



INSTITUT NANOSCIENCES  
ET CRYOGÉNIE

la recherche, ressource fondamentale  
*research - a fundamental resource*

[inac.cea.fr](http://inac.cea.fr)

mem / mdn

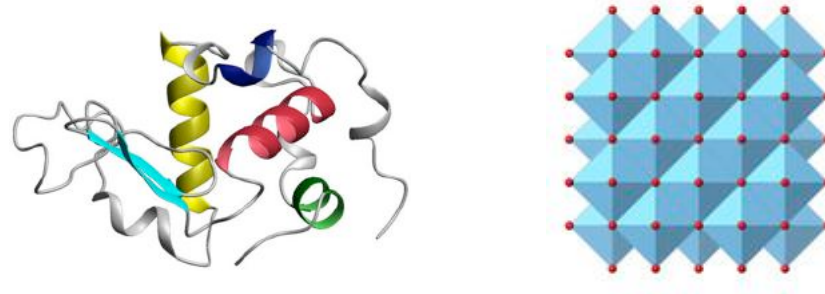
## Matière dure : Revue

S. Raymond

## Différence entre matière molle et matière dure ?

Réponse à une contrainte ; Principe organisationnel ; ...

Auto-organisation mésoscopique vs organisation microscopique (réseau cristallin)



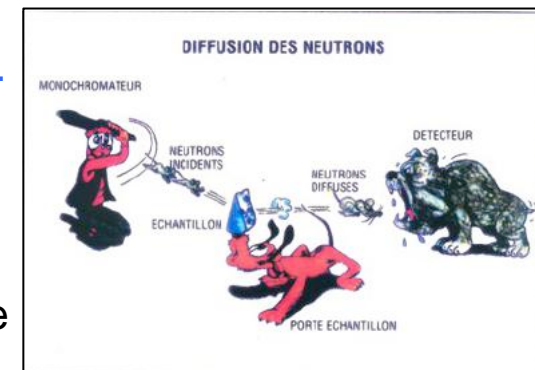
## Cadre commun

Des méthodes pour traiter un grand nombre de particules en interaction : Thermodynamique, physique statistique, transition de phases, élasticité, topologie, défauts ....

Des emprunts : liquide de spin, phase nématique électronique, ....

## Méthodes expérimentales de diffusion de particules :

Structures, fonctions de corrélation, réponse dynamique



- **Matériaux massifs** (monocristallin ou poudre)
- **Essentiellement fondamental** :
  - Connaissance de base  
en lien avec des concepts théoriques innovants
  - En amont des applications  
détermination de mécanismes en relation avec une propriété.

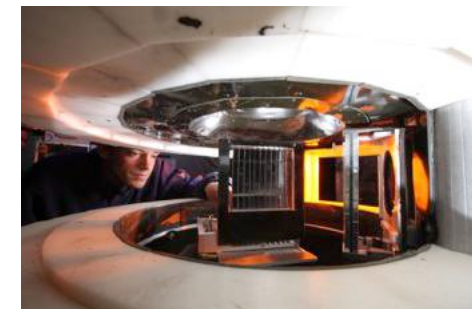
- Concerne les instruments **CRG-ILL** et **LLB** en :

Diffraction :

- poudre : **D1B**, **G4.1**, **3T2**, **G4.4**, **G6.1**
- monocristal : **D23**, **5C1**, **5C2**, **6T2**

Spectroscopie :

- Trois-axes : **IN12**, **IN22**, **4F1**, **4F2**, **1T**, **2T**
- Temps de vol : **IN6**



## Connaissances fondamentales

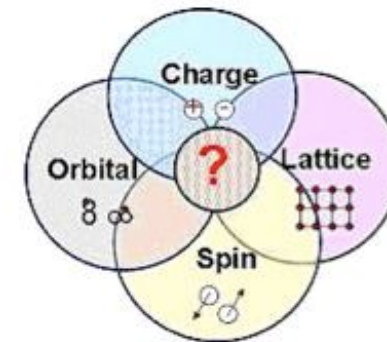
- Nouveaux états électroniques de la matière
- Systèmes modèles de spin

## Matériaux fonctionnels

- Matériaux pour le stockage de l'information
- Matériaux pour l'énergie

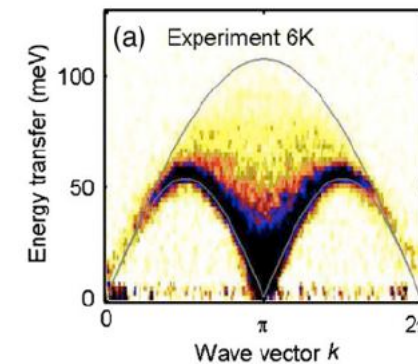
## Des Ingrédients

- Compétition énergie cinétique et interactions Coulombienne entre degrés de liberté
- géométrie : chaines, plans, triangles, nids d'abeille .....
- spins quantiques ( $S=1/2$ ,  $S=1$ )



## Des Effets

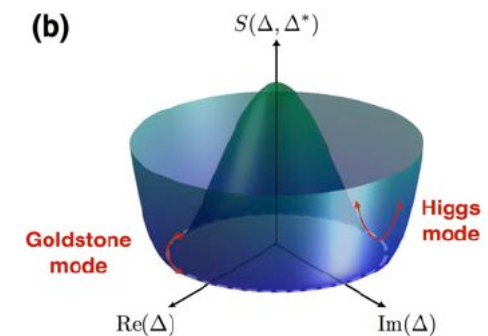
- Nouveaux états fondamentaux
- Spectres d'excitations élémentaires exotiques



## Des Explications

Concepts théoriques

boson de Higgs, fermion de Majorana,  
phase de Coulomb.....

