

Electrons f: phases exotiques et ordres mystérieux

Sébastien Burdin, LOMA, Université de Bordeaux

GDR Matériaux et interactions en compétition, Roscoff , Janvier 2013

Réunion plénière 2012-2013



Plan de l'exposé de revue sur les électrons f

Introduction: transitions de phases quantiques

1) Survol de faits expérimentaux marquants

2) La physico-chimie des composés d'électrons f

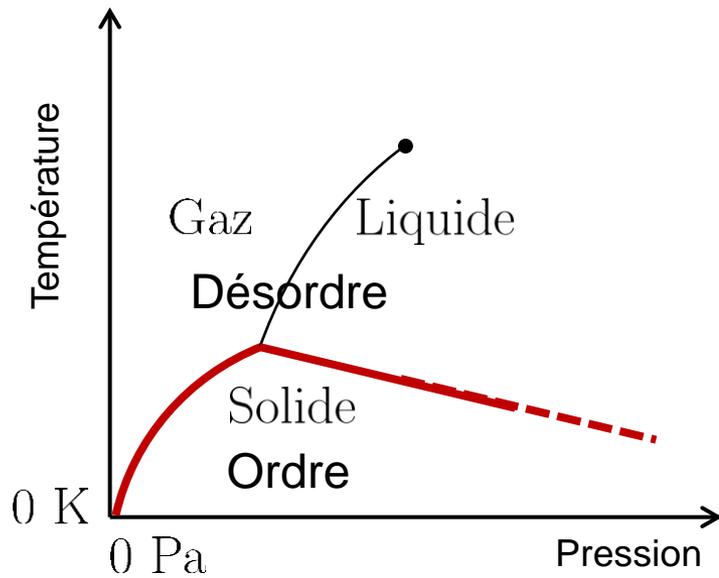
3) Deux concepts théoriques récents

- Alliages Kondo et transition de Lifshitz
- Liquide de spin modulé

Perspectives

Transitions de phase

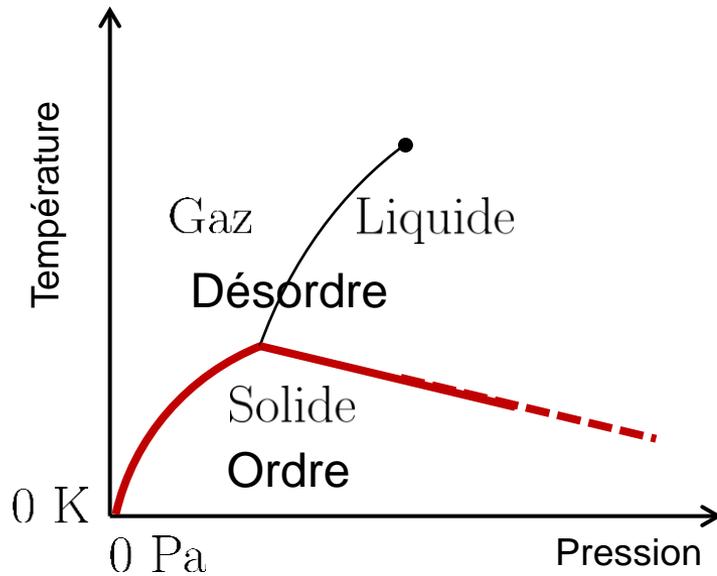
- Exemple classique:
Diagramme de phase de l'eau



La phase ordonnée est déstabilisée
par les **fluctuations thermiques**

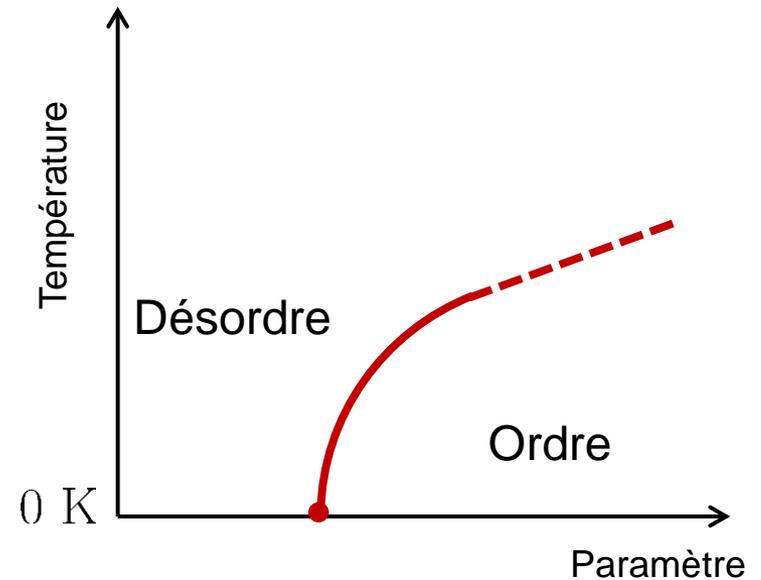
Transitions de phase

- Exemple classique:
Diagramme de phase de l'eau



La phase ordonnée est déstabilisée par les **fluctuations thermiques**

- Transition quantique:
= transition à température nulle



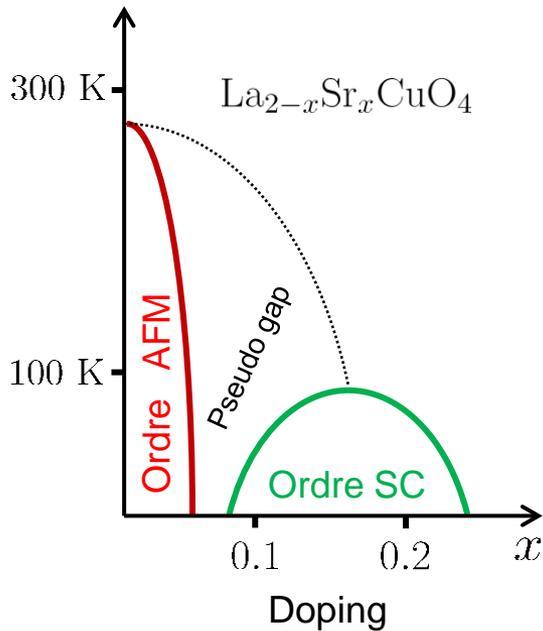
La phase ordonnée est déstabilisée par les **fluctuations quantiques**

1) Survol de faits expérimentaux marquants

- *Matériaux supraconducteurs non conventionnels*

Cuprates à haute T_c

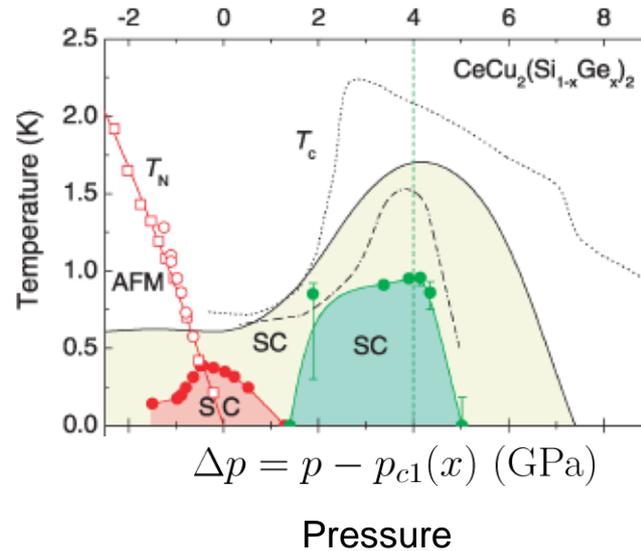
Bednorz, Müller, Nobel'86



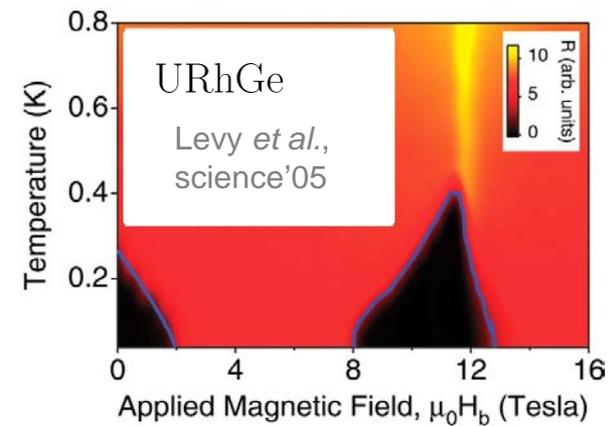
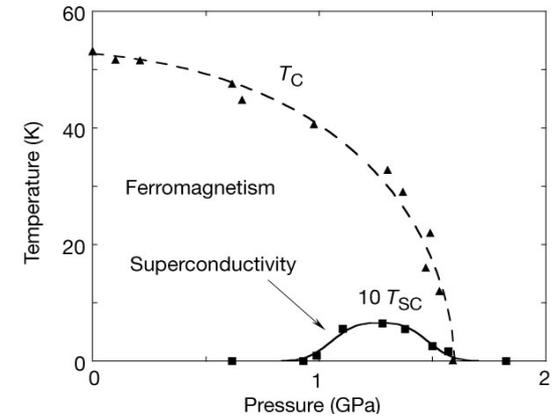
Fermions lourds (terres rares)

CeCu_2Si_2 Steglich *et al.*, PRL'79

Steglich *et al.*, science'03



UGe_2 Saxena *et al.*, Nature'00



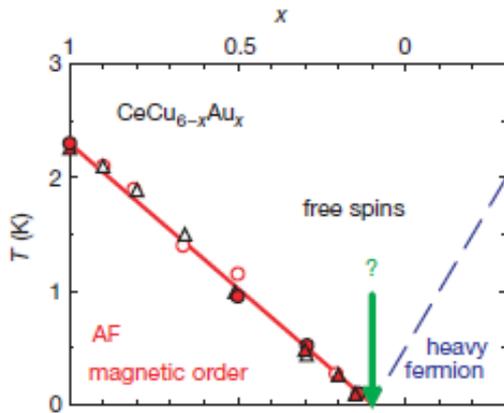
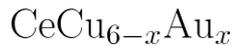
Voir aussi les pnictures, les cobaltates...

