

Étude de la résonance magnétique nucléaire du ^{129}Xe hyperpolarisé et applications à la RMN des liquides

Denis MARION

Laboratoire de Structure & Dynamique par Résonance Magnétique
CEA/DSM/IRAMIS/SCM

jeudi 3 juillet 2008



Plan de l'exposé

- 1 Pourquoi étudier un système de spins hyperpolarisé ?
- 2 Couplages dipolaires à longue distance
- 3 Xénon hyperpolarisé dissous : le système à l'étude
- 4 SPIDER : transfert de polarisation cohérent
- 5 Émissions maser chaotiques non déclenchées
- 6 Questions en suspens
- 7 Perspectives : augmenter la sensibilité de détection

Sommaire

- 1 Pourquoi étudier un système de spins hyperpolarisé ?
- 2 Couplages dipolaires à longue distance
- 3 Xénon hyperpolarisé dissous : le système à l'étude
- 4 SPIDER : transfert de polarisation cohérent
- 5 Émissions maser chaotiques non déclenchées
- 6 Questions en suspens
- 7 Perspectives : augmenter la sensibilité de détection

... parce que la RMN est peu sensible.

Signal RMN faible, détection inductive peu efficace

Tension aux bornes de la bobine

$$v_{\text{bob}} = \mu_0 \hbar \gamma^2 \times \frac{AL}{r} Q \times P \eta c \times B_0$$

Exemple :

Crysonde BRUKER 900 MHz, bobine ^1H : $Q \approx 2000$
 éthylbenzène à 0,1 % : $SNR = 8000$

Limite de détection actuelle (^1H , 1 s)

$$c_{\text{H}} = 2\mu\text{M} \text{ soit } v_{\text{bob}} \approx 0,2\mu\text{V}$$

(1 spectre)

Quelles solutions ?

$$P = \tanh \frac{\gamma \hbar B_0}{2kT} \approx 10^{-5} - 10^{-4} \text{ à } 25^\circ\text{C}$$

Tension aux bornes de la bobine

$$v_{\text{bob}} = \mu_0 \hbar \gamma^2 \times \frac{AL}{r} Q \times P \eta c \times B_0$$

- Changer le récepteur

Quelles solutions ?

$$P = \tanh \frac{\gamma \hbar B_0}{2kT} \approx 10^{-5} - 10^{-4} \text{ à } 25^\circ\text{C}$$

Tension aux bornes de la bobine

$$v_{\text{bob}} = \mu_0 \hbar \gamma^2 \times \frac{AL}{r} Q \times P \eta c \times B_0$$

- **Changer le récepteur**
- Modifier l'échantillon
- Augmenter le champ statique
- optimisation bobine (Q , L , μ -bobines)
- diminution du bruit électronique (cryosonde, préamplis AsGa, ...)

Quelles solutions ?

$$P = \tanh \frac{\gamma \hbar B_0}{2kT} \approx 10^{-5} - 10^{-4} \text{ à } 25^\circ\text{C}$$

Tension aux bornes de la bobine

$$v_{\text{bob}} = \mu_0 \hbar \gamma^2 \times \frac{AL}{r} Q \times P \eta c \times B_0$$

- Changer le récepteur
 - **Modifier l'échantillon**
 - Augmenter le champ statique
- ① baisser la temp. de travail (T)
 - ② optimiser le flux reçu par la bobine (η)
 - ③ augmenter la concentration de produit (c)

Quelles solutions ?

$$P = \tanh \frac{\gamma \hbar B_0}{2kT} \approx 10^{-5} - 10^{-4} \text{ à } 25^\circ\text{C}$$

Tension aux bornes de la bobine

$$v_{\text{bob}} = \mu_0 \hbar \gamma^2 \times \frac{AL}{r} Q \times P \eta c \times B_0$$

- Changer le récepteur
 - Modifier l'échantillon
 - **Augmenter le champ statique**
- ① $v_{\text{bob}} \propto B_0^2$
 - ② **prix** $\propto \exp(B_0)$!!
 - ③ limite technologique

Quelles solutions ?

$$P = \tanh \frac{\gamma \hbar B_0}{2kT} \approx 10^{-5} - 10^{-4} \text{ à } 25^\circ\text{C}$$

Tension aux bornes de la bobine

$$v_{\text{bob}} = \mu_0 \hbar \gamma^2 \times \frac{AL}{r} Q \times P \eta c \times B_0$$

- Changer le récepteur
- Modifier l'échantillon
- Augmenter le champ statique
- **Augmenter la polarisation du système de spins à l'étude**

Augmenter la polarisation d'un système de spins

- Le lien polarisation-température : $P_0 = \tanh \frac{\gamma \hbar B_0}{2kT}$

Augmenter la polarisation d'un système de spins

- Le lien polarisation-température : $P_0 = \tanh \frac{\gamma \hbar B_0}{2kT}$... à l'équilibre !

Augmenter la polarisation d'un système de spins

- Le lien polarisation-température : $P_0 = \tanh \frac{\gamma \hbar B_0}{2kT}$... à l'équilibre !
- La température de spins T_s
 - « Thermalisation » du système (*relaxation*) lente à l'échelle de ω_0

Augmenter la polarisation d'un système de spins

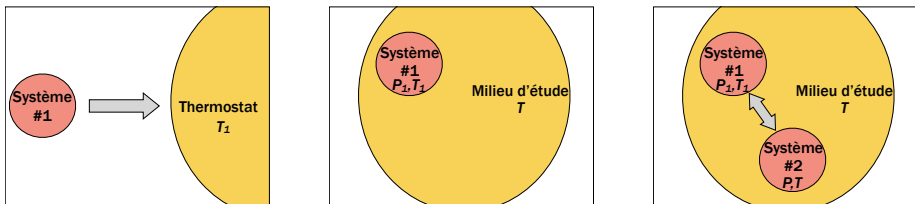
- Le lien polarisation-température : $P_0 = \tanh \frac{\gamma \hbar B_0}{2kT}$... à l'équilibre !
- La température de spins T_s
 - « Thermalisation » du système (*relaxation*) lente à l'échelle de ω_0
 - ⇒ Niveaux de spins isolés des autres niveaux à l'échelle de T_1