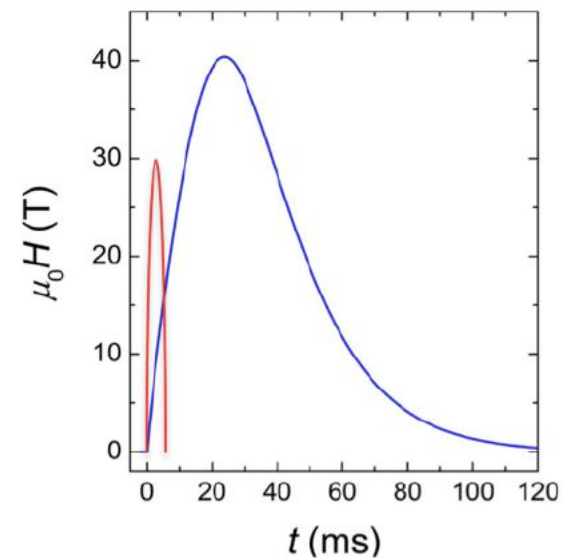
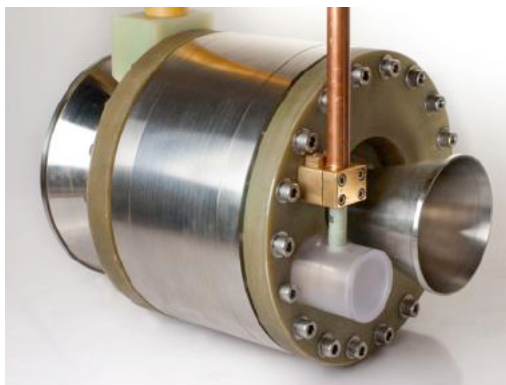


# Nouveaux états électroniques de la matière

---

Les développements instrumentaux poussent la connaissance !

Champ pulsé 40 T sur [IN22](#) (ANR LNCMI-Toulouse, INAC, ILL)



# Nouveaux états électroniques de la matière



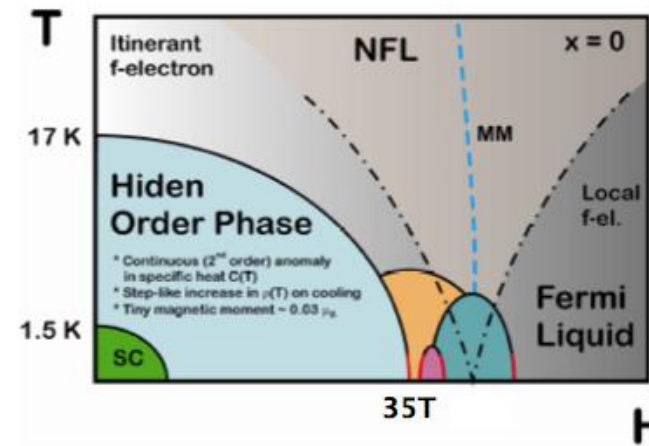
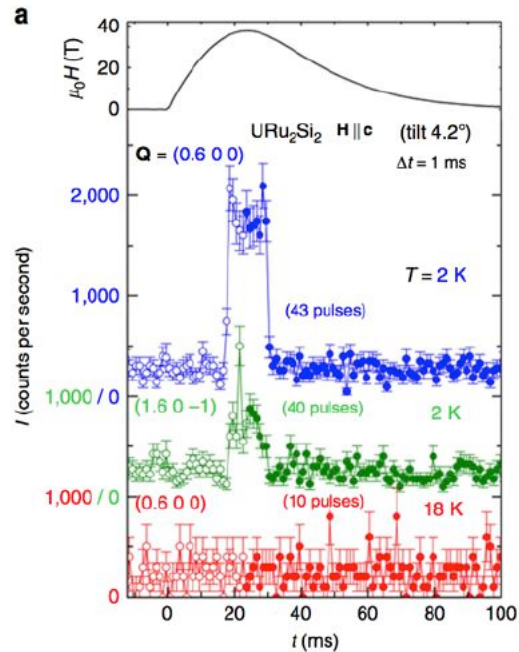
## ARTICLE

Received 25 Mar 2016 | Accepted 31 Aug 2016 | Published 20 Oct 2016

DOI: 10.1038/ncomms13075 OPEN

## Field-induced spin-density wave beyond hidden order in URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>

W. Knafo<sup>1</sup>, F. Duc<sup>1</sup>, F. Bourdarot<sup>2</sup>, K. Kuwahara<sup>3</sup>, H. Nojiri<sup>4</sup>, D. Aoki<sup>5,6</sup>, J. Billette<sup>1</sup>, P. Frings<sup>1</sup>, X. Tonon<sup>7</sup>, E. Lelièvre-Berna<sup>7</sup>, J. Flouquet<sup>6</sup> & L.-P. Regnault<sup>7</sup>



