus Technologies AG (Germany)

Technische Universität München (Germany)

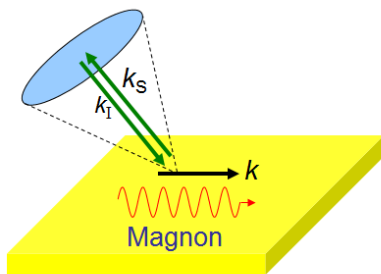
Università degli Studi di Perugia (Italy)  
University of Leeds (United Kingdom)



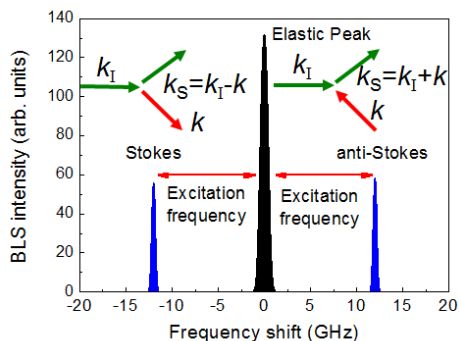
## Magnetic skyrmions







(inelastic scattering of photons by spin waves "magnons")



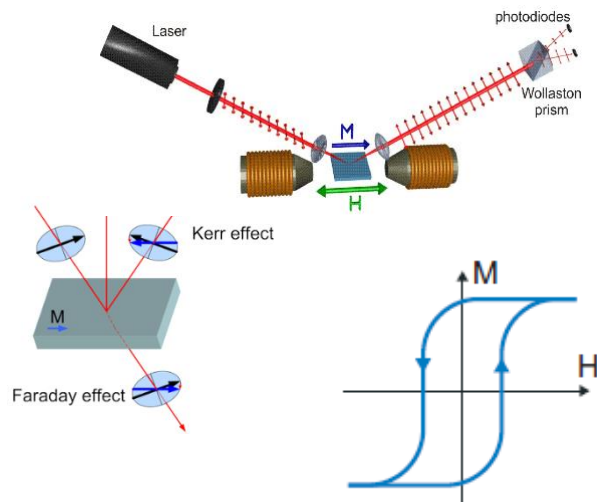
Brillouin Light Scattering (BLS)



BLS-microscopy

Micromagnetic simulations:  
**OOMMF**  
**Mumax3 (GPUs, Nvidia CUDA®)**

### Magneto-Optic Kerr Effect (MOKE)

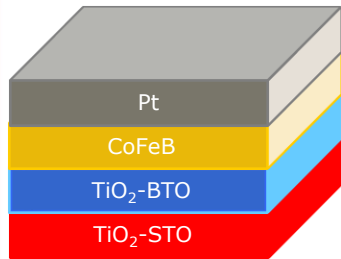


**Perpendicular Magnetic Anisotropy and Dzyaloshinskii-Moriya Interaction at an Oxide/Ferromagnetic Metal Interface**

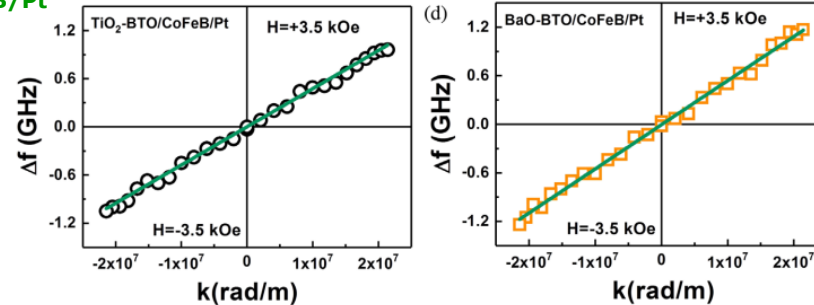
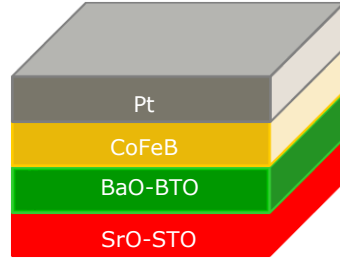
Weinan Lin,<sup>1,\*</sup> Baishun Yang,<sup>2,\*</sup> Andy Paul Chen,<sup>3</sup> Xiaohan Wu,<sup>1</sup> Rui Guo,<sup>1</sup> Shaohai Chen,<sup>1</sup> Liang Liu,<sup>1</sup> Qidong Xie,<sup>1</sup> Xinyu Shu,<sup>1</sup> Yajuan Hui,<sup>1</sup> Gan Moog Chow,<sup>1</sup> Yuanping Feng,<sup>3,4</sup> Giovanni Carlotti,<sup>5</sup> Silvia Tacchi,<sup>6,†</sup> Hongxin Yang,<sup>2,‡</sup> and Jingsheng Chen<sup>1,3,§</sup>