Augmenter la polarisation d'un système de spins

- Le lien polarisation-température : $P_0 = \tanh \frac{\gamma \hbar B_0}{2kT}$... à l'équilibre !
- La température de spins T_s
 - « Thermalisation » du système (*relaxation*) lente à l'échelle de ω_0
 - ⇒ Niveaux de spins isolés des autres niveaux à l'échelle de T_1
 - ⇒ Température indépendante T_s associée aux niveaux Zeeman

Augmenter la polarisation d'un système de spins

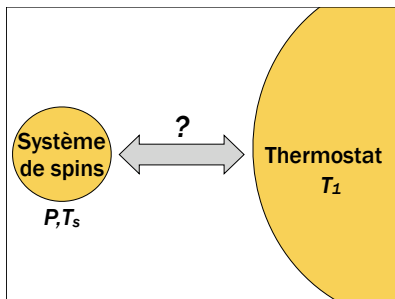
- Le lien polarisation-température : $P_0 = \tanh \frac{\gamma \hbar B_0}{2kT}$... à l'équilibre !
- La température de spins T_s
- Augmenter P :
 - Abaisser momentanément T_s au moyen d'un thermostat
 - Plonger le système dans un milieu plus chaud
 - Transférer P à d'autres systèmes de spins



Différents types de transferts

Transfert	Thermostat	Système #1	Système #2
<i>Pompage Optique</i>	$h\nu$ polarisés	Rb	
<i>(P.O.) + échange spins</i>	$h\nu$ polarisés	Rb	^{129}Xe
<i>SPIDER, SPINOE, ...</i>	^{129}Xe	^1H	

Les interactions permettant un transfert de polarisation



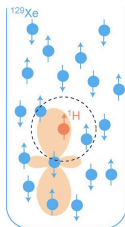
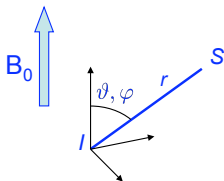
Interactions dipolaires

- incohérentes, courte distance : SPINOE
- **cohérentes, longue distance : SPIDER**

Sommaire

- 1 Pourquoi étudier un système de spins hyperpolarisé ?
- 2 Couplages dipolaires à longue distance**
- 3 Xénon hyperpolarisé dissous : le système à l'étude
- 4 SPIDER : transfert de polarisation cohérent
- 5 Émissions maser chaotiques non déclenchées
- 6 Questions en suspens
- 7 Perspectives : augmenter la sensibilité de détection

L'hamiltonien dipolaire

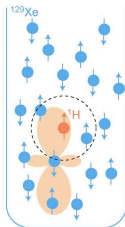
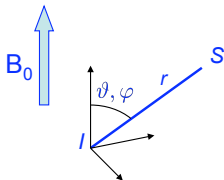


- Interactions entre tous les spins en présence

En champ fort :

$$\mathcal{H}_{IS}^{\text{dip}} = \frac{\mu_0 \gamma_I \gamma_S \hbar}{4\pi} \frac{1 - 3 \cos^2 \theta(t)}{r^3(t)} \left(I_z S_z - \frac{1}{4} (I_+ S_- + I_- S_+) \right)$$

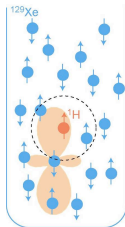
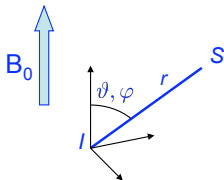
L'hamiltonien dipolaire



- Interactions entre tous les spins en présence
En champ fort :

$$\mathcal{H}_{IS}^{\text{dip}} = \delta_{ij} \left(I_z S_z - \frac{1}{4} (I_+ S_- + I_- S_+) \right)$$

L'hamiltonien dipolaire

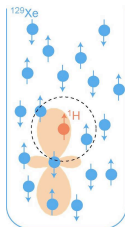
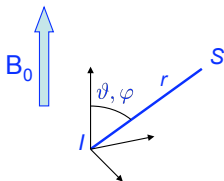


- Interactions entre tous les spins en présence

En champ fort :

$$\mathcal{H}_{IS}^{\text{dip}} = \delta_{ij} \left(I_z S_z - \frac{1}{4} (I_+ S_- + I_- S_+) \right) \Rightarrow \mathcal{H}_{\text{dip}} = \frac{1}{2} \sum_{I \neq S} \mathcal{H}_{IS}^{\text{dip}}$$

L'hamiltonien dipolaire



- Interactions entre tous les spins en présence

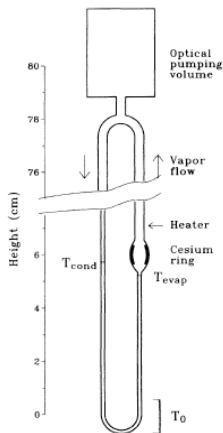
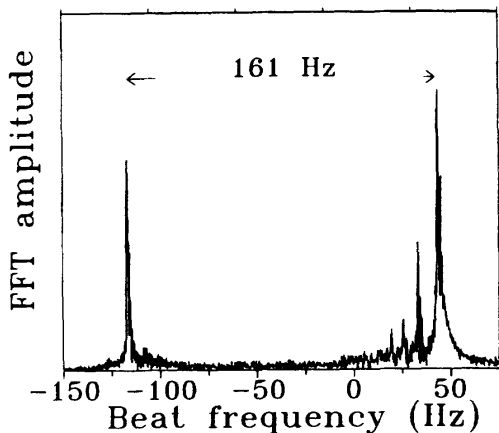
En champ fort :

$$\mathcal{H}_{IS}^{\text{dip}} = \delta_{ij} \left(I_z S_z - \frac{1}{4} (I_+ S_- + I_- S_+) \right) \Rightarrow \mathcal{H}_{\text{dip}} = \frac{1}{2} \sum_{I \neq S} \mathcal{H}_{IS}^{\text{dip}}$$