Mise en évidence entre 35 et 39 T d'une onde de densité de spin dans le composé à ordre caché URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>

$$\mathbf{k} = (0.6, 0, 0)$$

$$0.25 \mu_B / U$$

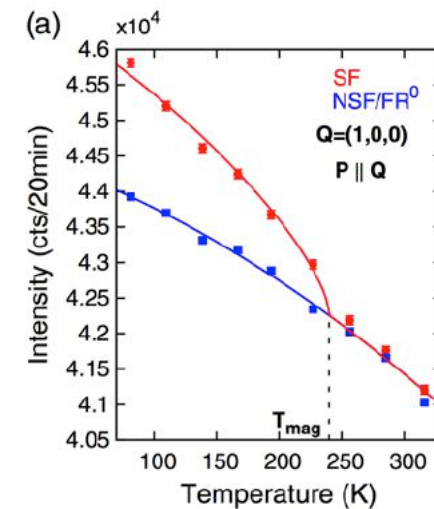
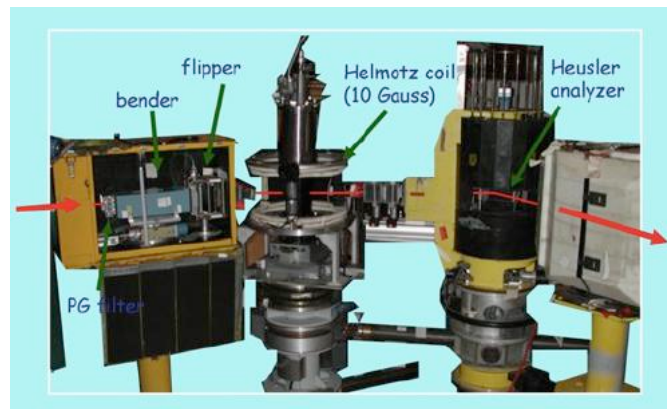
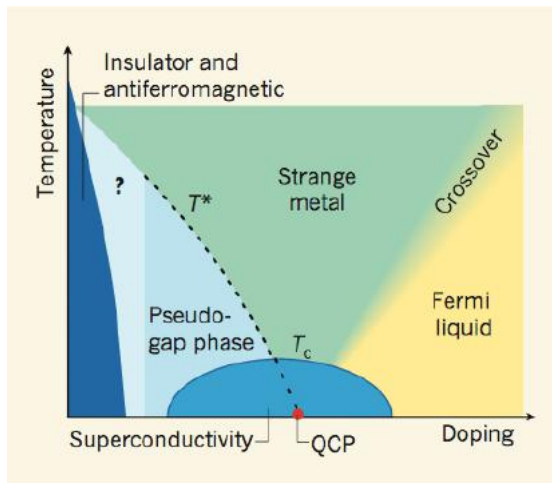
-> Phases en compétition sous H : ordre caché et onde de densité de spin

-> ouvre la voie pour diffraction à 40 T

# Nouveaux états électroniques de la matière

Ordre magnétique à  $q=0$  dans les cuprates supraconducteurs  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$

par diffraction des neutrons polarisés sur 4F1



Signal magnétique associé à la phase pseudogap  $T^*$ .

ANR-Oh-ri-sque NIRVANA (2014), ANR UNESCO (2014) et labex PALM EXELCIUS (2014)



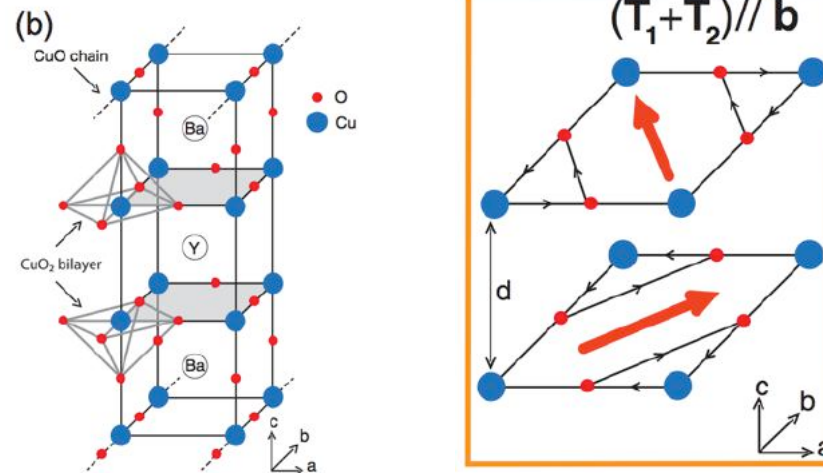
## $a - b$ Anisotropy of the Intra-Unit-Cell Magnetic Order in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$

