

Etude du taux de chauffage d'un ion piégé dans un micropiège de Paul planaire par analyse de sa dynamique de fluorescence.

Lucas Gabardos

Equipe Ions Piégés et Information Quantique (IPIQ), laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques (MPQ),
Université Paris Diderot – Paris VII

Encadrant : Luca Guidoni, chargé de recherche au CNRS

Mots clés : ions froids, ions piégés, refroidissement laser, effet Doppler, chauffage anormal, transition atomique.

• Introduction

Les années 1980 ont vu l'émergence d'un nouveau domaine de la physique, l'information quantique, qui utilise les principes de la mécanique quantique (intrication et superposition) pour traiter l'information. Sa mise en œuvre repose sur l'utilisation de qubits (superposition de deux états orthogonaux $|0\rangle$ et $|1\rangle$) en lieu et place des bits classiques (état 0 ou 1) ce qui permet d'effectuer plus efficacement qu'avec un ordinateur classique du calcul combinatoire, des simulations de systèmes quantiques complexes...

Les ions piégés refroidis par laser sont de bons candidats pour jouer le rôle de qubits dans les futurs calculateurs quantiques, ils ont en effet de longs temps de cohérence et leurs états quantiques peuvent être manipulés par interaction lumière-matière.

Les ions utilisés dans l'équipe sont des ions strontium⁺, ils sont piégés dans un piège de Paul planaire à cinq électrodes (Figure 1.) placé dans une enceinte ultra-vide ($\sim 5 \cdot 10^{-11}$ mbar). Ces micropièges permettent la création de dispositifs intégrables, cependant leur taille rend les ions plus sensibles à leurs imperfections notamment en les faisant chauffer anormalement ce qui est source d'erreurs. L'étude du taux de chauffage d'un ion dans le piège permet d'identifier les imperfections qui entrent en jeu dans ce chauffage dans le but de les éliminer. Les pistes explorées sont la dépendance en la hauteur de piégeage, l'état de la surface du piège et les matériaux utilisés pour sa fabrication.

zone de piégeage

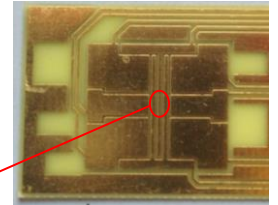


Figure 1. – piège de Paul planaire.

• Objectifs

Mes buts pour ce stage ont, dans un premier temps, été l'étude des taux de chauffage des ions lors des expériences de ce début d'année, ce qui est passé par la traduction de Matlab en Scilab des programmes de récupération et traitement des données de ces expériences et par leur amélioration en finissant d'implémenter la méthode d'extraction du taux de chauffage de l'ion à partir de l'analyse de sa dynamique de fluorescence selon les idées développées dans la référence [1] (Doppler re-cooling). Dans un second temps, j'ai contribué à la mise en place d'un asservissement numérique en fréquence d'un laser à l'aide du module Digilock 110 de Toptica.

• Méthodes

Le processus expérimental est le suivant : les lasers de refroidissement et de repompage sont éteints pendant quelques secondes durant lesquelles l'ion peut chauffer et sont ensuite rallumés pendant quelques centaines de ms (le temps que l'ion soit refroidi). Les photons émis pendant le refroidissement (Figure 2.) sont captés par un photomultiplicateur (PM) avec une résolution de l'ordre de quelques dizaines de μ s. Cette opération est répétée une centaine de fois par expérience.

Le refroidissement est effectué de deux manières, avec un système à 3 niveaux (3N) et avec un pseudo-système à 2 niveaux (2N) qui évite le piégeage cohérent de population dû au fait que les lasers de refroidissement et de repompage sont couplés au même niveau (Figure 2.).



Figure 2. – Structures de niveaux d'un ion Sr^+ avec en traits pleins les lasers (bleu : refroidissement, rouge : repompage) et en traits pointillés les chemins de désexcitation spontanée (en bleu clair les photons captés par le PM). Le schéma a. correspond au système 3N et le b. au 2N.