- Effets des champs dipolaires distants (**DDF**) négligeables **sauf si** :
l'aimantation $M = cP$ est forte

Un effet des DDF : le regroupement spectral

Superpositionphasée de modes propres de l'interaction dipolaire¹



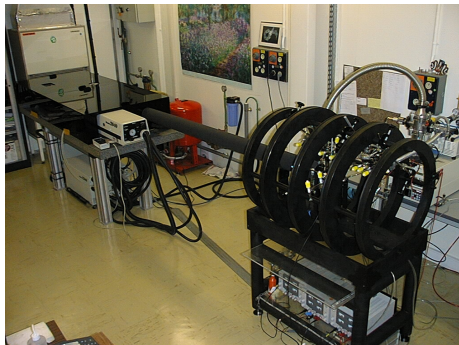
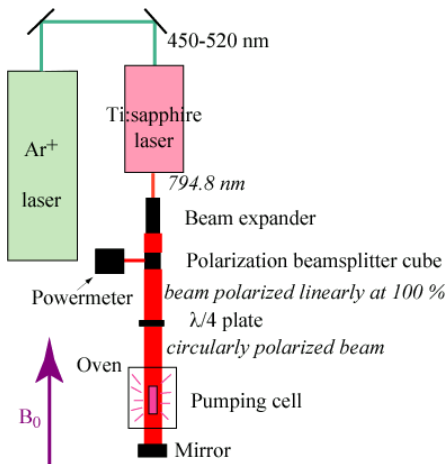
¹D. Candela, M.E. Hayden, P.-J. Nacher, *Phys. Rev. Lett.*, **73**, 1994

Sommaire

- 1 Pourquoi étudier un système de spins hyperpolarisé ?
- 2 Couplages dipolaires à longue distance
- 3 Xénon hyperpolarisé dissous : le système à l'étude**
- 4 SPIDER : transfert de polarisation cohérent
- 5 Émissions maser chaotiques non déclenchées
- 6 Questions en suspens
- 7 Perspectives : augmenter la sensibilité de détection

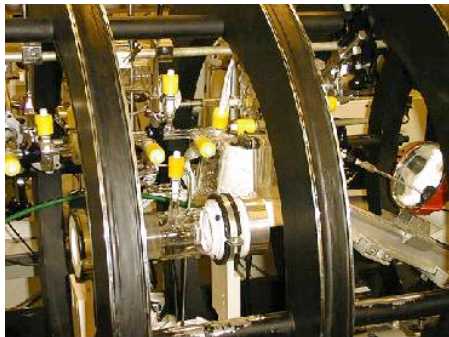
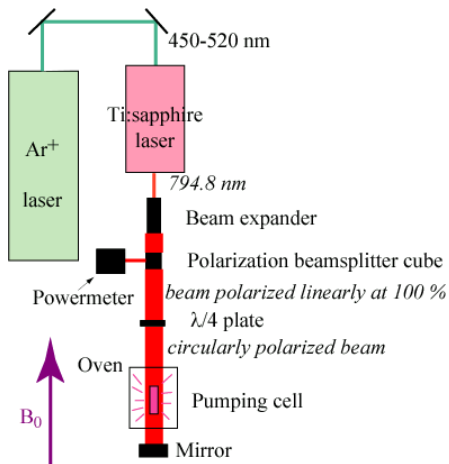
Pompage optique par échange de spin

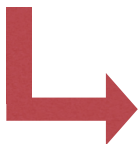
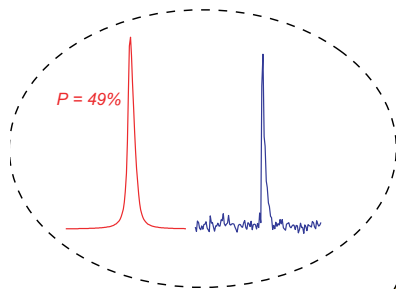
Le montage du laboratoire



Pompage optique par échange de spin

Le montage du laboratoire



^{129}Xe dissous en phase liquide

C_6D_{12}
+
soluté
+
 ^{129}Xe ($P \sim 25\%$)

Mesure de B_d^{Xe}

Le champ résultant dipolaire B_d du ^{129}Xe

- Prop au 1^{er} moment des DDF :

$$B_d \propto \mathcal{M}_1^{Xe} = P_{Xe} \sum_j \delta_{(i)j}$$

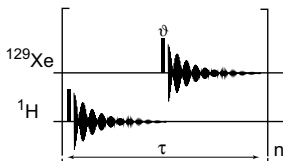
- Dépend de la forme de l'échantillon

$$B_d = -\frac{\mu_0}{3} \xi n P_{Xe} \gamma_{Xe} \quad -\frac{1}{2} < \xi < 1$$

- Mesurable sur tous les noyaux. Ex :

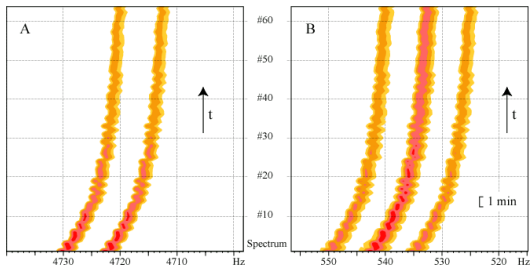
$$\delta_H = -\gamma_H B_d$$

- Séquence :