Lucile Mangin-Thro,<sup>1,\*</sup> Yuan Li,<sup>2,†</sup> Yvan Sidis,<sup>1</sup> and Philippe Bourges<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Léon Brillouin, CEA-CNRS, Université Paris-Saclay, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

<sup>2</sup>Max Planck Institute for Solid State Research, 70569 Stuttgart, Germany

(Received 18 October 2016; published 3 March 2017)



Etude détaillée en fonction de la polarisation et du vecteur d'onde :

Brisure de symétrie miroir entre les bicouches  $\text{CuO}_2 \rightarrow$  Moment toroïdal le long de l'axe  $b$

- preuve supplémentaire en faveur d'une transition de phase à  $T^*$
- affine la description / la compréhension de la phase pseudo-gap

Observation très similaire dans un irridate ( $\text{Sr}_2(\text{Ir,Rh})\text{O}_4$ ) : Nat. Comm. 2017

## Connaissances fondamentales

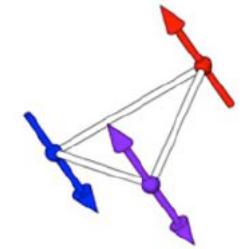
- Nouveaux états électroniques de la matière
- **Systèmes modèles de spin**

## Matériaux fonctionnels

- Matériaux pour le stockage de l'information
- Matériaux pour l'énergie

## Frustration géométrique

- Incompatibilité entre la géométrie du réseau et l'échange magnétique
- Etat fondamental fortement dégénéré (entropie résiduelle)



Exemple : Réseau pyrochlore ferromagnétique dipolaire avec anisotropie locale de type Ising

### Glace de spin (2 in – 2 out)

### Analogie Magnétostatique

Jauge émergente :  $\nabla \cdot B = 0$   
(Phase de Coulomb)

### Excitations élémentaires

Monopôles magnétiques

Fragmentation magnetique : forte densite de monopoles → condensation

Superposition ordre (all in – all out) et phase de Coulomb.

Deux realisations experimentales recentes : LLB+Néel+INAC et Néel+LLB ; ANR jeune rech.

$\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ : balance optimale dipolaire / echange

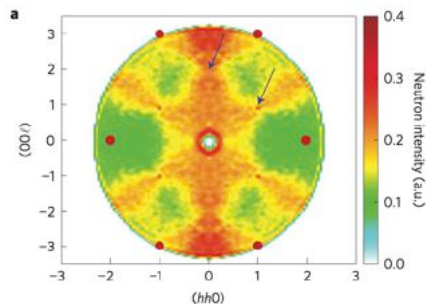
LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 4 APRIL 2016 | DOI: 10.1038/NPHYS3710

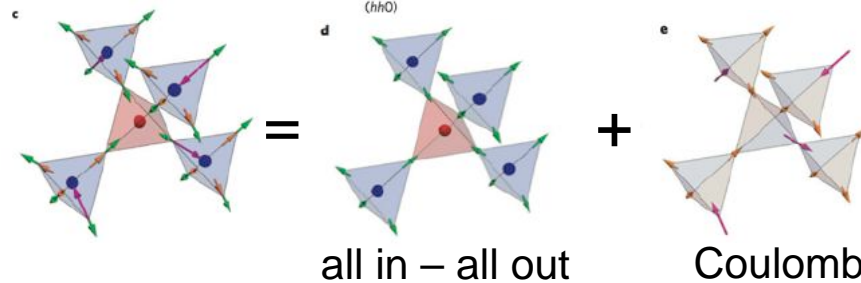
nature  
physics

## Observation of magnetic fragmentation in spin ice

S. Petit<sup>1\*</sup>, E. Lhotel<sup>2\*</sup>, B. Canals<sup>2</sup>, M. Ciomaga Hatnean<sup>3</sup>, J. Ollivier<sup>4</sup>, H. Mutka<sup>4</sup>, E. Ressouche<sup>5</sup>, A. R. Wildes<sup>4</sup>, M. R. Lees<sup>3</sup> and G. Balakrishnan<sup>3</sup>



D23, D7, IN5



$\text{Ho}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  : champ local alterné produit par Ir

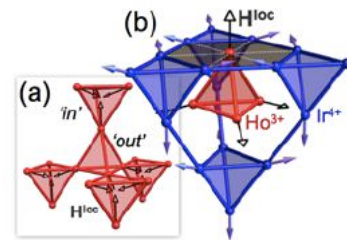
## Magnetic charge injection in spin ice: a new way to fragmentation

E. Lefrançois,<sup>1,2,\*</sup> V. Cathelin,<sup>2</sup> E. Lhotel,<sup>2</sup> J. Robert,<sup>2</sup> P. Lejay,<sup>2</sup> C. V. Colin,<sup>2</sup> B. Canals,<sup>2</sup> F. Damay,<sup>3</sup> J. Ollivier,<sup>1</sup> B. Fåk,<sup>1</sup> L. C. Chapon,<sup>1</sup> R. Ballou,<sup>2</sup> and V. Simonet<sup>2</sup>