1) Survol de faits expérimentaux marquants

- *Violation de la théorie « universelle » des liquides de Fermi*

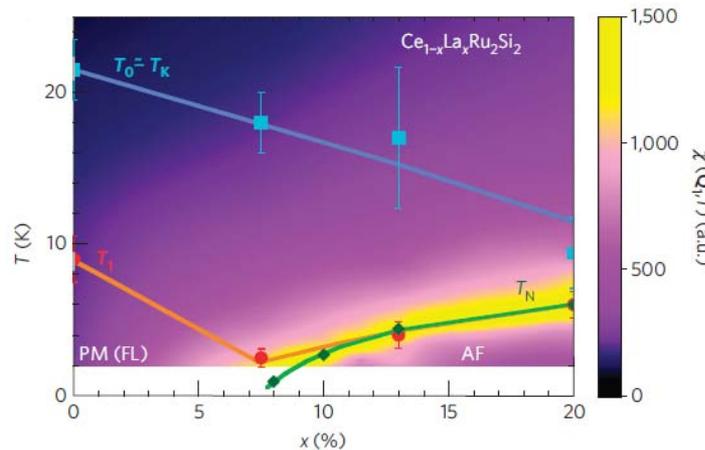
La dépendance en température de propriétés physiques telles que la susceptibilité magnétique ou la résistivité est caractérisée par des exposants « non standards »

Emergence de nouveaux états quantiques?



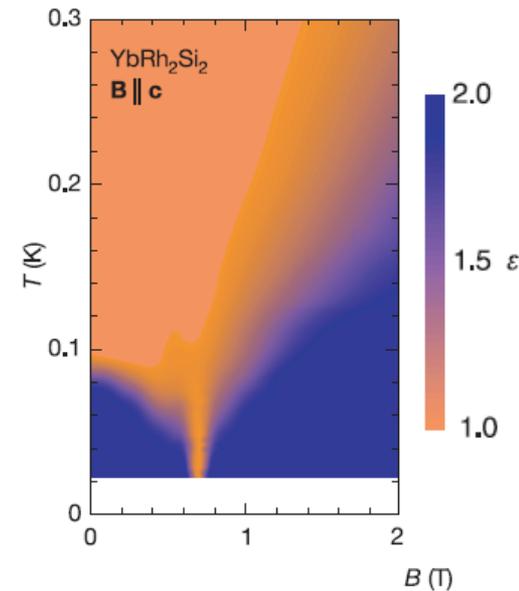
Lohneysen *et al.*, PRL'94

Schroder *et al.*, Nature'00



Kambe *et al.*, JPSJ'96

Knafo *et al.*, Nature Phys.'09



Tovarelli *et al.*, PRL'00

Custers *et al.*, Nature'03

1) Survol de faits expérimentaux marquants

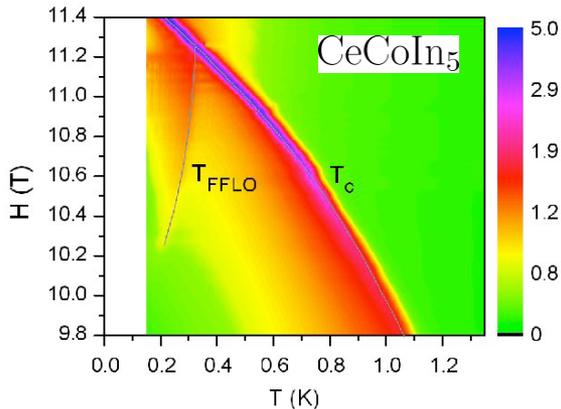
- Composés « 115 » de formule chimique $R\text{TX}_5$
 - ← X=In, Ga
 - ↑ Terre rare R=Ce, U, Np, Pu
 - ↑ Métal de transition T=Co, Rh, Ir

La structure tétragonale des composés 115 les rend fortement anisotropes.
Des propriétés inattendues émergent du caractère quasi-bidimensionnel

Etat supraconducteur FFLO

P. Fulde, R.A. Ferrell, 1964

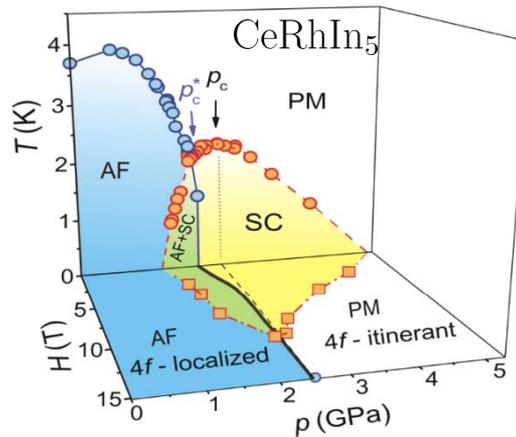
A.I. Larkin, Y.N. Ovchinnikov, 1964



Bianchi *et al.*, PRL'03

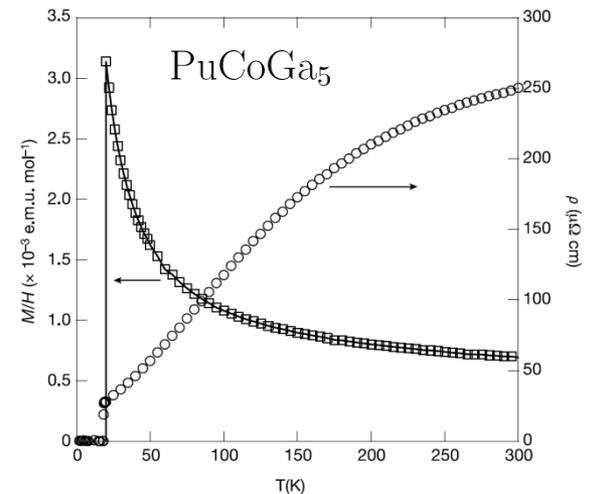
Howald *et al.*, PRL'13

Coexistence Supra et magnétisme



Knebel *et al.*, JPSJ'11

Supraconductivité à « haute » T_c (18K...)



Sarrao *et al.*, Nature'02

L'anisotropie peut être accentuée dans les composés 127 PuPt_2In_7 , CePt_2In_7 , ...

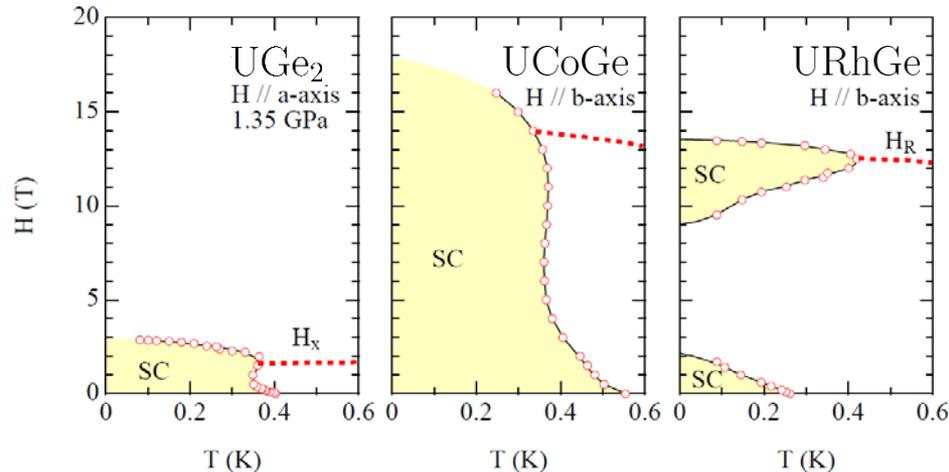
1) Survol de faits expérimentaux marquants

- *Mystérieux composés d'Uranium:*

Supraconductivité triplet et ré-entrance

Aoki *et al.*, JPSJ'11

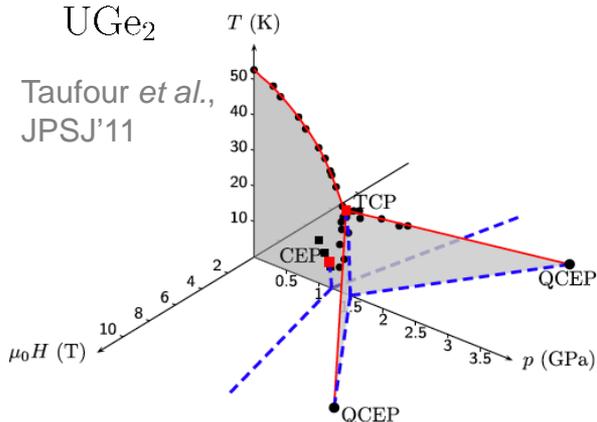
Saxena *et al.*, Nature'00



Métamagnétisme et transition de Lifshitz

UGe₂

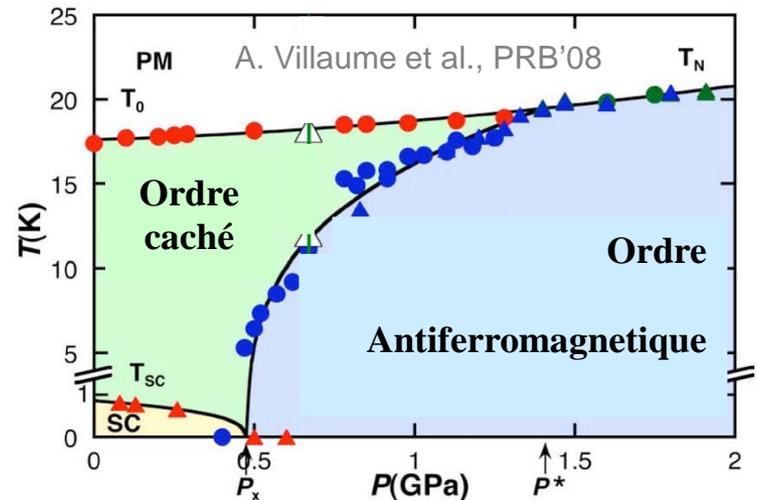
Taufour *et al.*, JPSJ'11



Ordre caché URu₂Si₂

Palstra *et al.*, PRL'85

Mydosh *et al.*, RMP'11



Des mesures récentes de diffusion inélastique de neutrons sous pression suggèrent:

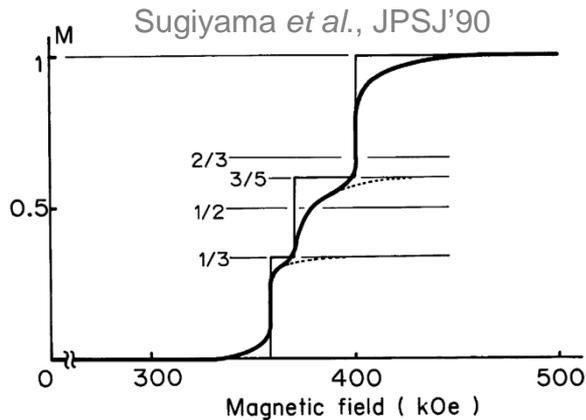
un paramètre d'ordre:

- d'origine magnétique
- brisant la symétrie de réseau
- mais sans formation de moment local...

1) Survol de faits expérimentaux marquants

- *Emergence des effets de la frustration géométrique:*

Ordre caché URu_2Si_2



L'observation de **plateaux d'aimantation** sous champ magnétique révèle la présence de **frustration géométrique**



Théorie du liquide de spin modulé

(présentée dans la suite de cet exposé)

Pépin, Norman, SB, Ferraz PRL'11

Thomas, SB, Pépin, Ferraz PRB'13

Effets de frustration dans d'autres composés d'électrons f



Yb_2Pt_2Pb : **Les plans Yb forment un réseau triangulaire** Ochiai *et al.*, JPSJ'11

Kim *et al.*, PRB'08



Dans ces systèmes, **frustration géométrique et fluctuations de charge** sont présentes:

Yb_2Pd_2Sn : **Compétition entre effet Kondo et frustration**

Bernhard *et al.*, PRB'11

⇒ régime de non-liquide de Fermi observé sous pression

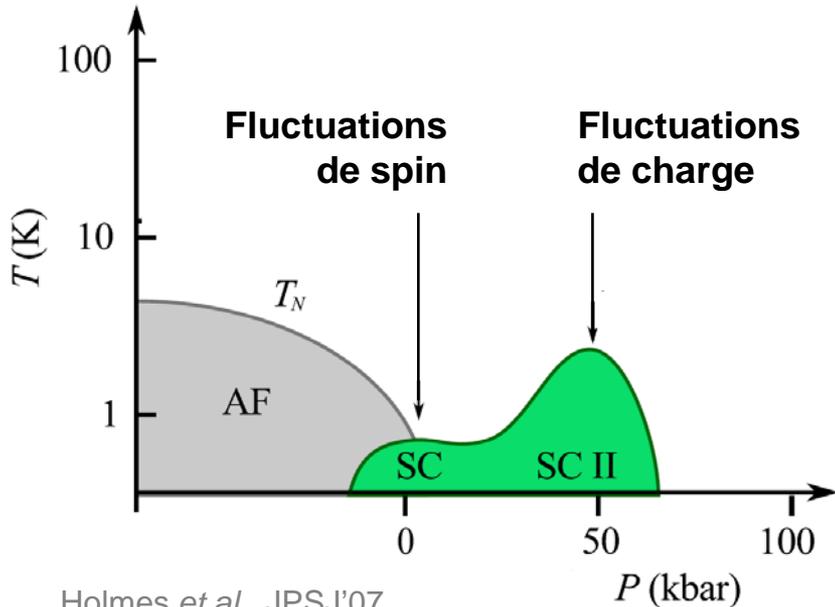
Kikuchi *et al.*, JPSJ'09

1) Survol de faits expérimentaux marquants

- *Fluctuations de valence, criticalité magnétique, et supraconductivité :*

CeCu₂Si₂ Steglich *et al.*, PRL'79

Le diagramme de phase suggère la coexistence de **2 mécanismes pour la supraconductivité**:

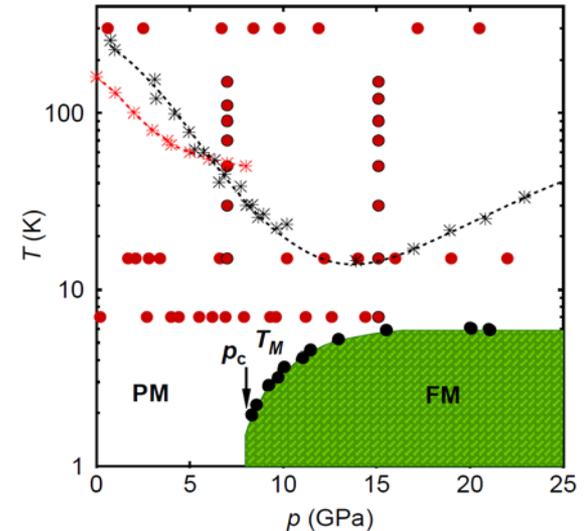


Holmes *et al.*, JPSJ'07

Rueff *et al.*, PRL'11

YbCu₂Si₂

Une instabilité de valence est observée près du point critique quantique magnétique



Fernandez-Panella *et al.*, PRB'12

1) Composés d'électrons f: Survol de faits expérimentaux marquants

- *Matériaux supraconducteurs non conventionnels*
- *Violation de la théorie « universelle » des liquides de Fermi*
- *Composés « 115 » (systèmes très anisotropes)*
 - Etat supraconducteur FFLO
 - Supraconductivité à « haute » T_c (18K)
- *Mystérieux composés d'Uranium:*
 - Supraconductivité triplet et ré-entrance
 - Ordre caché
- *Emergence des effets de la frustration géométrique*
coexistant avec les fluctuations de charge
- *Fluctuations de valence, criticalité magnétique, et supraconductivité*
- *Composés à cage (exemple: $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$)*

2) La physico-chimie des composés d'électrons f

Dans les exemples que nous venons de voir,

les transitions quantiques sont liées aux électrons des orbitales f

dont les couches ne sont pas complètes

Considérons, par exemple, des matériaux cristallins composés d'Uranium

L'exemple des composés d'Uranium

- Les moments magnétiques locaux *proviennent des orbitales électroniques f* :

Un atome U :

Fluctuations $5f^2$ $5f^3$

$S = 1/2$ $L = 3$

Spin-Orbite: $J_{1e^-} = |L - S| = 5/2$

Règle de Hund $J_{2e^-} = 5/2 + 3/2 = 4$ $|+4\rangle \approx \uparrow$

Champ cristallin $J_{2e^-}^z = -4, 0, +4$ $|-4\rangle \approx \downarrow$

- Le gel d'entropie à basse température résulte d'un mécanisme parmi différents en compétition:

Effet Kondo : écran local direct des moments magnétiques par les électrons délocalisés

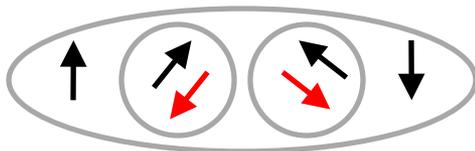


Interaction RKKY : écran non local indirect porté par les électrons délocalisés

Avec ordre magnétique:



Appariement de Cooper



Sans ordre magnétique: **Liquide de Spin**

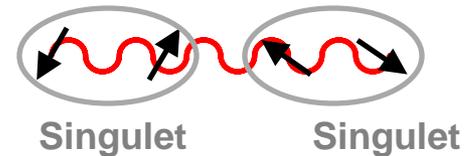


Diagramme de phase général

En lien avec l'argument de Doniach (Physica B&C'77)

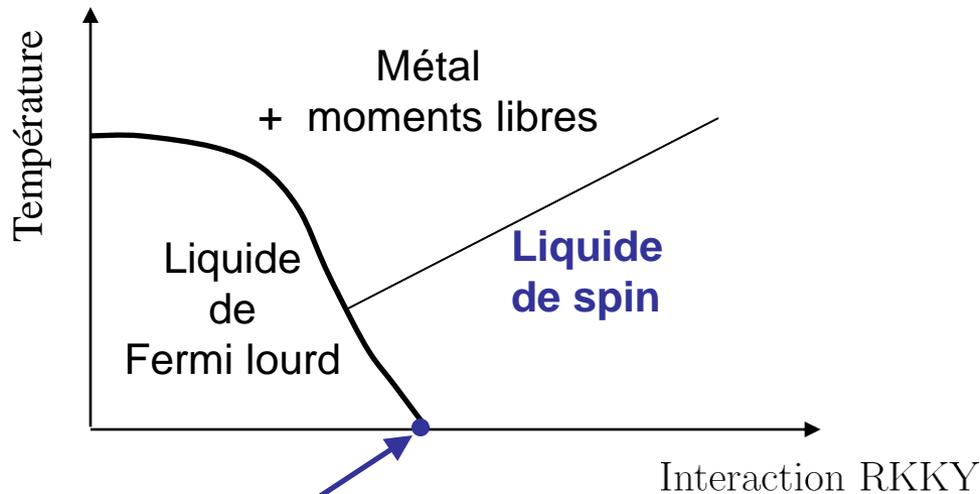
SB, Georges, Grepel PRB'02

SB, Grilli, Grepel PRB'03

Paul, *et al.*, PRL'07

Si, *et al.*, Nature'01

Senthil, *et al.*, PRL'03



Sorte de transition de Mott Quantique

Ajustable avec la pression

Tout d'abord, en négligeant les instabilités magnétiques et supraconductrices...