Parallèlement à l'acquisition de ces données sont régulièrement acquis des spectres de refroidissement (Figure 3.) permettant de connaître la fluorescence en fonction du désaccord entre la fréquence du laser est celle correspondant à la différence d'énergie entre les niveaux $S_{1/2}$ et $P_{1/2}$. Ces spectres sont ajustés par une lorentzienne dont les paramètres (largeur Γ du niveau $P_{1/2}$ et paramètre s de saturation) sont utilisés comme paramètres effectifs du système. Le programme Scilab récupère les données expérimentales, il permet de séparer le signal, le fond (absence d'ion) et les données anormales (ion ayant subi un choc...). Les données signal et fond sont sommées et moyennées sur le nombre de cycle puis la moyenne du fond est retirée au signal.

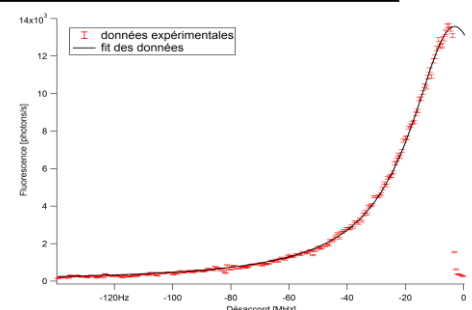


Figure 3. – Spectre de refroidissement d'un ion Sr^+ ajusté par une lorentzienne.

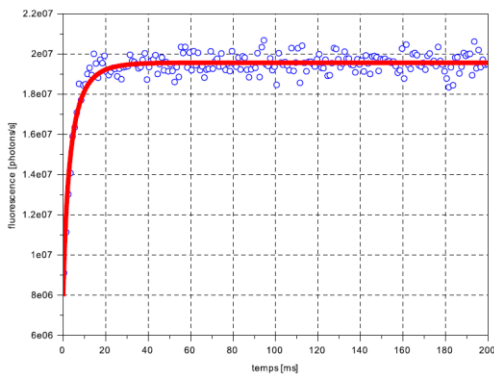


Figure 4. – Fluorescence en fonction du temps. En bleu points expérimentaux, en rouge ajustement effectué avec Scilab.

Le programme permet ensuite de retrouver grâce aux paramètres Γ et s , le désaccord Δ effectif de l'expérience. Comme présenté en [1], on peut alors obtenir par intégration l'évolution de l'énergie en fonction du temps ce qui permet d'ajuster par une méthode des moindres carrés la courbe de fluorescence théorique à la courbe expérimentale (Figure 4.). On obtient ainsi l'énergie moyenne de l'ion à la fin de la période de chauffage et donc, connaissant la durée du chauffage, le taux de chauffage.

Comme on a pu constater lors de cette analyse, la stabilité du laser de refroidissement est un élément essentiel pour limiter l'erreur sur les données, c'est pourquoi on implémente une méthode numérique d'asservissement du laser de refroidissement sensée être plus performante que la méthode analogique. Le Digilock 110 permet de visualiser la courbe d'absorption du rubidium contenu dans une cellule chauffée. Le profil gaussien (Figure 5.a.) est dû au fait que le faisceau sonde et le faisceau saturant n'agissent pas sur les mêmes atomes à cause de l'effet Doppler, tandis que lorsque le laser est précisément à la fréquence de la transition, il y a un pic (Figure 5.b.) car les deux faisceaux agissent sur les mêmes atomes (ceux immobiles).