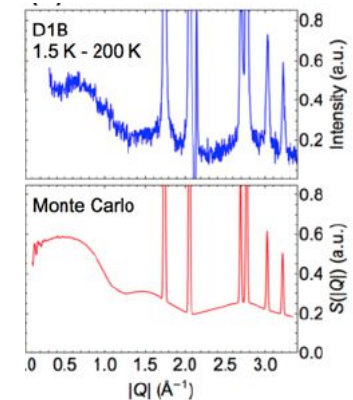
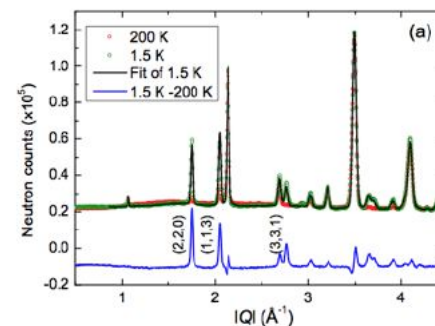
<sup>1</sup>Institut Laue Langevin, CS 20156, 38042 Grenoble, France

<sup>2</sup>Institut Néel, CNRS and Univ. Grenoble Alpes, 38042 Grenoble, France

<sup>3</sup>Laboratoire Léon Brillouin, CEA, CNRS, Univ. Paris-Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France



D1B, G4.1, IN6, IN4



Accepté Nature Comm.

## Connaissances fondamentales

- Nouveaux états électroniques de la matière
- Systèmes modèles de spin

## Matériaux fonctionnels

- Matériaux pour le stockage de l'information
- Matériaux pour l'énergie

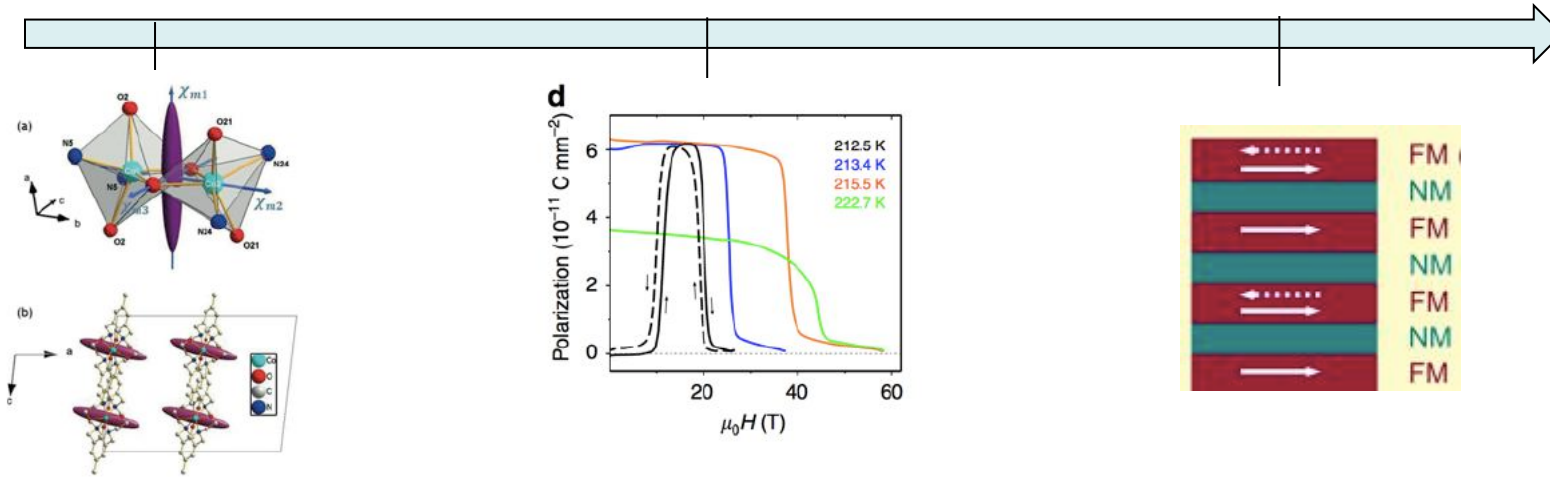
# Matériaux pour le stockage de l'information

De l'objet unique au dispositif ..... la diffusion des neutrons sonde le comportement des spin

Magnétisme moléculaire

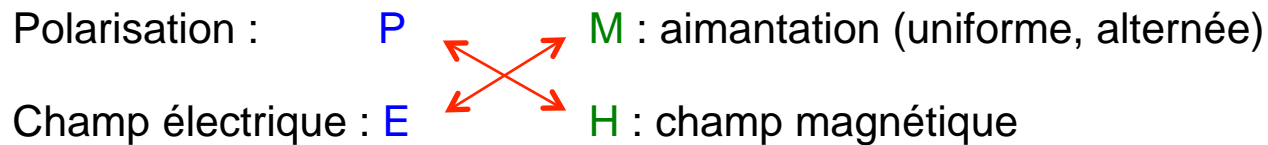
Cristal multiferroïque

Multicouches magnétiques



**Systèmes multiferroïques** : matériaux présentant plusieurs propriétés ferroïques.

Cas particulier : Couplage entre propriétés électriques et magnétiques



Stockage de l'information, capteurs ....