B_d mesuré par le proton

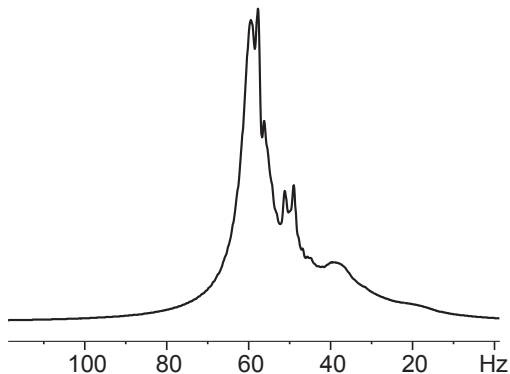
δ_H jusqu'à 10 Hz sur tout le spectre 1H



Comparaison

B_d 16 fois plus intense que
pour un échantillon d'eau

Spectre ^{129}Xe : apparition de regroupement spectral



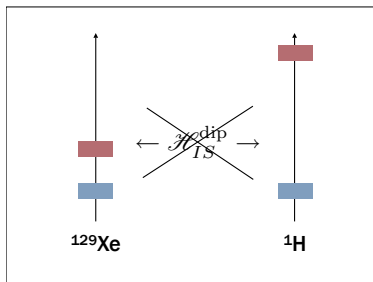
- Superposition de pics fins ($< 0,5$ Hz)
- DDF non négligeables

Sommaire

- 1 Pourquoi étudier un système de spins hyperpolarisé ?
- 2 Couplages dipolaires à longue distance
- 3 Xénon hyperpolarisé dissous : le système à l'étude
- 4 SPIDER : transfert de polarisation cohérent**
- 5 Émissions maser chaotiques non déclenchées
- 6 Questions en suspens
- 7 Perspectives : augmenter la sensibilité de détection

Le principe de SPIDER

Transfert cohérent de Hartmann-Hahn $^{129}\text{Xe} \rightarrow ^1\text{H}$ intermoléculaire

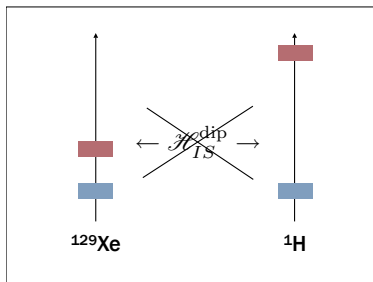


Référentiel labo.

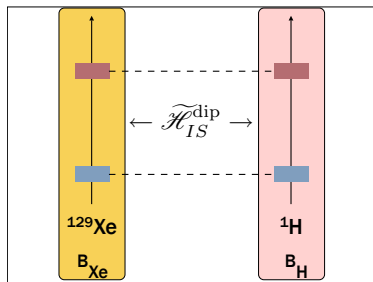
Pas de transfert possible via $\mathcal{H}_{IS}^{\text{dip}}$

Le principe de SPIDER

Transfert cohérent de Hartmann-Hahn $^{129}\text{Xe} \rightarrow ^1\text{H}$ intermoléculaire



Référentiel labo.
Pas de transfert possible via $\mathcal{H}_{IS}^{\text{dip}}$

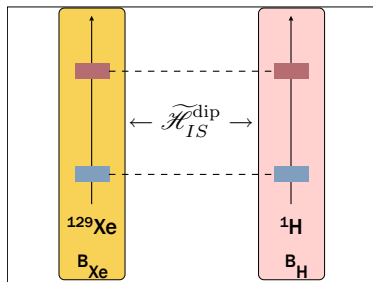
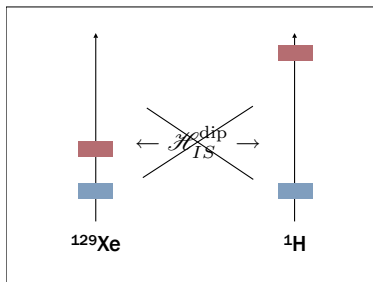


Double irradiation rf
(*Double référentiel tournant*)

$$|\omega_{\text{Xe}} - \omega_{\text{H}}| < \delta_{\text{Xe-H}}$$

Le principe de SPIDER

Transfert cohérent de Hartmann-Hahn $^{129}\text{Xe} \rightarrow ^1\text{H}$ intermoléculaire



Référentiel labo.

Pas de transfert possible via $\mathcal{H}_{IS}^{\text{dip}}$

Double irradiation rf

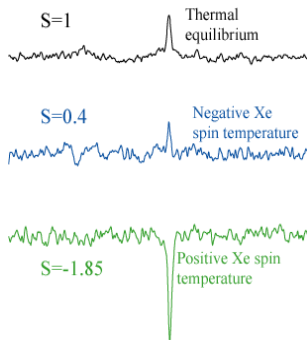
(*Double référentiel tournant*)

$$|\omega_{\text{Xe}} - \omega_{\text{H}}| < \delta_{\text{Xe-H}}$$

Point de vue thermodynamique : facteur **3000** attendu pour P_{H}

Le bilan de SPIDER

- Validation expérimentale de la méthode
- Indépendant de l'affinité chimique avec Xe (\neq SPINOE)
- Transfert Hartmann-Hahn intermoléculaire longue-distance
- $|K_{th}/K_{exp}| > 1600!$



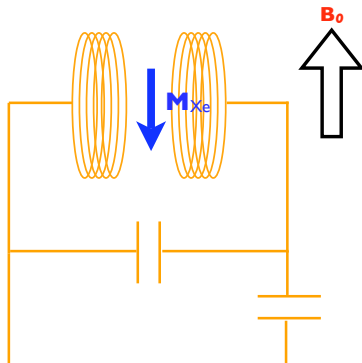
Moist, $\tau = 800\text{ms}$

Sommaire

- 1 Pourquoi étudier un système de spins hyperpolarisé ?
- 2 Couplages dipolaires à longue distance
- 3 Xénon hyperpolarisé dissous : le système à l'étude
- 4 SPIDER : transfert de polarisation cohérent
- 5 Émissions maser chaotiques non déclenchées**
- 6 Questions en suspens
- 7 Perspectives : augmenter la sensibilité de détection