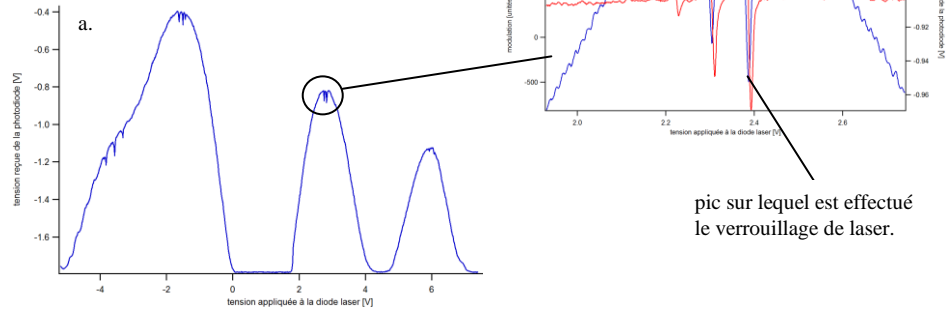
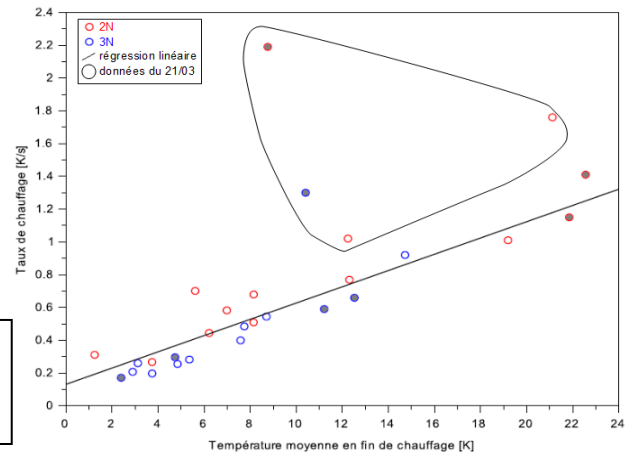


Figure 5. – Spectre d'absorption du Rubidium en bleu et signal modulé en rouge. En b. la transition du Rb qui nous intéresse (fréquence proche de celle du Sr).

• Résultats

Les expériences de ce début d'année avaient pour but de vérifier l'indépendance du taux de chauffage par rapport à plusieurs paramètres. On a donc pu montrer qu'il était indépendant de la durée de chauffage de l'ion et de la date à laquelle l'expérience a été effectuée (avec l'exception du 21/03, ce qui n'a pas trouvé d'explication) et qu'avec les paramètres de désaccord utilisés, les systèmes 2N et 3N étaient équivalents. Cependant la courbe présentée en Figure 6. semble indiquer une dépendance du taux de chauffage en la température moyenne de l'ion en fin de chauffage.

Figure 6. – évolution du taux de chauffage en fonction de la température finale de l'ion. Les points grisés représentent les données peu fiables (spectre ayant changé avant et après l'expérience, mauvais fit...). La régression linéaire a été faite sans ces points et sans ceux du 21/03.



En ce qui concerne le verrouillage du laser, un battement a pu être observé avec le laser de refroidissement asservi de manière analogique, l'asservissement par la méthode numérique est donc fonctionnel, cependant la largeur du pic observé au spectromètre pour la fréquence du battement était un peu trop importante, l'efficacité de l'asservissement numérique peut sans doute être améliorée.

• Conclusion

La prochaine étape dans l'étude du taux de chauffage de l'ion sera de nettoyer la surface du piège par exemple par laser pulsé [2], cependant il est nécessaire avant cela de déterminer la source de la dépendance du taux de chauffage en la température finale de l'ion ou si les écarts observés sont dus aux incertitudes ou à des erreurs.

Il serait également possible d'inclure l'ajustement des courbes de refroidissement au programme Scilab de façon à ce qu'il récupère lui-même les paramètres Γ et s , cette opération étant actuellement effectuée avec le logiciel Igor Pro.

L'asservissement numérique du laser peut quant à lui sans doute être amélioré notamment en trouvant les paramètres des PID qui minimisent la largeur du pic observé lors de la spectrométrie du phénomène de battement.

Références

- [1] J. H. Wesenberg, R. J. Epstein *et al*, *Fluorescence during Doppler cooling of a single trapped atom*, Phys. Rev. A 76, 53416 (2007).
- [2] D. T. C. Allcock, L. Guidoni *et al*, *Reduction of heating rate in a microfabricated ion trap by pulsed-laser cleaning*, New Journal of Physics 13, 123023 (2011).