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PERUGIA

**TiO<sub>2</sub>-STO/TiO<sub>2</sub>-BTO/CoFeB/Pt**

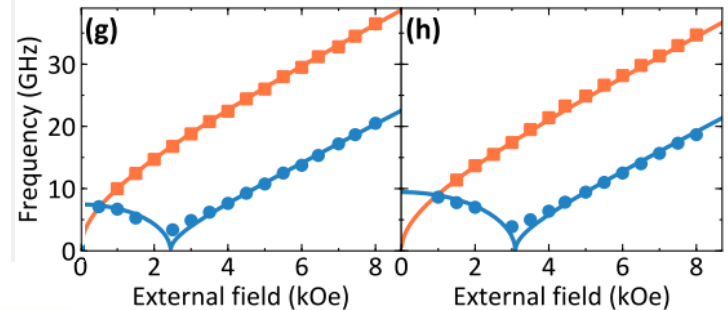


**SrO-STO/BaO-BTO/CoFeB/Pt**



**Nonreciprocal spin-wave dynamics in Pt/Co/W/Co/Pt multilayers**

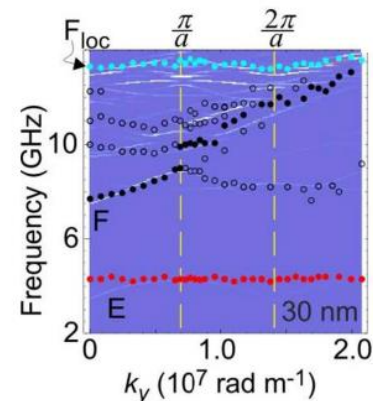
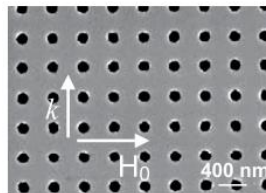
Krzysztof Szulc,<sup>1,\*</sup> Simon Mendisch,<sup>2</sup> Michał Mruczkiewicz,<sup>3,4</sup> Francesca Casoli,<sup>5</sup> Markus Becherer,<sup>2</sup> and Gianluca Gubbiotti<sup>6</sup>



**OPEN** **Universal dependence of the spin wave band structure on the geometrical characteristics of two-dimensional magnonic crystals**

Received: 21 January 2015  
Accepted: 08 April 2015  
Published: 27 May 2015

S. Tacchi<sup>1</sup>, P. Gruszecki<sup>2</sup>, M. Madami<sup>3</sup>, G. Carlotti<sup>3</sup>, J. W. Klos<sup>2</sup>, M. Krawczyk<sup>4</sup>, A. Adeyeye<sup>4</sup> & G. Gubbiotti<sup>1</sup>



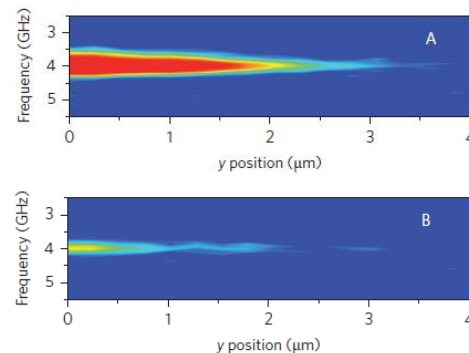
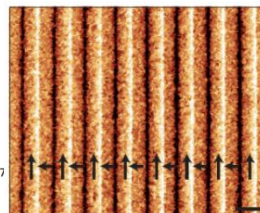
nature  
nanotechnology

ARTICLES

PUBLISHED ONLINE: 7 MARCH 2016 | DOI: 10.1038/NNANO.2016.25

**Nanopatterning reconfigurable magnetic landscapes via thermally assisted scanning probe lithography**

E. Albisetti<sup>1,2\*</sup>, D. Petti<sup>1</sup>, M. Pancaldi<sup>3</sup>, M. Madami<sup>4</sup>, S. Tacchi<sup>5</sup>, J. Curtis<sup>2</sup>, W. P. King<sup>6</sup>, A. Papp<sup>7</sup>, G. Csaba<sup>7</sup>, W. Porod<sup>7</sup>, P. Vavassori<sup>3,8</sup>, E. Riedo<sup>2,9\*</sup> and R. Bertacco<sup>1,10\*</sup>

