

Squeezing de Spins Nucléaires

**Etude théorique de squeezing
du spin nucléaire de l'hélium 3
dans son état fondamental en utilisant
les collisions d'échange de métastabilité**

Reinaudi Gaël

Stage de DEA Laser-Matière, MIP 3^{ème} année

Responsable de stage : Alice Sinatra
Laboratoire Kastler Brossel, Département de physique de l'ENS
alice.sinatra@lkb.ens.fr

27 Mars - 2 Juillet 2004

1 Présentation du cadre du stage

Mon stage de DEA s’est effectué du 27 mars au 2 juillet au Laboratoire Kastler-Brossel de l’Ecole Normale Supérieure.

Dans l’équipe du groupe “fluides quantiques” qui m’a accueilli, Franck Lalœ et ma responsable de stage, Alice Sinatra, étaient intéressés par l’étude théorique du “**squeezing du spin nucléaire de l’atome d’hélium 3 en utilisant les collisions d’échange de métastabilité**”.

2 Le squeezing

Quand un ensemble de N atomes est polarisé dans une direction \vec{x} , l’inégalité d’Heisenberg implique une incertitude sur la mesure des composantes transverses de spin S_y et S_z qui ne commutent pas entre elles.

$$\Delta S_y \cdot \Delta S_z \geq \frac{1}{2} |\langle [S_y, S_z] \rangle| = \frac{1}{2} \langle S_x \rangle = \frac{N}{4}$$

(on se place en unités atomiques : $\hbar = 1$).

En absence de corrélations entre atomes (coherent spin state), on atteint l’égalité avec : $\Delta S_y = \Delta S_z = \frac{\sqrt{N}}{2}$. Cette incertitude fondamentale de $\frac{\sqrt{N}}{2}$ est le “bruit quantique standard”, et on peut atteindre cette limite lors de mesures très précises. Le champ électromagnétique dans un état cohérent possède aussi un bruit quantique standard, appelé “shot noise”.

Le squeezing consiste en la réduction du bruit d’une composante transverse du spin, par exemple S_y , sous le seuil du bruit quantique standard. L’inégalité d’Heisenberg implique alors une augmentation du bruit de l’observable S_z . Le

$$\begin{aligned} \Delta S_y &= \xi \cdot \frac{\sqrt{N}}{2} < \frac{\sqrt{N}}{2} \\ \Delta S_z &= \frac{1}{\xi} \cdot \frac{\sqrt{N}}{2} > \frac{\sqrt{N}}{2} \end{aligned}$$

spin squeezing est déjà beaucoup étudié pour ses propriétés intéressantes dans les mesures de précision en interférométrie atomique (horloges), ou encore dans le stockage d’états quantiques de la lumière (mémoires).

Cependant, les atomes dont on a squeezé le spin sont très sensibles à la décohérence (collisions, émission spontanée), et le squeezing n’y subsiste pas plus d’une demi-milliseconde typiquement.

3 Sujet du stage

Dans la perspective de protéger le squeezing de la décohérence, le but initial de mon stage était d’étudier la possibilité de squeezer le spin des atomes d’hélium 3 dans leur état fondamental. En effet l’hélium 3 dans son état fondamental 2^1S_0 possède un spin purement nucléaire $F = I = \frac{1}{2}$, et une cohérence stockée dans ce niveau, au cœur de l’atome, peut subsister pendant des heures. Par ailleurs, cet atome possède un état métastable 2^3S qui peut servir d’état de départ pour des transitions accessibles par laser et qui peut donc être utilisé pour

créer des corrélations entre les spins des atomes. Les collisions dites d'échange de métastabilité, qui sont couramment utilisées pour transférer l'orientation des spins de l'état métastable à l'état fondamental et créer de la polarisation nucléaire, pourraient servir de couplage entre le fondamental et le métastable afin de "transférer" le squeezing à l'état fondamental de l'atome.

Le sujet du stage était donc une étude théorique suivie d'une étude de faisabilité de l'expérience qui réaliserait une mémoire quantique à l'aide de spins nucléaires de l'hélium 3 dans son état fondamental.