Diagramme de phase général

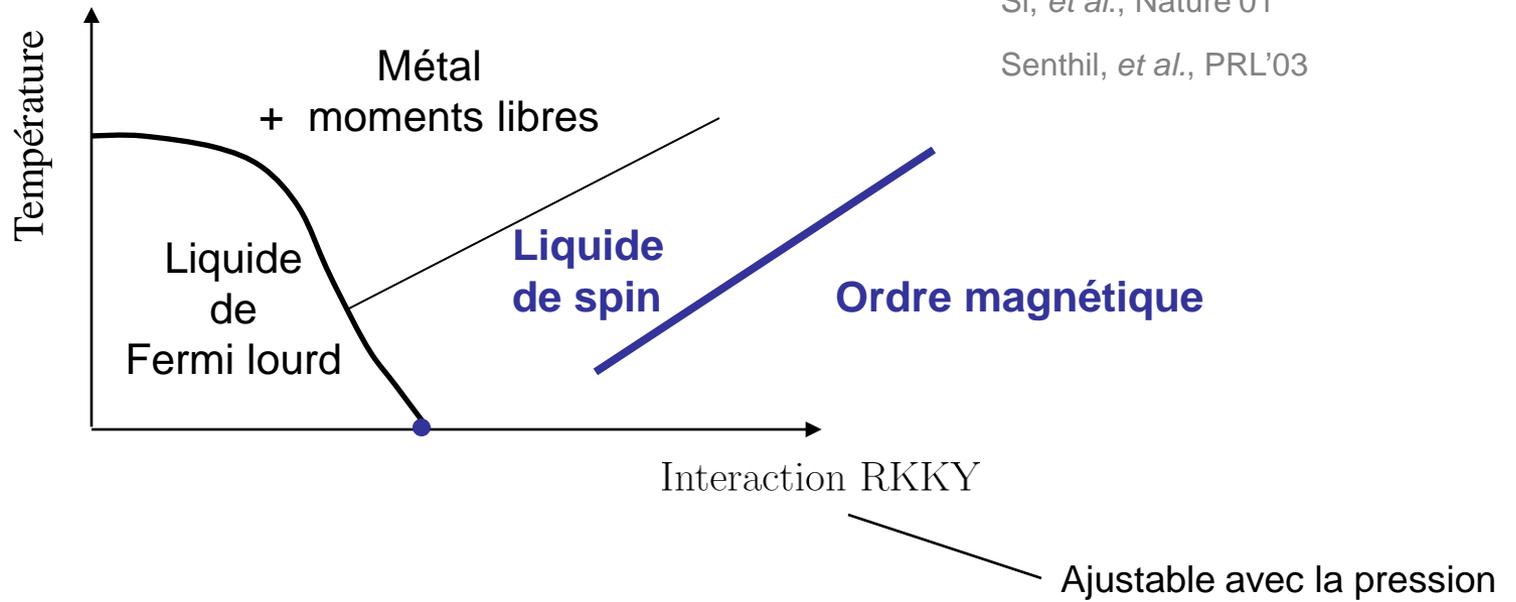
SB, Georges, Grepel PRB'02

SB, Grilli, Grepel PRB'03

Paul, *et al.*, PRL'07

Si, *et al.*, Nature'01

Senthil, *et al.*, PRL'03



+ possibilité d'appariement de Cooper...

Diagramme de phase général

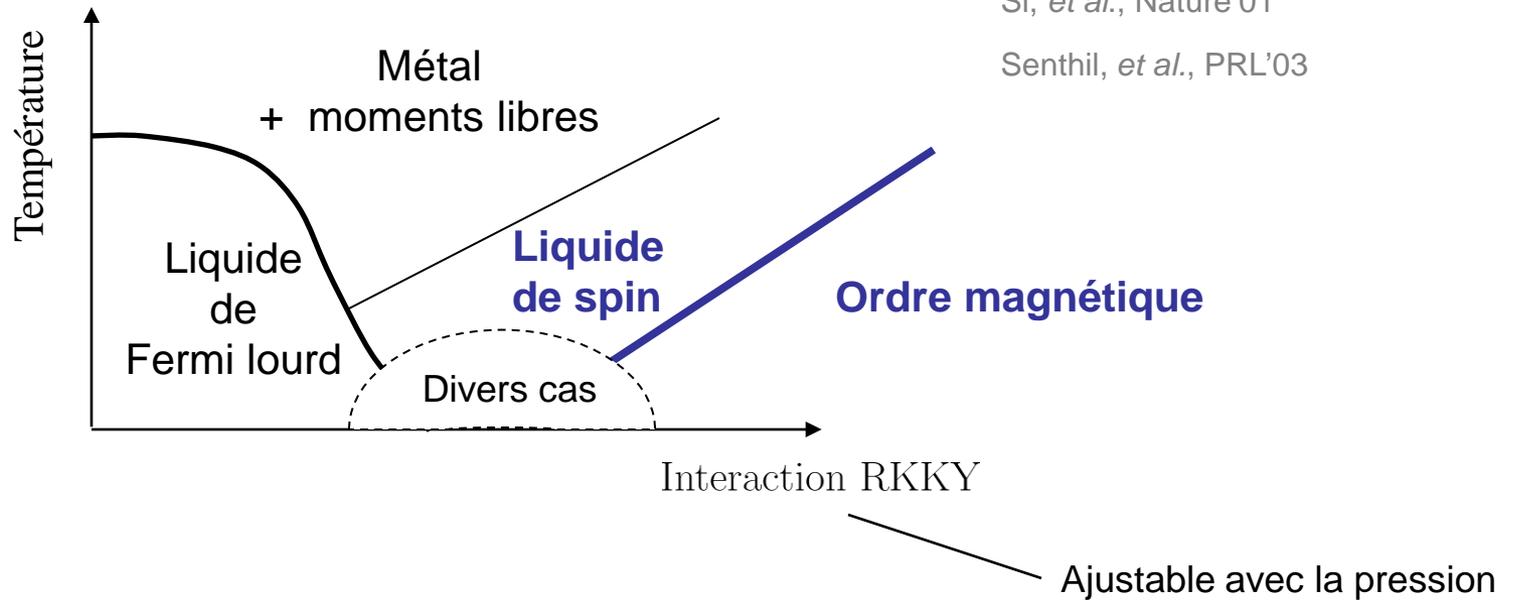
SB, Georges, Grepel PRB'02

SB, Grilli, Grepel PRB'03

Paul, *et al.*, PRL'07

Si, *et al.*, Nature'01

Senthil, *et al.*, PRL'03



+ possibilité d'appariement de Cooper...

Plan de l'exposé

1) Survol de faits expérimentaux marquants

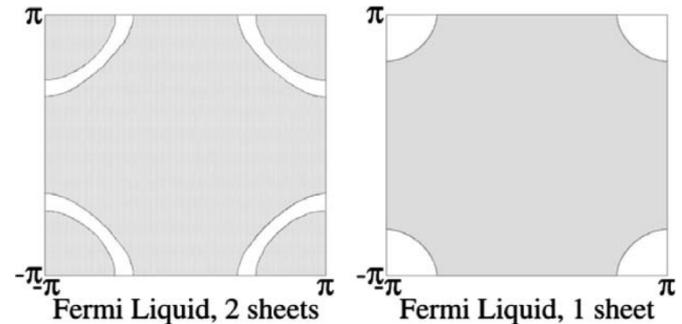
2) La physico-chimie des composés d'électrons f

3) Deux concepts théoriques récents

—————> Alliages Kondo et transition de Lifshitz

Liquide de spin modulé

Perspectives



Echelles d'énergie du réseau Kondo

Système: métal contenant des impuretés magnétiques quantiques (spins $\frac{1}{2}$)

Hamiltonien Kondo: $H = H_{e\text{-cond}} + J_K \sum_i \vec{S}_i \cdot \vec{\sigma}_i$

Electrons de conduction,
densité d'états 'libre' ρ_0

Interaction Kondo antiferromagnétique
entre les impuretés et les électrons

- Deux échelles d'énergie émergent à basse température:

La température de liquide de Fermi T_{LF} caractérisant l'état fondamental

La température de Kondo T_K (*crossover*) caractérisant la formation de singulets locaux

- Lorsque les impuretés quantiques sont très diluées, $T_K = T_{LF}$ (universalité)
- Lorsque les impuretés quantiques sont concentrées :

Problème de l'épuisement: Nozières, Ann. Phys.'85

Que se passe-t-il lorsque le nombre d'électrons de conduction est inférieur au nombre de moments locaux?