Description des masers chaotiques

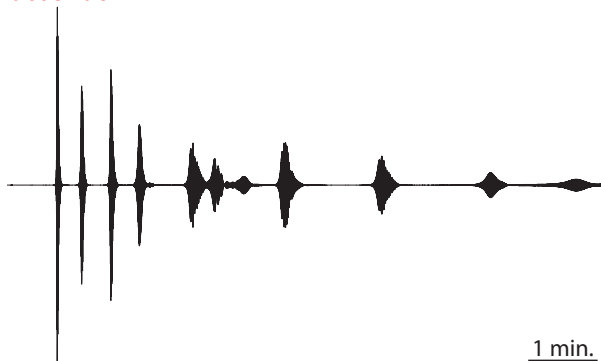
Le principe



- Xe hyperpolarisé $P_{Xe} \approx 15\%$ à 30%
- M_{Xe} en équilibre instable
- couplage inductif avec la bobine (« radiation damping »)
- pas d'impulsion !

Description des masers chaotiques

Le résultat **inattendu**



- Equilibre thermique, homogénéisation
- **Série** d'émissions cohérentes imprédictibles de grande amplitude (**>10 000 90° thermiques!**)
- Forme, spectre variés

Simulation pour UNE aimantation

- Définitions

$$K = \left| \frac{P}{P_0} \right|$$

Facteur d'hypermolarisation

$$T_r = \frac{2}{\mu_0 \eta Q \gamma_{Xe} M_0}$$

Temps caractéristique de R.D. (thermique)

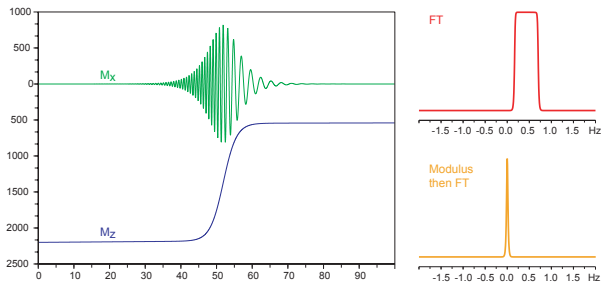
$$\rho = \frac{K}{T_r} - \frac{1}{T_2}$$

Temps de montée d'une émission

Simulation de Bloch pour UNE aimantation

- Solution analytique pour $T_1 \gg T_2$

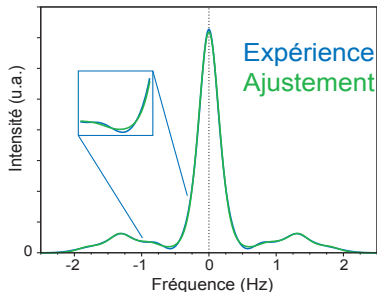
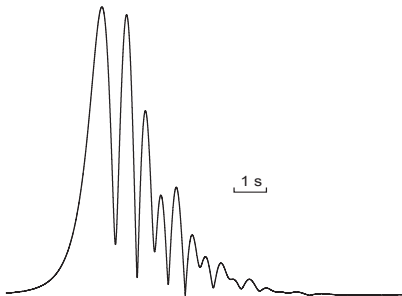
$$\begin{cases} M_{\perp}(t) &= \frac{M_0 T_r \rho}{\cosh \rho(t-t_0)} e^{i\delta(t)t} \\ M_z(t) &= M_0 T_r (\rho \tanh [\rho(t-t_0)] - 1/T_2) \end{cases}$$



$$M_z(t \rightarrow +\infty) < 0 \text{ pour } \frac{T_r}{K} > \frac{T_2}{2}$$

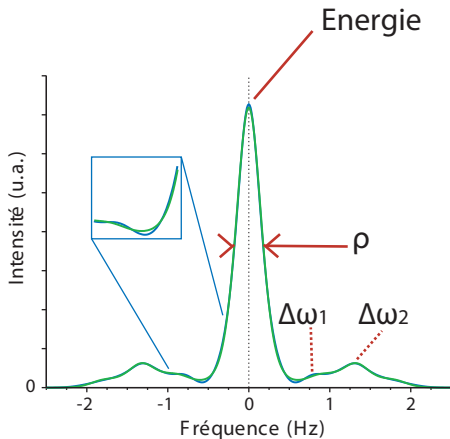
Modèle de traitement des données

- Forme générale = enveloppe en $\text{sech}(\rho t)$
+ balayage en fréquence en $\text{tanh}(\rho t)$
- Superposition d'émissions :
 - 1 à 4 émissions indépendantes
 - $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \Delta\omega_3$ tous différents



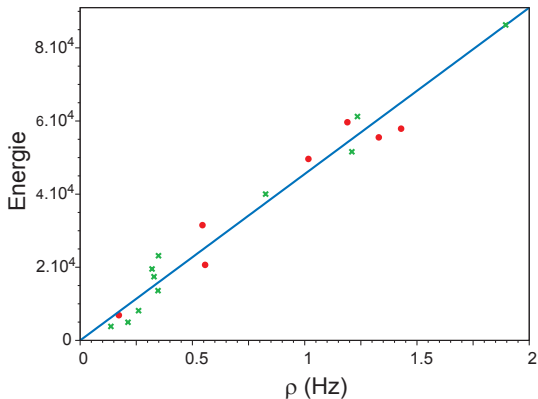
Pertinence du modèle

- Ajustement de l'enveloppe de $\mathcal{F}(\|M_{\perp}\|^2)$



Pertinence du modèle

- Énergie émise
 - $E_{\text{rad}} = V_s M_0 T_r \rho$
 - Linéaire par rapport à ρ