ANR DYMAGE (Institut Néel, LLB, INAC)



ARTICLE

Received 18 May 2015 | Accepted 26 Nov 2015 | Published 18 Jan 2016

DOI: 10.1038/ncomms10255 OPEN

## Magnetoelectric effect and phase transitions in CuO in external magnetic fields

Zhaosheng Wang<sup>1</sup>, Navid Qureshi<sup>2</sup>, Shadi Yasin<sup>1,3</sup>, Alexander Mukhin<sup>4</sup>, Eric Ressouche<sup>5</sup>, Sergei Zherlitsy Yurii Skourski<sup>1</sup>, Julian Geshev<sup>6,7</sup>, Vsevolod Ivanov<sup>4</sup>, Marin Gospodinov<sup>8</sup> & Vassil Skumryev<sup>7,9</sup>

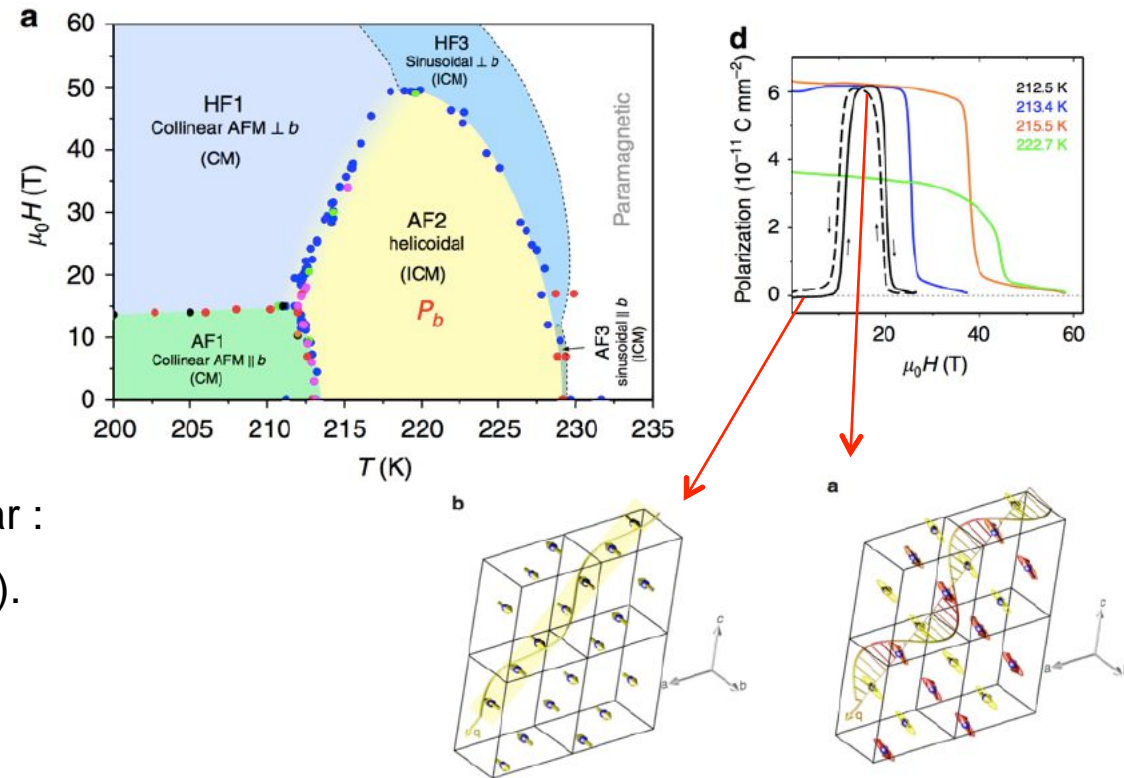
Effets magnétoélectrique étudiés par :

- diffraction des neutrons D23 (12 T).
- mesures macroscopiques (50 T).

A 212 K, transition de paraelectric AF1 à multiferroic AF2 sous champ

Cycloïde AF2 -> shift des oxygènes -> Polarisation électrique

Possibilité d'induire P à bas champ près de la température ambiante dans un matériau « simple »