4 Déroulement du stage

Après avoir lu les articles directement liés au sujet, j'ai dû me familiariser avec le traitement quantique des champs en cavité et avec le théorème de régression quantique.

Lors de mon stage, j'ai étudié deux schémas possibles pour squeezer les spins nucléaires :

Le premier est basé sur une expérience de E.S.Polzik : squeezing de spins collectifs à partir de champs cohérents, par mesure Quantique Non-Destructive (QND). Nous en avons adapté la théorie pour un traitement des champs en cavité (formalisme de l'équation pilote), puis, nous y avons ajouté l'évolution due à l'échange de métastabilité. J'ai eu à déterminer les équations d'évolution pour les populations et les cohérences.

J'ai calculé les spectres de corrélations ainsi que les corrélations à temps égaux par différents moyens (*Calculation of quantum correlation spectra using the regression theorem*, *Eur. Phys. J. D* 12, 339-349).

La deuxième approche a été élaborée, à partir d'un article de A. Dantan et M. Pinard (LKB-Jussieu) : *Quantum-state transfer between fields and atoms in electromagnetically induced transparency*, *PRA* 69, 043810 (2004). Nous avons adapté cette étude théorique à la structure de l'atome d'hélium, et y avons ajouté les équations régissant l'échange de métastabilité. Une méthode de résolutions semi-classique (équations classiques avec forces de Langevin) nous a permis de calculer les variances à temps égaux.

Des réunions régulières ont ponctué le déroulement du stage : avec Franck Lalœ, au début du stage pour poser les fondements du problème et à la fin pour faire le bilan ; avec Michel Pinard et Aurélien Dantan (LKB-Jussieu), une fois par mois pour discuter les résultats et les comparer ; avec ma responsable de stage, quotidiennement.

5 Outils de travail

J'ai été amené à programmer un logiciel de calcul formel (Maple) pour calculer les équations impliquant 10 niveaux atomiques (soit 100 populations et cohérences) et deux champs électromagnétiques. J'ai créé un programme calculant automatiquement les commutateurs et les évolutions hamiltoniennes et dissipatives, ainsi qu'un programme calculant l'évolution due à l'échange.

6 Résultats obtenus

6.1 Squeezing par mesure QND

La méthode inspirée de l'expérience de E.S.Polzik, a montré que squeezer le fondamental de l'atome d'hélium par mesure QND était théoriquement possible, mais dans des conditions inatteignables expérimentalement (nécessitant de stocker un photon dans une cavité pendant une seconde).

6.2 Squeezing par transfert d'un vide squeezé aux atomes

C'est ce qui nous a amenés à nous pencher sur l'autre méthode : squeezing transféré du champ aux atomes par Transparence Electromagnétiquement Induite (EIT). Cette méthode s'avère très prometteuse puisqu'il semble non seulement possible de squeezer sélectivement le métastable ou le fondamental à partir d'un champ vide squeezé, mais aussi, de relire le squeezing stocké à un moment ultérieur.

6.3 Perspective d'expérience

Mon équipe d'accueil et l'équipe d'optique quantique du LKB-Jussieu sont motivées par la mise en place de l'expérience liée à cette théorie (expérience qui serait alors mon sujet de thèse). Il reste à confirmer la faisabilité théorique en incluant dans le modèle d'autres effets, négligés jusqu'alors, comme l'effet Doppler pour un ensemble d'atomes chauds, ou encore la présence d'un faible champ magnétique. En effet, les fréquences de Larmor du métastable et du fondamental ont un facteur 10^3 de différence et une telle différence ne favorise pas le couplage fondamental-métastable. Un résultat très récent semble montrer que l'expérience est réalisable avec un champ de l'ordre du milliGauss.

7 Conclusion

En plus de l'intérêt que le sujet d'étude a éveillé en moi durant tout le stage, j'ai eu l'occasion de découvrir une ambiance de travail très stimulante au sein d'une équipe particulièrement agréable. J'ai eu l'impression, pendant ces trois mois, de construire la partie théorique nécessaire au montage d'une expérience prometteuse qui deviendrait mon sujet de thèse.