Pertinence du modèle

- Un modèle cohérent :
 - superposition des modes ($\rho_i, E_{\text{rad}}, \dots$)
 - ajustements intercompatibles

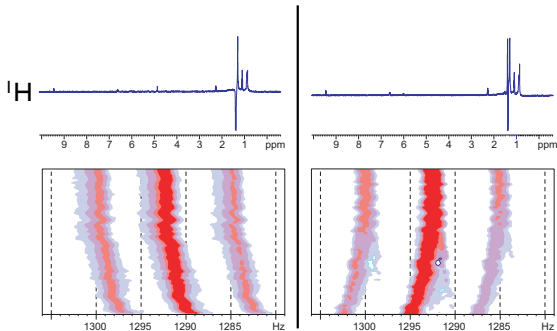
Pertinence du modèle

- Un modèle cohérent :
 - superposition des modes ($\rho_i, E_{\text{rad}}, \dots$)
 - ajustements intercompatibles
- Reste à préciser :
 - interactions entre modes ?
 - répartition spatiale des modes ?

Modes spatiaux

- Sonde externe : le proton

$$\delta_{\text{H}} = \gamma_{\text{H}} \frac{\mu_0}{3} \xi n P_{\text{Xe}} \gamma_{\text{Xe}} \quad -\frac{1}{2} < \xi < 1$$



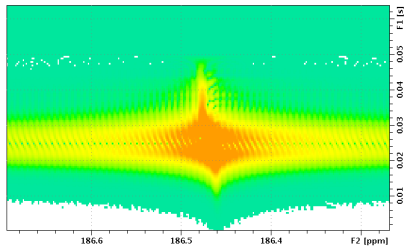
Modes spatiaux

répartis aléatoirement dans l'échantillon.
Géométrie des modes ?

Modes spatiaux

- Fréquence centrale du xénon

δ_{Xe} dépend aussi de ξ

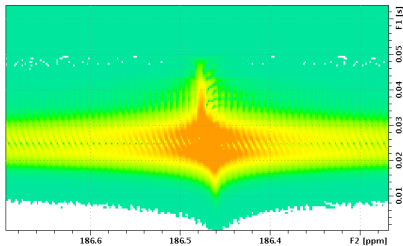


Durant une émission : $\xi < 0$ **OU** $\xi > 0$

Modes spatiaux

- Fréquence centrale du xénon

δ_{Xe} dépend aussi de ξ



Durant une émission : $\xi < 0$ **OU** $\xi > 0$

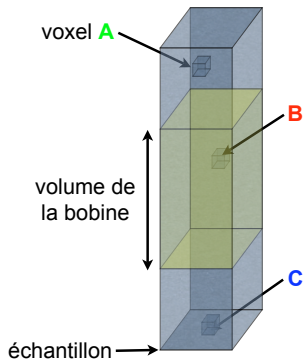
Modes spatiaux

Formes variées ET imprédictibles

Modes spatiaux

- Confirmés par la simulation

Présentation du modèle²

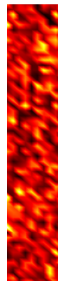
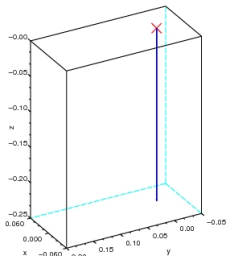
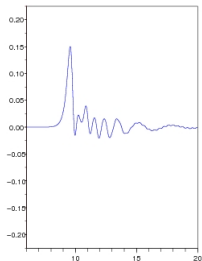


- $10 \times 10 \times 58$ voxels
- **couplages dip.**
- B_d/ξ , bruit rf, diffusion ajustables
- Radiation damping inhomogène

²Code : ©J. Jeener, F. Marion, E. Baudin

Modes spatiaux

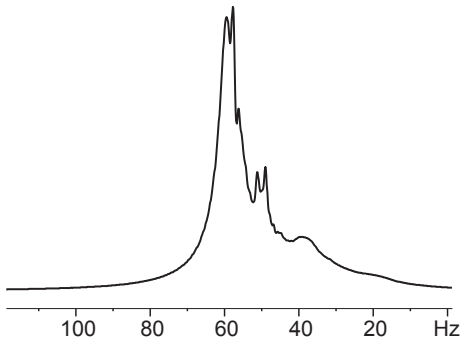
- Résultats de la simulation



... en vidéo

« Interactions » entre modes dipolaires

- *cf.* spectral clustering :

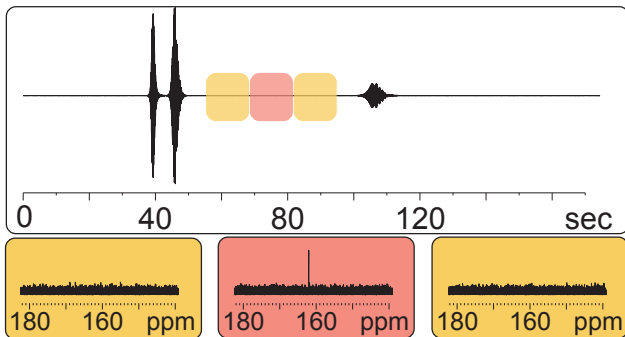


Superposition *phasée* de modes de l'interaction dipolaire

Un voxel $\mathbf{M}(\mathbf{r})dV$ participe à plusieurs modes

« Interactions » entre modes dipolaires

- Réorganisation de l'aimantation **entre** deux émissions



Masers chaotiques **répétés**

Modification **nécessaire** de T_r et/ou T_2 des modes dipolaires
entre #2 et #3 puisque #3 a été déclenché!