Collaboration : INAC-ILL-Barcelone

## Connaissances fondamentales

- Nouveaux états électroniques de la matière
- Systèmes modèles de spin

## Matériaux fonctionnels

- Matériaux pour le stockage de l'information
- Matériaux pour l'énergie



## Magnétisme / dynamique de spin

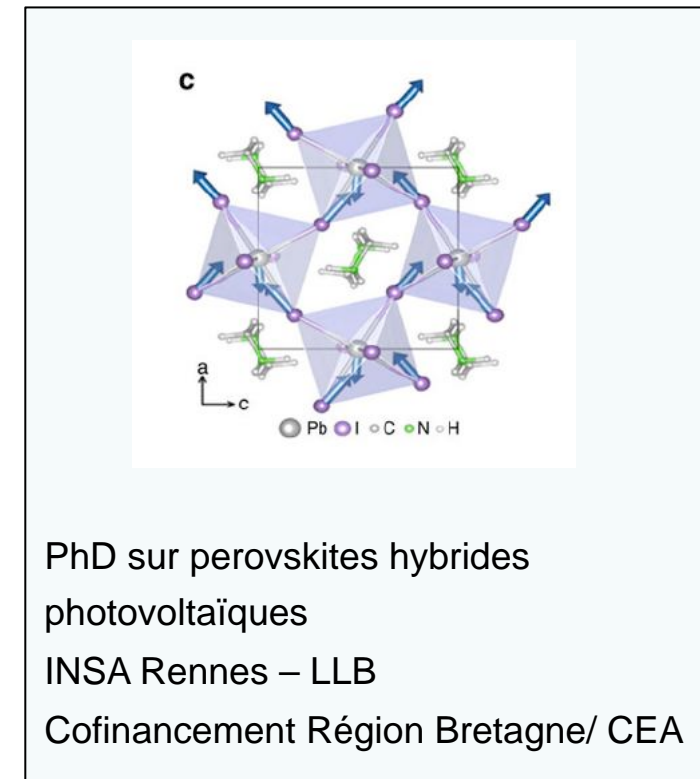
Aimants permanents, composés magnétocaloriques, ..

Supraconducteurs HTC

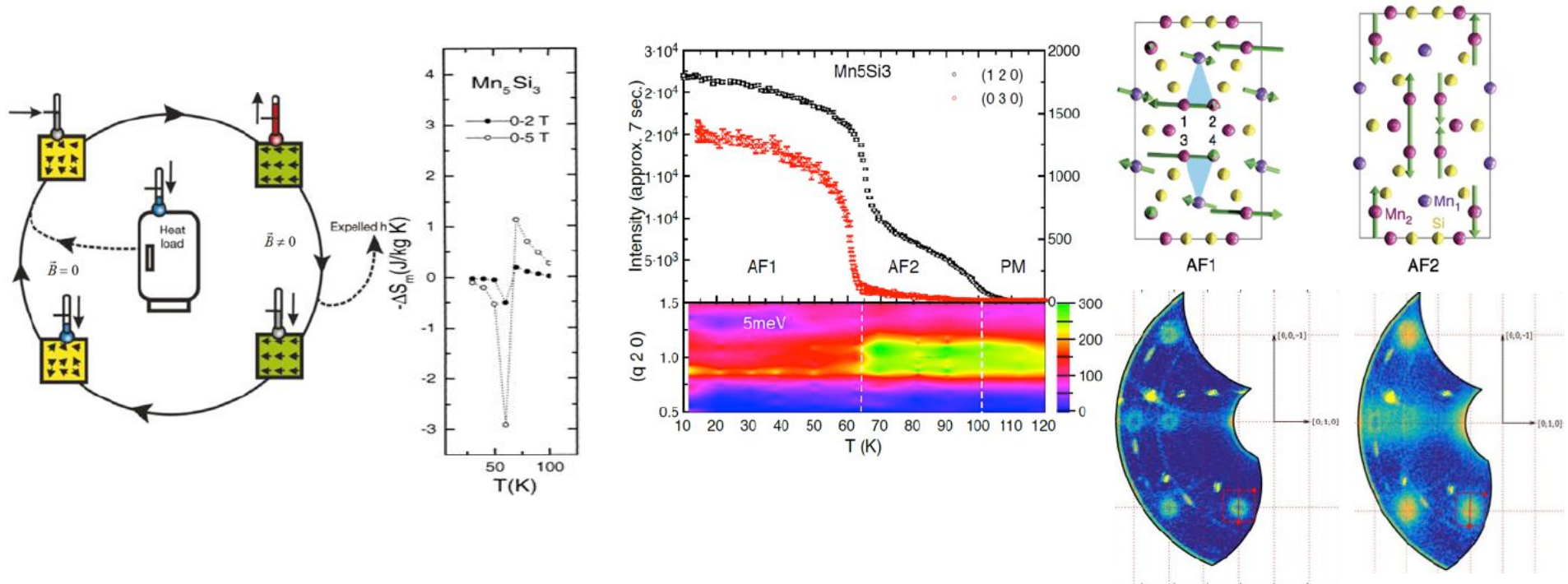
## Structures, microstructures / dynamique de réseau

### Dynamique de réseau

- Thermoélectricité
- Photovoltaïque
- Métallurgie (aciers, cycle du combustible nucléaire,.....)
- Conducteurs ioniques Oxygène, batterie Li, stockage H.