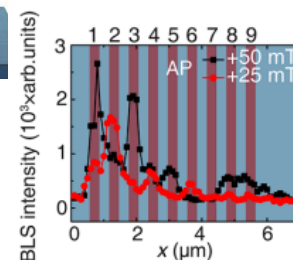
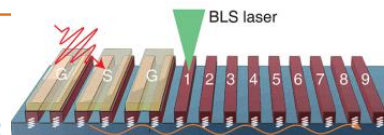


ACS  
NANO

www.acsnano.org

**Tunable Damping in Magnetic Nanowires Induced by Chiral Pumping of Spin Waves**

Hanchen Wang,<sup>#</sup> Marco Madami,<sup>\*#</sup> Jilei Chen,<sup>#</sup> Lutong Sheng, Mingkun Zhao, Yu Zhang, Wenqing He, Chenyang Guo, Hao Jia, Song Liu, Qiuming Song, Xiufeng Han, Dapeng Yu, Gianluca Gubbiotti,<sup>\*</sup> and Haiming Yu<sup>\*</sup>

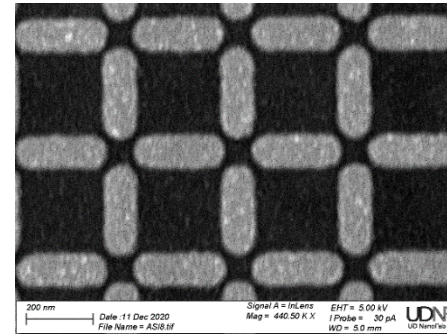
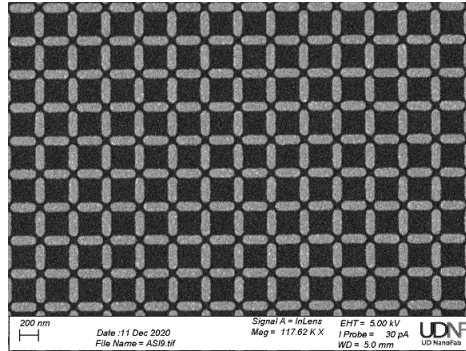


## Programma del Corso di NANOMAGNETISMO E SPINTRONICA

Docente: Dott. Gianluca Gubbiotti (CNR-IOM)

- 1) Introduzione al corso. Definizione di scale di lunghezza e di tempo rilevanti. Panoramica sulle applicazioni e sugli approcci teorici. Sistemi di unità di misura. **Richiami sul magnetismo atomico e sull'interazione spin-orbita.** Magnetismo orbitale e di spin. Accoppiamento L-S e J-J. Regole di Hund.
- 2) Teoria classica del Diamagnetismo e Paramagnetismo di atomi isolati. Correzione quantistica. Paramagnetismo di Pauli e diamagnetismo di Landau per gli elettroni liberi. Comportamento ferromagnetico: teoria classica di Weiss, campo molecolare e domini magnetici.
- 3) **Interazione di scambio e sua origine quantistica.** L'atomo di elio. Ferromagnetismo. Hamiltoniana di Heisenberg. Dipendenza della magnetizzazione dalla temperatura. Interazione di scambio tra elettroni liberi. Modello a bande del Ferromagnetismo. Criterio di Stoner. **Onde di spin in regime di scambio.**
- 4) Anisotropia magnetica, Domini magnetici e micromagnetismo, Onde di Spin- Approccio Classico, Suscettività e Risonanza Ferromagnetica, Oscillazioni in ferromagneti anisotropi, Approssimazione Magnetostatica, **Onde di spin in film sottili e multistrati. Regime scambio-dipolare.** Tecniche di caratterizzazione statica e dinamica, **Onde di spin in sistemi confinati, Cristalli Magnonici, Manipolazione di Onde di Spin, Magnonica,** Eccitazione di onde di spin mediante microstrisce, antenne coplanari, effetto spin-torque o effetto spin-Hall.
- 5) Teoria quantistica della conduzione elettrica, moto degli elettroni e fenomeni di trasporto. Equazione di Boltzmann e tempo di rilassamento Equazione di diffusione. Scattering nelle bande. Correnti spin-polarizzate e conduzione elettrica. Modello delle due correnti. Scattering dipendente dallo spin. Accumulazione di spin. **Accoppiamento di scambio tra strati e magnetoresistenza gigante. Magnetoresistenza ad effetto tunnel e sue applicazioni. Valvole di spin e memorie magnetiche. Effetto spin-Hall. Dispositivi spintronici.**