Prédiction de Nozières: $T_{LF} \approx \rho_0 T_K^2 \ll T_K$

Nozières, EPJB'98

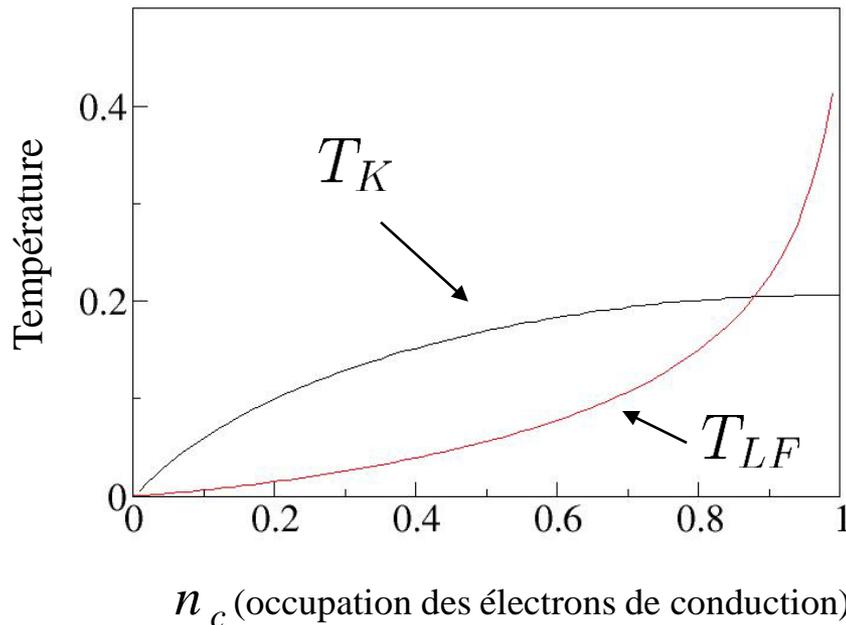
Nozières, JPSJpn'05

Température de liquide de Fermi T_{LF} versus température de Kondo T_K

Résultats analytiques et numériques: réseau Kondo (une impureté Kondo par site)

Solution par l'approximation du champ moyen

- 2 échelles d'énergie T_K et T_{LF}
- T_K/T_{LF} dépend seulement de n_c *Prédiction de Nozières invalidée* ($T_{LF} \approx \rho_0 T_K^2 \ll T_K$)



SB, Gempel, Georges PRL'00

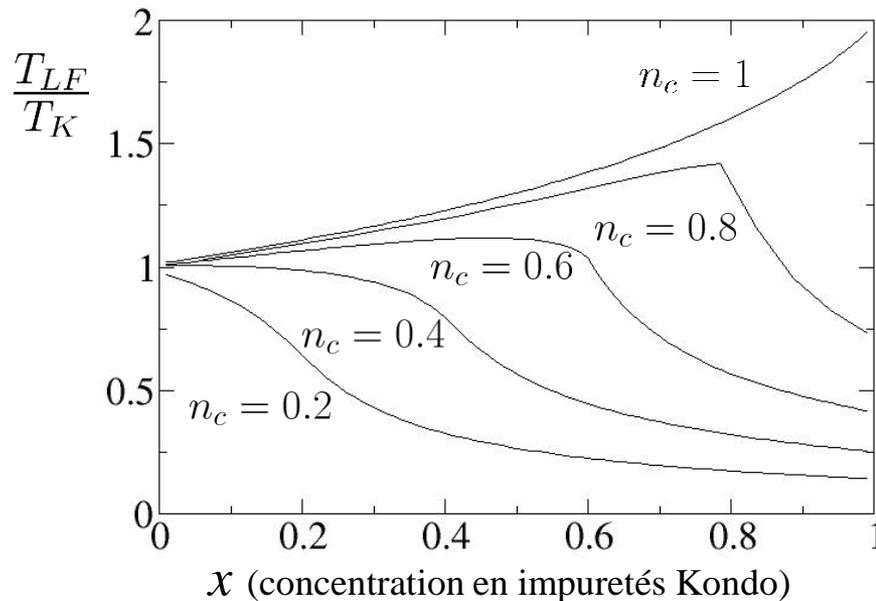
Température de liquide de Fermi T_{LF} versus température de Kondo T_K

Comment le système évolue entre le régime dilué et le régime dense?

Hypothèse: ici on identifie T_{LF} et l'inverse de la susceptibilité magnétique statique $T_{LF} \equiv 1/\chi(T=0)$

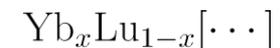
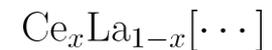
Méthode développée: généralisation matricielle de la DMFT pour des alliages de substitution

SB, Fulde PRB'07



n_c : occupation électronique

Exemples:



Impuretés diluées

$$T_K = T_{LF}$$



Réseau Kondo

$$T_K \neq T_{LF}$$

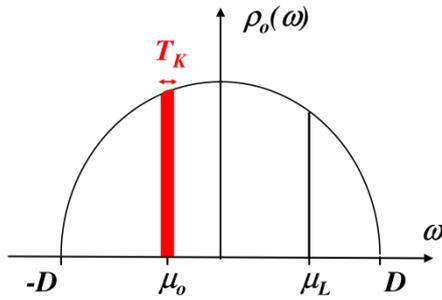
Transition de Lifshitz dans les alliages Kondo

SB, Lacroix '12

Cas d'un réseau périodique d'impuretés Kondo:

Théorème de Luttinger: Nombre de quasiparticules = nombre d'électrons + nombre d'impuretés Kondo

Situation standard



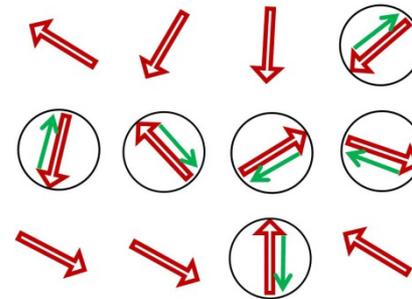
Niveau de Fermi
 n_c électrons de conduction

Niveau de Fermi
 $n_c + 1$ quasiparticules

Interprétation: limite couplage Kondo fort

Lacroix '85

Nozières '85



Les impuretés Kondo capturent tous les électrons pour former des singlets

Les porteurs de charge sont les impuretés non écrantées

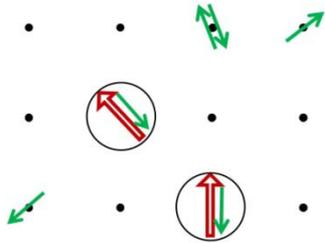
Transition de Lifshitz dans les alliages Kondo

SB, Lacroix '12

Comment le système évolue entre le régime dilué et le régime dense?

On considère un alliage contenant en moyenne par site: x impuretés Kondo localisées
 n_c électrons de conduction

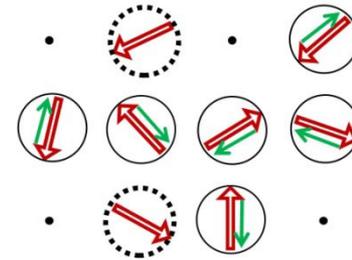
Impuretés diluées $x < n_c$



Les porteurs de charge sont
les électrons non écrantés

$n_c - x$ quasiparticules

Impuretés denses $x > n_c$



Les porteurs de charge sont
les impuretés Kondo non écrantés

Le théorème de Luttinger s'applique
 $\Rightarrow n_c + x$ quasiparticules

Une discontinuité du nombre de quasiparticules est prédite pour $x = n_c$

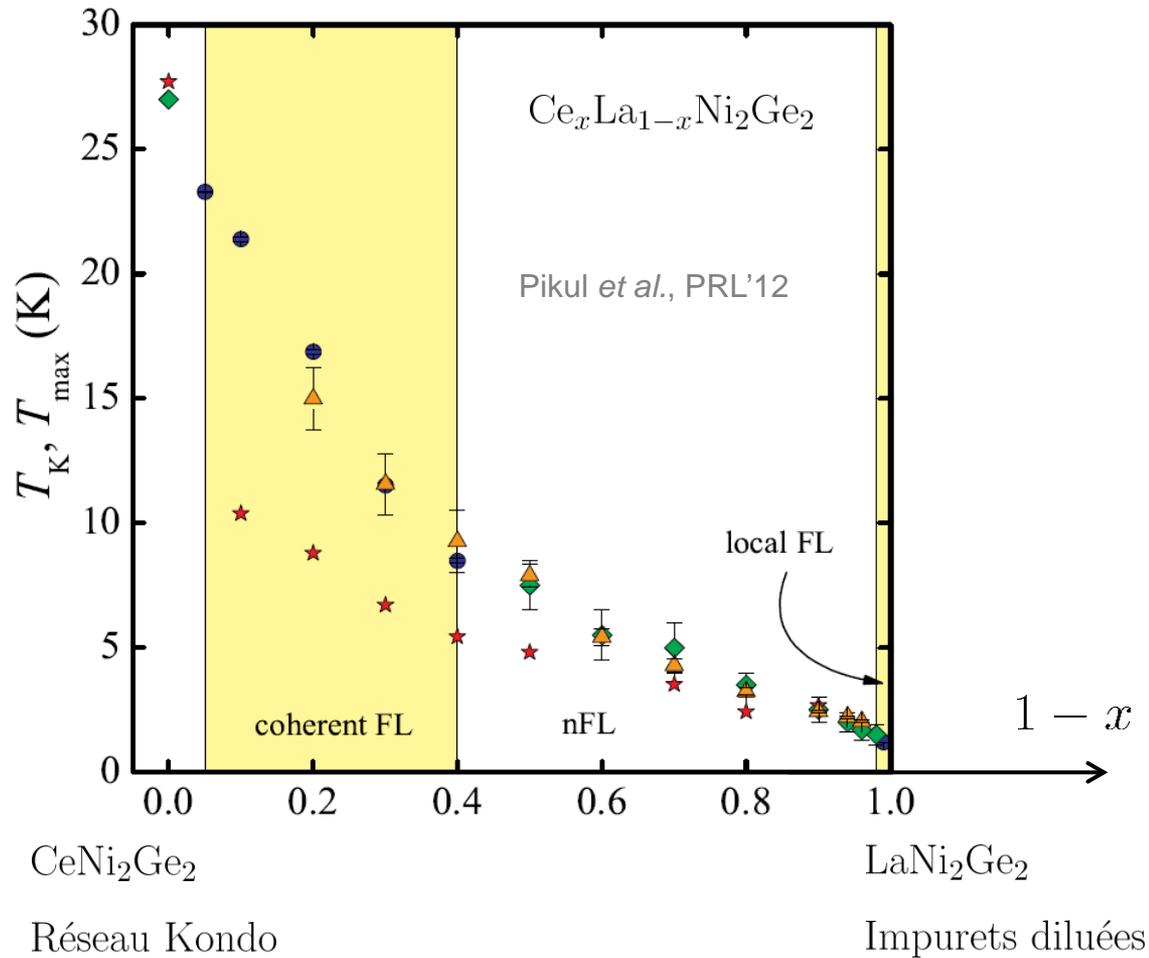
Il s'agit d'une transition de Lifshitz, i.e., un changement de topologie de la surface de Fermi

