

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE
LABORATOIRE KASTLER BROSSEL

THÈSE DE DOCTORAT
DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE

Spécialité : **PHYSIQUE QUANTIQUE**

Atomes de Rydberg piégés

présentée par

Tigrane Cantat-Moltrecht

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE

Soutenue le 18 devant le jury composé de :

Dr. Michel BRUNE	Directeur de thèse
Dr. Thierry LAHAYE	Rapporteur
Pr. Shannon WHITLOCK	Rapporteur
Dr. Bruno LABURTHERIE-TOLRA	Examineur
Pr. Jonathan HOME	Examineur
Pr. Agnès MAITRE	Examineur

To science

Table des matières

Table des figures	v
Introduction	1
1 Atomes de Rydberg alcalins en interaction	3
1.1 Théorie générale des Rydberg	3
1.1.1 Hamiltonien de l'atome de Rydberg et défaut quantique	3
1.1.2 Niveaux à bas l	3
1.1.3 Niveaux circulaires	3
1.2 Atomes de Rydberg en interaction	3
1.2.1 Deux atomes de Rydberg	3
1.2.2 les interactions entre Rydberg de bas l	4
1.2.3 les interactions entre Rydberg circulaires	4
2 Des atomes de Rydberg froids en environnement cryogénique	5
2.1 Les atomes froids	5
2.1.1 le cryostat et la puce	5
2.1.2 séquence de piégeage et refroidissement	5
2.1.3 imagerie atomique	5
2.1.4 nuages typiques	6
2.2 Excitation et détection d'atomes de Rydberg près d'une puce	6
2.2.1 schéma d'excitation	6
2.2.2 schéma de détection	6
2.2.3 problème des champs électriques et flash de Rb	6
2.2.4 compensation et contrôle des champs	6
2.2.5 manipulation et observation des Rydbergs	6
3 Interaction entre atomes de Rydberg sphériques et excitation de gaz dense	9
3.1 Régimes d'excitation en nuage dense : blocage et facilitation	9
3.1.1 Rappels sur l'interaction	9
3.1.2 mouvement des atomes au sein d'un gaz dense de Rydberg	9
3.1.3 Le blocage dipolaire et la facilitation	9
3.2 Spectroscopie optique du nuage	9
3.2.1 Description de la manip	9
3.2.2 Données : élargissement de la raie laser par interactions	9
3.3 Modèle de la dynamique d'excitation	10

3.3.1	Simulations	10
3.3.2	Les limites du modèle	10
3.4	Spectroscopie microonde du nuage : voir le mouvement	10
3.4.1	Description de la manip	10
3.4.2	Données et accord avec les simulations	10
4	Les atomes de Rydberg circulaires en interaction : vers un simulateur quantique	11
5	Des atomes de Rydberg circulaires sur puce	13
5.1	Comment exciter des atomes de Rydberg circulaires	13
5.2	Comment caractériser les atomes de Rydberg circulaires	13
5.3	Éjectable : Première évidence du piégeage des atomes circulaires	14
	Conclusion	15

Table des figures

Introduction

Chapitre 1

Atomes de Rydberg alcalins en interaction

1.1 Théorie générale des Rydberg

1.1.1 Hamiltonien de l'atome de Rydberg et défaut quantique

l'atome d'hydrogène : énergie des niveaux $E(n, l, j) = -\frac{E_I}{n^2}$ avec $E_I = \frac{1}{1+\frac{m_e}{M}} \frac{m_e q^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2}$
l'énergie d'ionisation de l'électron dans le niveau 1S de l'atome d'hydrogène. États propres : $\psi(r, \theta, \phi) = R_{nl}(r) \cdot Y_l^{m_l}(\theta, \phi)$
+ structure fine j, m_j

le défaut quantique comme un n effectif :

$$E(n, l, j) = \frac{E_I}{(n - \delta_{nlj})^2}$$

avec $\delta(n, l, j) = \delta_{lj,0} + \frac{\delta_{lj,2}}{(n - \delta_{lj,0})^2} + \frac{\delta_{lj,4}}{(n - \delta_{lj,0})^4} + \frac{\delta_{lj,6}}{(n - \delta_{lj,0})^6} + \dots$
donner la table des défauts quantiques

mention de calcul du dipôle entre niveaux de Rydberg $\langle n, l, j, m_j | q\mathbf{r} | n', l', j', m'_j \rangle$

1.1.2 Niveaux à bas l

taille, dipole transitions vers niveaux proches, émission spontanée, temps de vie

1.1.3 Niveaux circulaires

taille, dipole transitions vers niveaux proches, émission spontanée, temps de vie

1.2 Atomes de Rydberg en interaction

1.2.1 Deux atomes de Rydberg

hamiltonien d'interaction entre deux dipôles

$$V_{dd} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^3} \left(\mathbf{d}_1 \cdot \mathbf{d}_2 - 3(\mathbf{d}_1 \cdot \frac{\mathbf{r}}{r})(\mathbf{d}_2 \cdot \frac{\mathbf{r}}{r}) \right)$$

de l'interaction dipole-dipole générale au terme de Van der Waals en $1/r^6$
terme d'énergie et terme d'échange