## Fluctuations de spin dans le matériaux magnétocalorique $Mn_{5-x}Fe_xSi_3$



Coexistence entre ondes de spins et fluctuations « diffuses » et dans la phase AF2

Spin « libres » de AF2 permettent de piloler l'entropie magnétique sous champ

Thèse cofinancée JCNS-CEA (INAC)

Expériences : 2T, IN12, THALES-flatcone

## Phonons dans les matériaux thermoélectriques

Production d'électricité par récupération de chaleur :  $\Delta T \rightarrow \Delta V$

Diminuer la conductivité thermique des phonons

Axe de recherche sur matériaux (skutterudites, clathrates,...) couplé au calcul *ab initio*

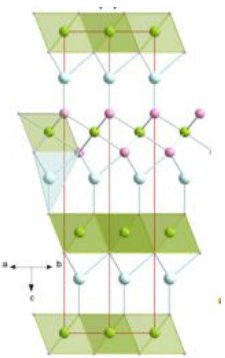


SCIENTIFIC REPORTS

OPEN Localised  $\text{Ag}^+$  vibrations at the origin of ultralow thermal conductivity in layered thermoelectric  $\text{AgCrSe}_2$

Received: 08 October 2015  
Accepted: 07 March 2016  
Published: 22 March 2016

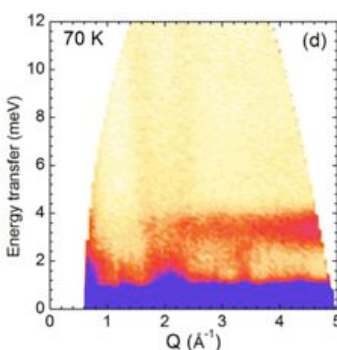
F. Damay<sup>1</sup>, S. Petit<sup>1</sup>, S. Rois<sup>1</sup>, M. Braendlein<sup>1</sup>, R. Daou<sup>1</sup>, E. Elkaim<sup>1</sup>, F. Fauth<sup>1</sup>, F. Gascoin<sup>1</sup>, C. Martin<sup>1</sup> & A. Maignan<sup>1</sup>



- Evidence mode local à basse énergie.

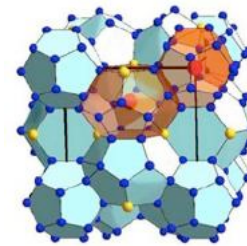
- Influence sur phonons acoustiques à étudier

G4.1, 2T, IN4  
LLB-CRISMAT

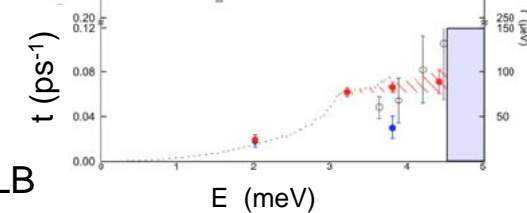


Etude du temps de vie des phonons  
Spin-echo ZETA sur IN22

Clathrate



SIMAP-ILM-INAC-LLB  
Soumis Nat. Comm.

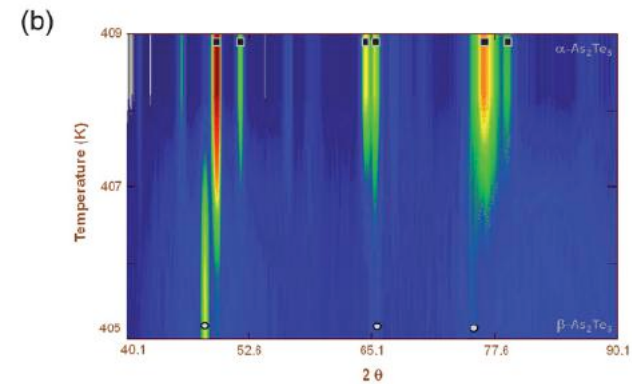


# Ce dont je n'ai pas parlé .....

## Organisation mésoscopique de la matière condensée dure :

- Domaines magnétiques
- Microstructures cristallines
- Systèmes nano-structurés
- « Matière molle dans la matière dure »  
(vortex dans les supraconducteurs , skyrmions)

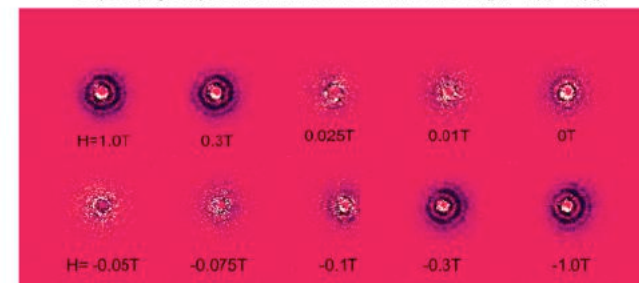
Voir exposé N. Martin



Verres Cu-As-Te

D1B

Co(SCN) @ Papyrus  $\lambda=0.8\text{nm}$   $d=4\text{m}$   $H // k_i // \text{wires}$   $\Delta I(q) = I^+(q) - I^-(q)$



Nanofils de Co par PSANS Papyrus

L' instrumentation neutronique de pointe (champ magnétique, neutrons polarisés, flux...)  
pousse l'innovation scientifique :

- Découverte de nouveaux états de la matière
- Compréhension microscopique et optimisation de mécanismes fonctionnels

Couplage avec chimie du solide, sciences des matériaux, mesures macroscopiques, théorie (concepts et simulation numérique) : les « utilisateurs » !

Collaborations internationales fortes (CRG à l'ILL, ESS...)

Communauté transdisciplinaire avec des liens forts : exemple JDN

Data, remerciements & excuses :

*Biniskos, Bourges, Bourdarot, Colin, Damay, Mangin-Thro, Petit, Ressouche, Simonet, Sidis*