Conséquence: des propriétés de non liquide de Fermi sont attendues par substitution $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}[\dots]$
 $\text{Yb}_x\text{Lu}_{1-x}[\dots]$

Transition de Lifshitz dans les alliages Kondo

SB, Lacroix '12

Ce scénario pourrait expliquer les propriétés de non liquide de Fermi observées sur $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{Ni}_2\text{Ge}_2$



Plan de l'exposé

1) Survol de faits expérimentaux marquants

2) La physico-chimie des composés d'électrons f

3) Deux concepts théoriques récents

Alliages Kondo et transition de Lifshitz

—————> Liquide de spin modulé

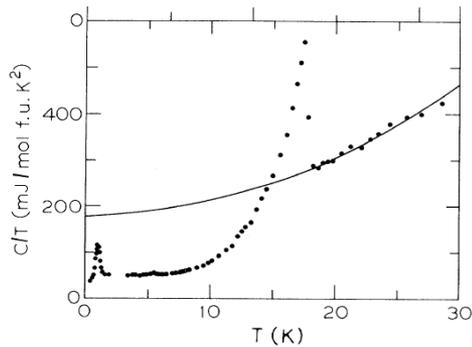
Perspectives

Liquides de spin

Un exemple:

La mystérieuse phase d'ordre caché observée expérimentalement dans le composé URu_2Si_2

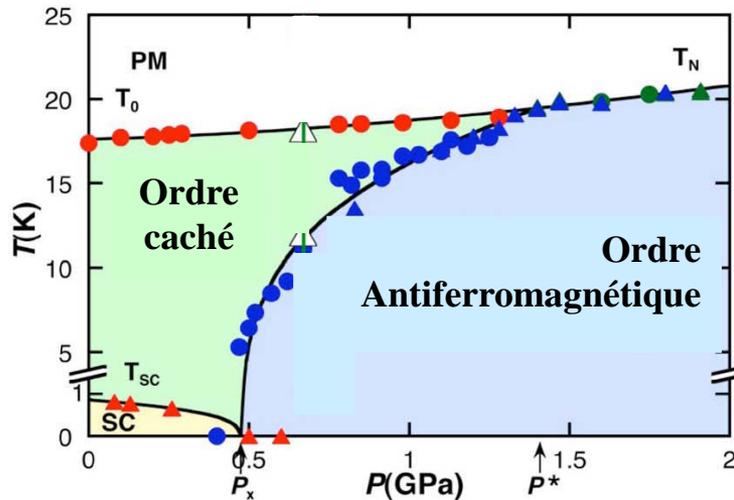
Palstra *et al.*, PRL'85



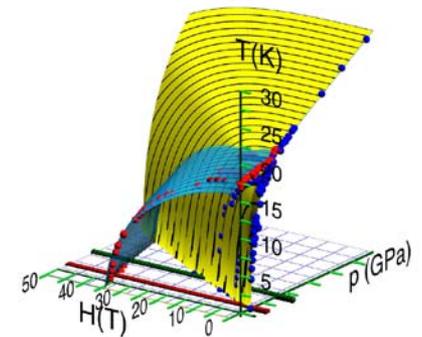
Des mesures récentes de diffusion inélastique de neutron effectuées sous pression suggèrent un paramètre d'ordre:

- **d'origine magnétique**
- **brisant la symétrie de réseau,**
- **mais sans formation de moment magnétique...**

A. Villaume *et al.*, PRB'08

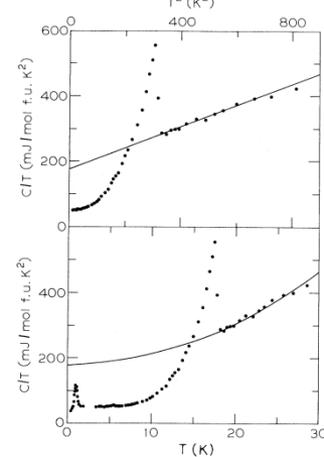


Bourdarot *et al.*, PRB'11

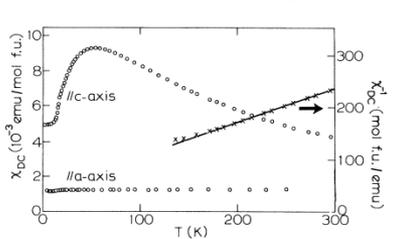


Experimental quick overview

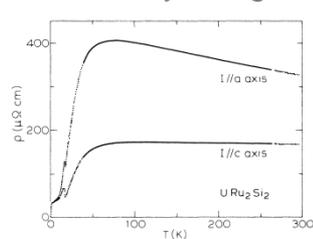
Specific heat.



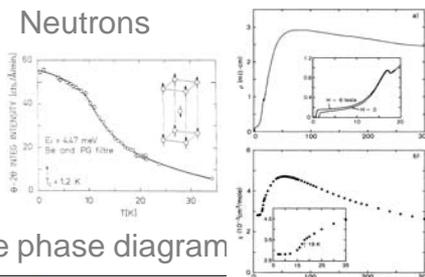
Susceptibility along c-axis.



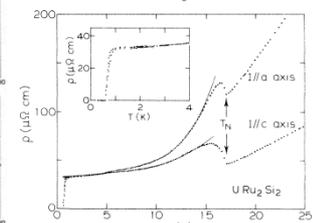
Resistivity at high T



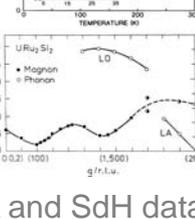
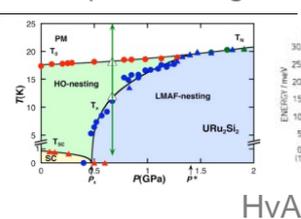
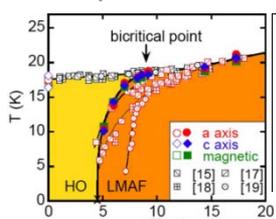
Neutrons



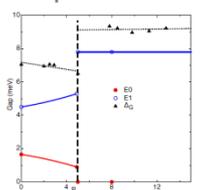
Resistivity at low T



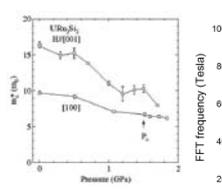
Temperature-Pressure phase diagram



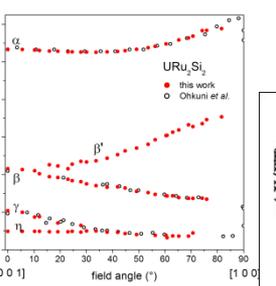
Gaps pressure dependence



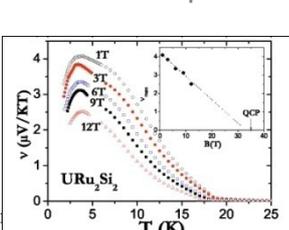
Effective mass



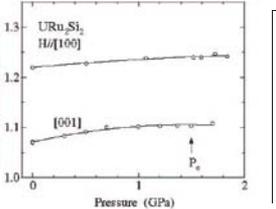
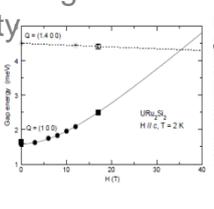
HvA and SdH data



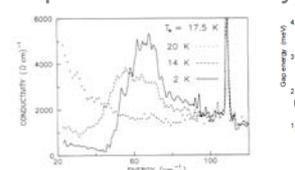
Heat transport



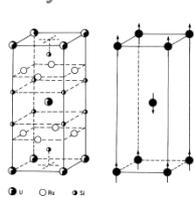
Gaps and Magnetic field



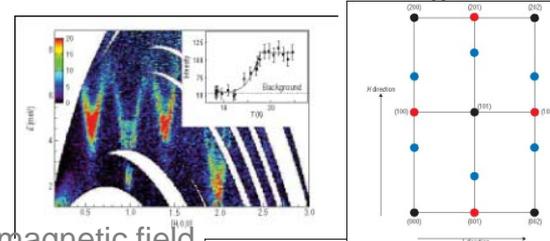
Optical conductivity



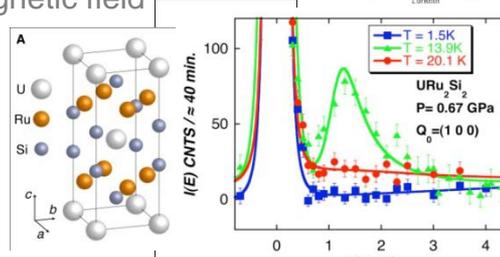
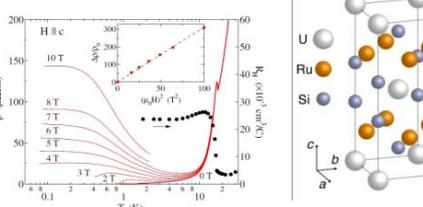
Crystal structure



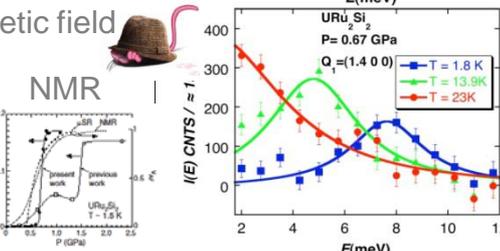
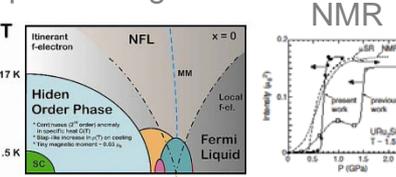
Inelastic neutron scattering



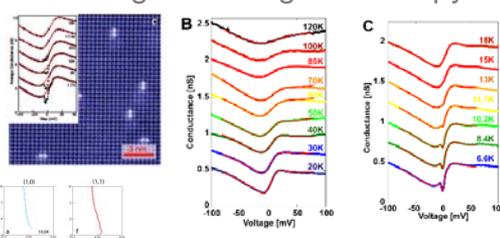
Resistivity with magnetic field
Hall coefficient