« Interactions » entre modes dipolaires

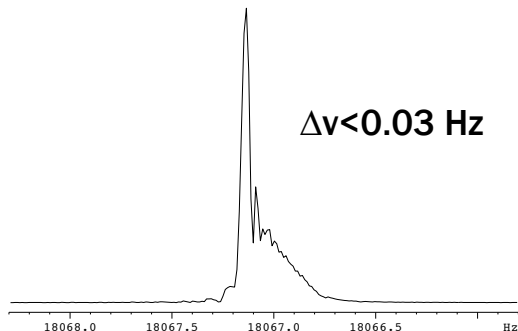
- Modes d'émission maser en *interaction* ?

Au moins 2 preuves importantes. . .

« Interactions » entre modes dipolaires

- Modes d'émission maser en *interaction* ?

Au moins 2 preuves importantes. . .

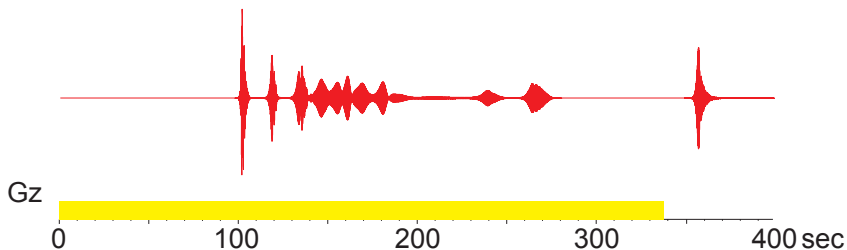


- interactions dipolaires + radiation damping
- modes « propres » ?
- preuve d'auto-organisation

« Interactions » entre modes dipolaires

- Modes d'émission maser en *interaction* ?

Au moins 2 preuves importantes. . .

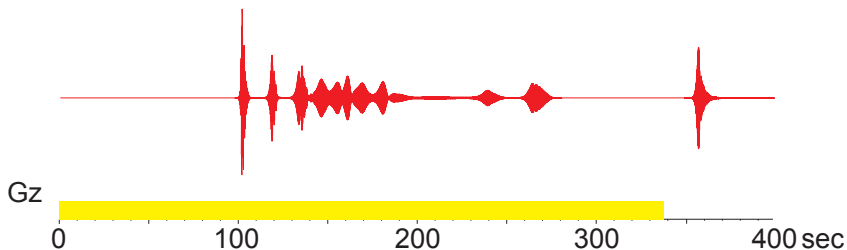


- gradient ON=1 Hz.cm⁻¹ ($\approx B_d$) puis OFF
- masers !
- autre preuve d'auto-organisation

« Interactions » entre modes dipolaires

- Modes d'émission maser en *interaction* ?

Au moins 2 preuves importantes. . .



- **D'autres expériences :**
 - conditions, **temps d'apparition** des modes dipolaires
 - profils post-émissions

En conclusion sur les émissions maser chaotiques

- Émissions imprédictibles, répétées, **chaotiques**
- Correctement décrites par une superposition de modes « **de Bloch** »
- Modes d'émissions fortement associés aux modes dipolaires du « spectral clustering »
- **Interaction** entre les modes *propres* via le **radiation damping**
- Réorganisation permanente des paramètres dynamiques T_r, T_2

Sommaire

- 1 Pourquoi étudier un système de spins hyperpolarisé ?
- 2 Couplages dipolaires à longue distance
- 3 Xénon hyperpolarisé dissous : le système à l'étude
- 4 SPIDER : transfert de polarisation cohérent
- 5 Émissions maser chaotiques non déclenchées
- 6 Questions en suspens**
- 7 Perspectives : augmenter la sensibilité de détection

Quelques questions ouvertes. . .

- ① Calcul de $\mathcal{M}_2^{\text{Xe}}$
- ② Corrélations Xe-Xe en solution
- ③ Modifications de la résonance Xe
- ④ Limitations & dynamique de SPIDER
- ⑤ Relaxation longitudinale dépendante de P , M
- ⑥ Dynamique(s) de $\mathbf{M}_{\perp}^{\text{Xe}}(\mathbf{r}, t)$ à haute P
- ⑦ Aspects énergétiques des émissions maser chaotiques
- ⑧ . . .

Quelques questions ouvertes...

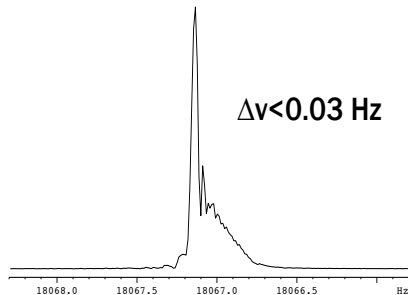
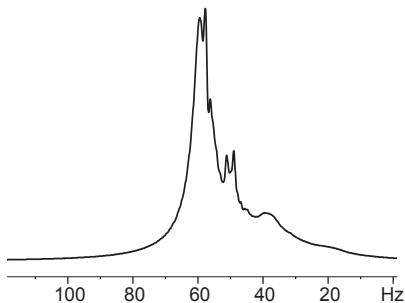
- ① Calcul de $\mathcal{M}_2^{\text{Xe}}$
- ② Corrélations Xe-Xe en solution
- ③ Modifications de la résonance Xe
- ④ Limitations & dynamique de SPIDER
- ⑤ Relaxation longitudinale dépendante de P , M
- ⑥ Dynamique(s) de $\mathbf{M}_{\perp}^{\text{Xe}}(\mathbf{r}, t)$ à haute P
- ⑦ Aspects énergétiques des émissions maser chaotiques
- ⑧ ...