# Studio della propagazione di onde di spin in vetri di spin artificiali



Misura della struttura a bande in cristalli magnonici 2D. Comprensione dei fattori (geometria, disposizione) che determinano la formazione delle band gap matrici ordinate di elementi magnetici.

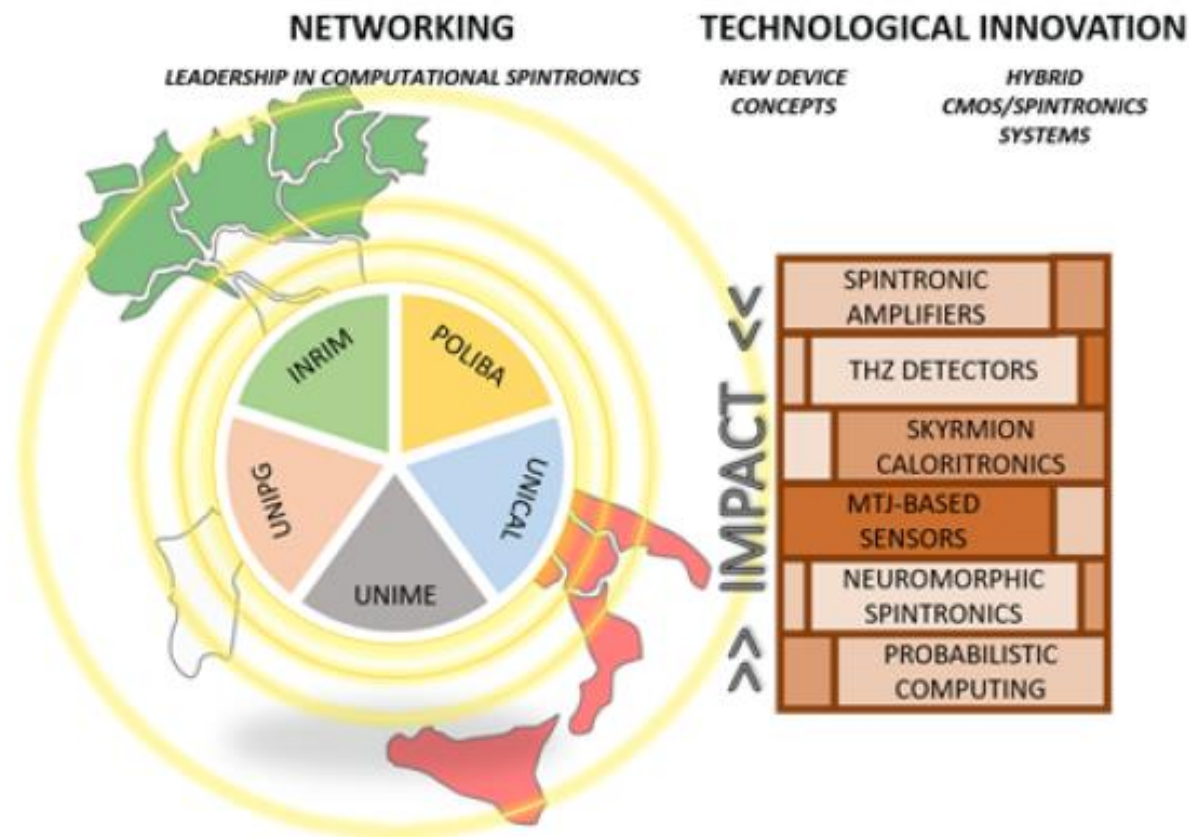
## Collaborazioni

Department of Physics and Astronomy, University of Delaware (USA), Università di Ferrara

**Sperimentale (BLS) – Simulazioni (micromagnetismo)**

# Progetti in corso

The Italian factory of micromagnetic modeling and spintronics



# Progetti in corso

M&MEMS. Magnonics meets micro-electro-mechanical systems: a new paradigm for communication technology and radio-frequency signal processing