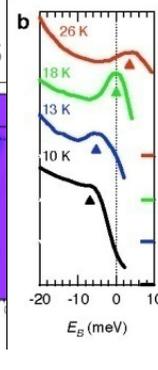
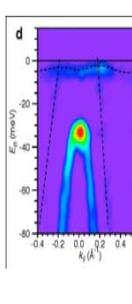
Temperature-magnetic field phase diagram



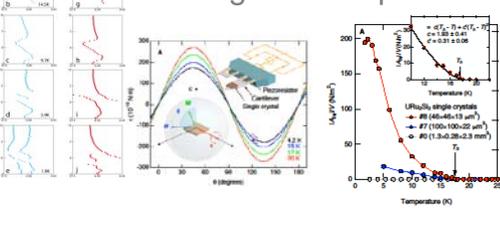
Scanning Tunneling Microscopy



ARPES



Magnetic Torque



Itinerant theories

A. Ramirez, PRL'92

H. Ikeda, PRL'98

Spin density Wave

P. Chandra, Nature'02

Orbital AF

C. Varma, PRL'06

Lifshitz transition

V. Mineev, PRB'05

SDW + Induced moments

A. Balatsky, PRB'09

Charge Density Wave

P. S. Riseborough, B. Coqblin, S. G. Magalhaes PRB'12

V. Barzykin, L. Gorkov, PRL'93 PRL'95

Multi-Spin Correlations

Valence admixture



Pépin, Norman, SB, Ferraz PRL'11

Thomas, SB, Pépin, Ferraz '12

Hidden Order

=

Modulated Spin Liquid

Localized theories

Kiss & Fasekas, PRB'05

K. Hanzawa, JMMM'07

Octupolar Order

Ohkawa & Shimizu, JPCM'99

P. Santini, PRB'98

Quadrupolar Order

T. Kasuya, JPSJ'97

Jahn-Teller distortion

D. Cox, PRL'87

Over-screened Kondo effect

Haule & Kotliar, Nature'09

Hexadecapolar order
Arrested Kondo effect

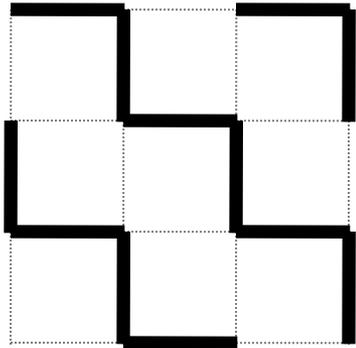
Le liquide de spin modulé

Pépin, Norman, SB, Ferraz PRL'11

Thomas, SB, Ferraz, Pépin, PRB'13

Liquide de spin modulé:

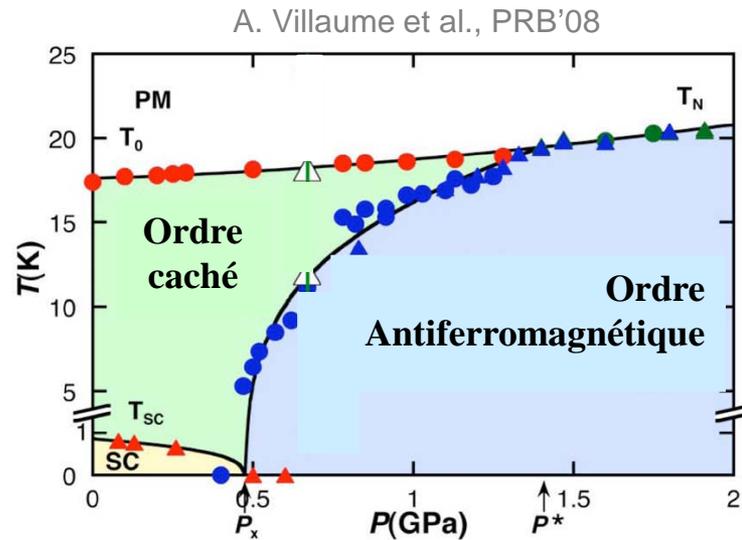
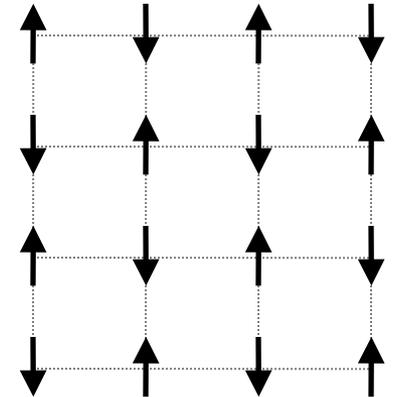
Brisure de symétrie de réseau



Phase antiferromagnétique:

Brisure de symétrie de réseau

Brisure de symétrie de renversement du temps



Le liquide de spin modulé

Pépin, Norman, SB, Ferraz PRL'11

Idée originelle du lien de valence résonnant (RVB)

Fazekas & Anderson SSC'74

Anderson, Science'87

Baskaran, Zou & Anderson, SSC'87

Affleck & Marston, PRL'87

Hamiltonien de Heisenberg:

$$H = J \sum_{\langle i,j \rangle, \alpha\alpha'} \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\alpha'} \chi_{j\alpha'}^\dagger \chi_{j\alpha}$$

Les opérateurs fermioniques de spin $\frac{1}{2}$ satisfont les contraintes locales $\sum_{\alpha=\uparrow,\downarrow} \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\alpha} = 1$

- L'interaction peut être découplée en trois canaux de champs moyens:

Le liquide de spin modulé

Pépin, Norman, SB, Ferraz PRL'11

Idée originelle du lien de valence résonnant (RVB)

Fazekas & Anderson SSC'74

Anderson, Science'87

Baskaran, Zou & Anderson, SSC'87

Affleck & Marston, PRL'87

Hamiltonien de Heisenberg:

$$H = J \sum_{\langle i,j \rangle, \alpha\alpha'} \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\alpha'} \chi_{j\alpha'}^\dagger \chi_{j\alpha} \approx J \sum_{\langle i,j \rangle, \alpha\alpha'} \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\alpha'} \langle \chi_{j\alpha'}^\dagger \chi_{j\alpha} \rangle$$

Les opérateurs fermioniques de spin $\frac{1}{2}$ satisfont les contraintes locales $\sum_{\alpha=\uparrow,\downarrow} \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\alpha} = 1$

- L'interaction peut être découpée en trois canaux de champs moyens:

Magnétique, champ de Weiss:
$$\vec{m}_i^{\mathbf{Q}} = \sum_{\alpha,\beta} \vec{\sigma}_{\alpha\beta} \langle \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\beta} \rangle e^{i\mathbf{Q}\cdot\mathbf{r}_i}$$

Le liquide de spin modulé

Pépin, Norman, SB, Ferraz PRL'11

Idée originelle du lien de valence résonnant (RVB)

Fazekas & Anderson SSC'74

Anderson, Science'87

Baskaran, Zou & Anderson, SSC'87

Affleck & Marston, PRL'87

Hamiltonien de Heisenberg:

$$H = J \sum_{\langle i,j \rangle, \alpha\alpha'} \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\alpha'} \chi_{j\alpha'}^\dagger \chi_{j\alpha} \approx J \sum_{\langle i,j \rangle, \alpha\alpha'} \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{j\alpha'}^\dagger \langle \chi_{i\alpha'} \chi_{j\alpha} \rangle$$

Les opérateurs fermioniques de spin $\frac{1}{2}$ satisfont les contraintes locales $\sum_{\alpha=\uparrow,\downarrow} \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\alpha} = 1$

- L'interaction peut être découpée en trois canaux de champs moyens:

Magnétique, champ de Weiss: $\vec{m}_i^{\mathbf{Q}} = \sum_{\alpha,\beta} \vec{\sigma}_{\alpha\beta} \langle \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\beta} \rangle e^{i\mathbf{Q}\cdot\mathbf{r}_i}$

Appariement supraconducteur: $\Delta_{ij} = \langle \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{j\bar{\alpha}}^\dagger - \chi_{i\bar{\alpha}}^\dagger \chi_{j\alpha}^\dagger \rangle$

Le liquide de spin modulé

Pépin, Norman, SB, Ferraz PRL'11

Idée originelle du lien de valence résonnant (RVB)

Fazekas & Anderson SSC'74

Anderson, Science'87

Baskaran, Zou & Anderson, SSC'87

Affleck & Marston, PRL'87

Hamiltonien de Heisenberg:

$$H = J \sum_{\langle i,j \rangle, \alpha\alpha'} \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\alpha'} \chi_{j\alpha'}^\dagger \chi_{j\alpha} \approx J \sum_{\langle i,j \rangle, \alpha\alpha'} \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{j\alpha} \langle \chi_{i\alpha'} \chi_{j\alpha'}^\dagger \rangle$$

Les opérateurs fermioniques de spin $\frac{1}{2}$ satisfont les contraintes locales $\sum_{\alpha=\uparrow,\downarrow} \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\alpha} = 1$

- L'interaction peut être découpée en trois canaux de champs moyens:

Magnétique, champ de Weiss: $\vec{m}_i^{\mathbf{Q}} = \sum_{\alpha,\beta} \vec{\sigma}_{\alpha\beta} \langle \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\beta} \rangle e^{i\mathbf{Q}\cdot\mathbf{r}_i}$

Appariement supraconducteur: $\Delta_{ij} = \langle \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{j\bar{\alpha}}^\dagger - \chi_{i\bar{\alpha}}^\dagger \chi_{j\alpha}^\dagger \rangle$

Découplage liquide de spin: $\varphi_{ij} = \varphi_{ji}^* = \sum_{\alpha} \langle \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{j\alpha} \rangle$

Le liquide de spin modulé

Pépin, Norman, SB, Ferraz PRL'11

Idée originelle du lien de valence résonnant (RVB)