Dynamique(s) de $\mathbf{M}_{\perp}^{\text{Xe}}(\mathbf{r}, t)$ en solution

La relaxation transversale

La relaxation transversale

- Une situation très différente de $P \ll 1$



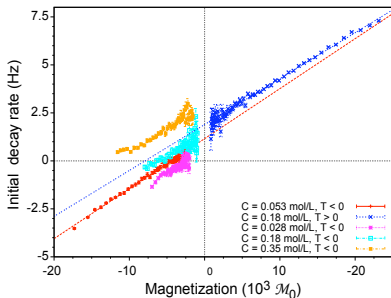
$$T_2 = \pi / \Delta\omega ?$$

\neq solide : $M_2^{\text{Xe}} \Leftrightarrow$ largeur de raie ?

La relaxation transversale

- Analyse des pentes initiales après petite impulsion

$$R_2^{\text{obs}} = \frac{K}{T_r} + \frac{1}{T_2}$$



- Dépendance en $[\text{Xe}]$ pour $P \ll 1$:

$$R_2^0 = 5,49 \times [\text{Xe}] + 0,76 \quad \text{en s}^{-1} \quad ([\text{Xe}] \text{ en mol.L}^{-1})$$

La relaxation transversale

- Dépendance en $[\text{Xe}]$ pour $P \ll 1$:

$$R_2^0 = 5,49 \times [\text{Xe}] + 0,76 \quad \text{s}^{-1}$$

T_2 thermique : $\approx 1 \text{ s}$ ($[\text{Xe}] = 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$)

- Précision de mesure à confirmer
- **2 à 3 ordres de grandeur** de moins que $T_1 \approx 500 \text{ s}$
- Incompatibilité théorique ?
Contributions à la relaxation : $\tau_c > 1/\omega_0$?

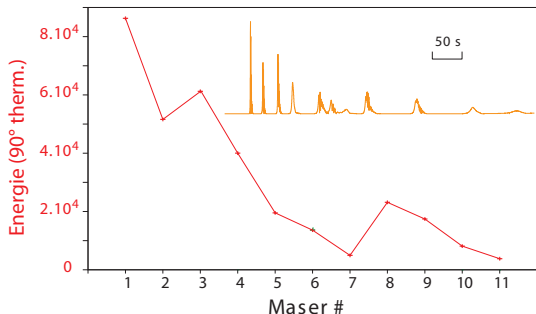
L'énergie émise par les émissions chaotiques

L'énergie des émissions chaotiques

- $E_{\text{rad}} = \Delta E_{\text{Zeeman}}$!! Pas de perte par relaxation, pas de rayonnement externe ?

L'énergie des émissions chaotiques

- $E_{\text{rad}} = \Delta E_{\text{Zeeman}}$!! Pas de perte par relaxation, pas de rayonnement externe ?
- Pour une expérience :



$E_{\text{bob}} \Leftrightarrow$ **350 000** impulsions 90° thermiques reçues ! ³

Non-linéarité due au radiation damping ?

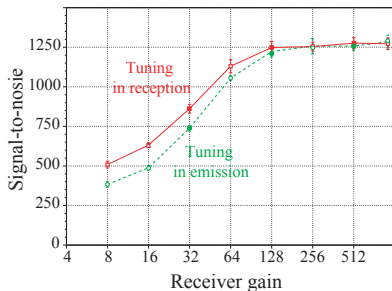
³rappels : $|K| < 25\,000$, $T_1 \approx 8$ min, durée exp. 9 min

Sommaire

- 1 Pourquoi étudier un système de spins hyperpolarisé ?
- 2 Couplages dipolaires à longue distance
- 3 Xénon hyperpolarisé dissous : le système à l'étude
- 4 SPIDER : transfert de polarisation cohérent
- 5 Émissions maser chaotiques non déclenchées
- 6 Questions en suspens
- 7 Perspectives : augmenter la sensibilité de détection

Utiliser des μ -bobines

- ① Optimiser l'accord de sonde : gain SNR de **0** \rightarrow **30 %**

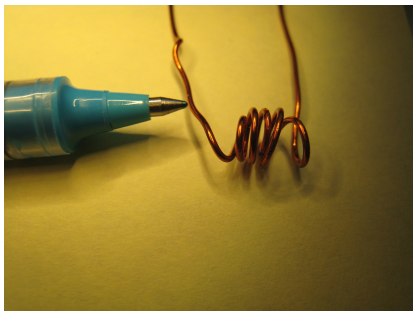


Utiliser des μ -bobines

- ① Optimiser l'accord de sonde : gain SNR de **0** \rightarrow **30 %**
- ② μ -bobines : gain en ηQ jusqu'à un **facteur 100**

Utiliser des μ -bobines

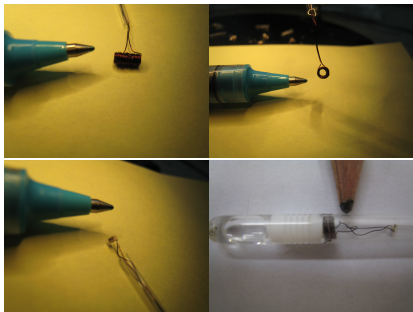
- ① Optimiser l'accord de sonde : gain SNR de **0** \rightarrow **30 %**
- ② μ -bobines : gain en ηQ jusqu'à un **facteur 100**



- apprentissage technique...

Utiliser des μ -bobines

- ① Optimiser l'accord de sonde : gain SNR de **0** \rightarrow **30 %**
- ② μ -bobines : gain en ηQ jusqu'à un **facteur 100**



- déjà un **facteur 12** en E/R!
- μ -résonateurs : augmenter Q ?

Utiliser des μ -bobines

- ① Optimiser l'accord de sonde : gain SNR de **0** \rightarrow **30 %**
- ② μ -bobines : gain en ηQ jusqu'à un **facteur 100**
- ③ Détection optique, à venir : gain ... **> 10^4** !