Fazekas & Anderson SSC'74

Anderson, Science'87

Baskaran, Zou & Anderson, SSC'87

Affleck & Marston, PRL'87

Hamiltonien de Heisenberg:

$$H = J \sum_{\langle i,j \rangle, \alpha\alpha'} \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\alpha'} \chi_{j\alpha'}^\dagger \chi_{j\alpha}$$

Les opérateurs fermioniques de spin $\frac{1}{2}$ satisfont les contraintes locales $\sum_{\alpha=\uparrow,\downarrow} \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\alpha} = 1$

- L'interaction peut être découpée en trois canaux de champs moyens:

Magnétique, champ de Weiss: $\vec{m}_i^{\mathbf{Q}} = \sum_{\alpha,\beta} \vec{\sigma}_{\alpha\beta} \langle \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{i\beta} \rangle e^{i\mathbf{Q}\cdot\mathbf{r}_i}$

Appariement supraconducteur: $\Delta_{ij} = \langle \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{j\bar{\alpha}} - \chi_{i\bar{\alpha}}^\dagger \chi_{j\alpha} \rangle$

Découplage liquide de spin: $\varphi_{ij} = \varphi_{ji}^* = \sum_{\alpha} \langle \chi_{i\alpha}^\dagger \chi_{j\alpha} \rangle$

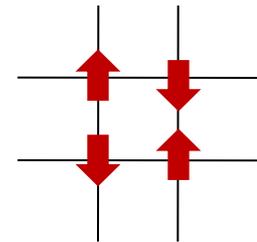
- Considérant un réseau carré, étudions les champs moyens suivants:

Ordre de Néel: $\vec{m}_i^{(\pi,\pi)} = (-1)^{i_x+i_y} \vec{m}_0$

Liquide de spin homogène et modulé de type Néel:

$$\varphi_{ij} = \phi_0 \pm \phi_{\mathbf{Q}} \quad \text{réel}$$

Ordre de Néel AF



Lien de valence modulé

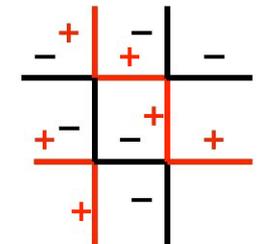
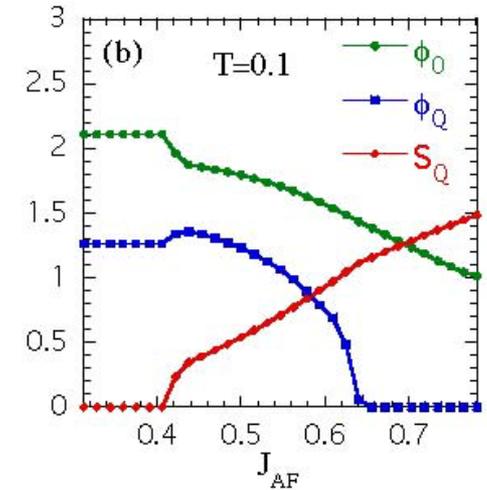
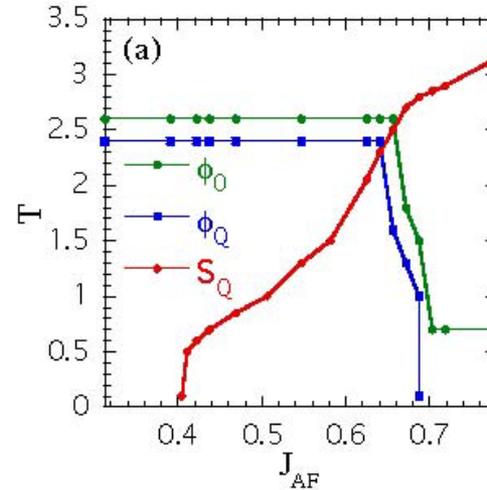
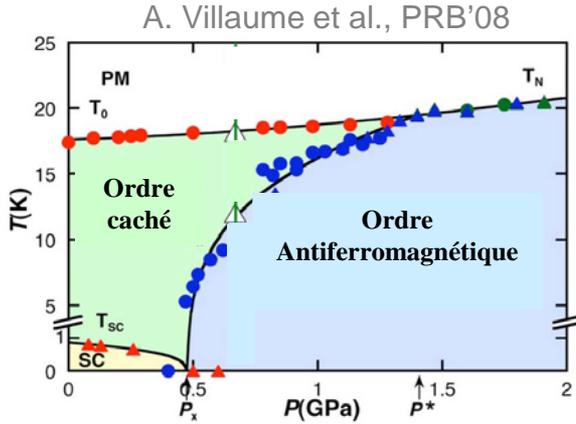
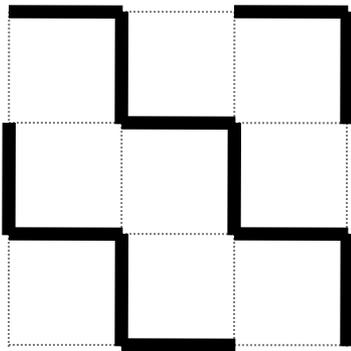


Diagramme de phase

Pépin, Norman, SB, Ferraz PRL'11

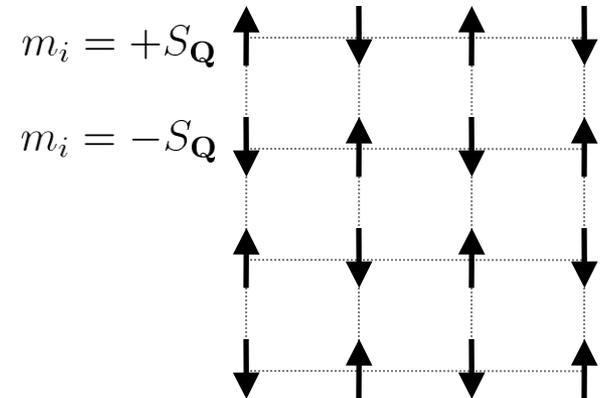


Liquide de spin Modulé \longleftrightarrow Coexistence possible \longleftrightarrow Ordre antiferromagnétique



— $\varphi_{ij} = \phi_0 + \phi_Q$

- - - $\varphi_{ij} = \phi_0 - \phi_Q$



Pas de moment magnétique

Moment magnétique S_Q

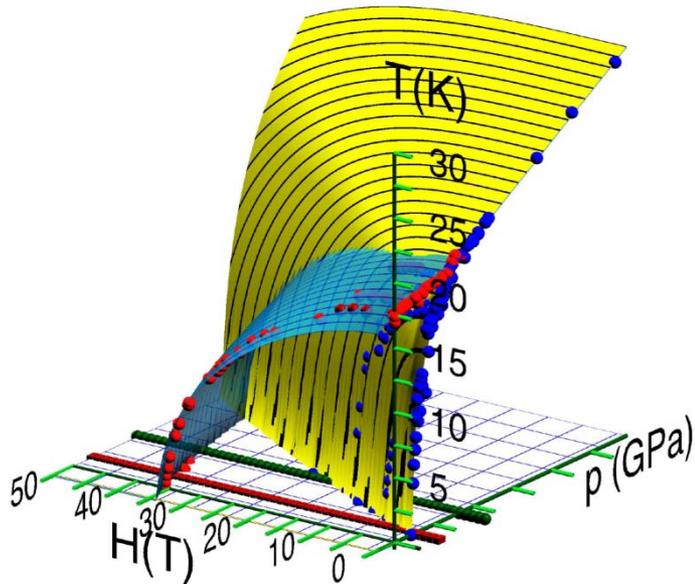
Diagramme de phase

Le modèle du liquide de spin modulé a été généralisé à un réseau 3D réaliste

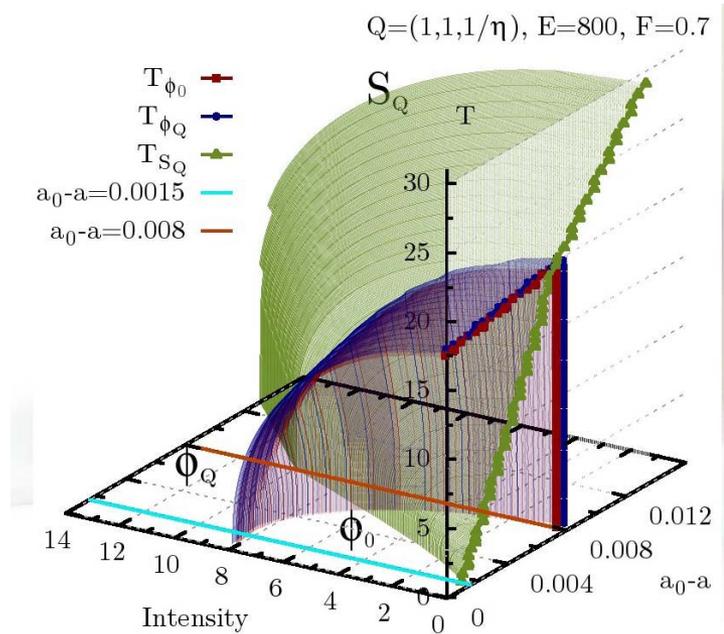
Thomas, SB, Ferraz, Pépin, PRB'13

Expérimentalement:

F. Bourdarot et al., PRB'11



Théorie du liquide de spin modulé:



Perspectives

Les électrons f apportent aux matériaux un ingrédient unique permettant d'observer, de réaliser, et d'étudier des phénomènes physiques abordés notamment dans d'autres thématiques du GDR MICO:

- *Matériaux supraconducteurs non conventionnels*
- *Emergence des effets de la frustration géométrique*
coexistant avec les fluctuations de charge
- *Plus généralement: Nouveaux types d'états et de transitions quantiques*
 - Supraconductivité triplet et ré-entrance
 - Ordre caché
 - Liquides de spin
 - Ordres multipolaires
 - Phases modulées spatialement

Progrès des méthodes expérimentales