1.2.2 les interactions entre Rydberg de bas l

origine du C_6 pour 60s-60s et C_6/A_6 avec les voisins
reprendre Raul.figI.3 qui présente la partie radiale du dipôle 60s-ns en fonction de n
principe du blocage dipolaire et facilitation (rapide)

1.2.3 les interactions entre Rydberg circulaires

C_6 pour 50c-50c et C_6/A_6 avec les voisins
attention à l'anisotropie
équivalent de la figure ci dessus (Raul.figI.3) pour les 50c, à modifier pour l'anisotropie

Chapitre 2

Des atomes de Rydberg froids en environnement cryogénique

2.1 Les atomes froids

2.1.1 le cryostat et la puce

schéma et description du cryostat

schéma et description de la puce supra et des bobines supra

2.1.2 séquence de piégeage et refroidissement

piégeage magnéto-optique : 2D-MOT, QUAD-MOT, U-MOT

piégeage magnétique de Ioffe Pritchard : principe et potentiel créé par le fil Z (cf. code Mathematica Radia)

refroidissement évaporatif jusqu'au BEC : principe de l'évaporation RF et fils d'évap sur la puce

2.1.3 imagerie atomique

optique d'imagerie : schéma optique et caractéristiques des caméras

imagerie par absorption : transition sonde, intensité de saturation

imagerie par réflexion sur la puce : spécificités de la géométrie et double absorption du faisceau sonde

tweaks : absorption no-log et réduction des franges : qu'a-t-on utilisé comme méthodes de traitement pour améliorer notre imagerie → un paragraphe sur la réduction de franges et un(ou deux) paragraphe(s) sur l'absorption no-log et sa pertinence dans les mesures de mélasses.

2.1.4 nuages typiques

quels MOTs, mélasses et nuages froids obtenus : tailles, températures, nombres d'atomes, distance à la puce.

2.2 Excitation et détection d'atomes de Rydberg près d'une puce

2.2.1 schéma d'excitation

schéma de niveau de l'excitation à deux photons (Raul.figIII.1) et caractéristiques de l'excitation à deux photons (Rabi vs Detuning du niveau intermédiaire)
schéma laser - puce - électrodes et petit mot sur la géométrie des faisceaux

2.2.2 schéma de détection

principe de la détection par ionisation
implémentation : géométrie des électrodes d'ionisation, de déflexion et du channeltron avec une rampe de champ, on peut savoir quel niveau est détecté → principe des arrivées et note sur l'ionisation diabatique vs adiabatique.

2.2.3 problème des champs électriques et flash de Rb

on travaille près d'une puce qui est une surface, et avec des objets ultra-sensibles -> ça peut créer des problèmes!
vieilles raies larges et moches : expliquer par l'effet Stark quadratique et l'élargissement inhomogène.
potentiel de contact et flash de Rb : dessins et schéma + dispensers et leur emplacement et boîte de protection
c'est magiques, ça nous donne de belles raies fines!

2.2.4 compensation et contrôle des champs

c'est bien d'avoir ces raies fines mais on veut contrôler le champ électrique le mieux possible électrode Vcomp et schéma de contrôle mixte excitation/détection. Le contrôle du champ sur Oy c'est bien, ça permet de faire plein de trucs, mais il reste des gradients (au moins).

si on veut faire encore mieux, il faut contrôler les champs selon Ox et Oy → électrodes RF :

schéma d'installation des électrodes

SIMION pour vérifier que ça permet de créer des champs y compris très près de la puce en plus, ça servira de source de RF polarisée!!

2.2.5 manipulation et observation des Rydbergs

C'est bien de détecter des Rydberg, mais il faut aussi pouvoir les manipuler et les caractériser. Pour ça, on a un outil fabuleux : la spectroscopie microonde vers les

2.2. EXCITATION ET DÉTECTION D'ATOMES DE RYDBERG PRÈS D'UNE PUCET

niveaux voisins!

schéma de niveaux? schéma de dispositif?

on peut mentionner ici qu'avec ça on a pu calibrer les champs électriques résiduels, et faire un qubit $60s - 61s$ qui vit très longtemps.

Conclusion

On a un dispositif lourd et complexe mais qui permet de faire beaucoup de belles choses avec des Rydbergs ultra-froids.

Chapitre 3

Interaction entre atomes de Rydberg sphériques et excitation de gaz dense

3.1 Régimes d'excitation en nuage dense : blocage et facilitation

3.1.1 Rappels sur l'interaction

hamiltonien d'interaction de paire

approximation de N atomes comme somme de $\frac{N(N-1)}{2}$ paires

3.1.2 mouvement des atomes au sein d'un gaz dense de Rydberg

traitement classique du mouvement et ordres de grandeurs pertinents

3.1.3 Le blocage dipolaire et la facilitation

les deux régimes d'excitation déterminée par les interactions :

explication du blocage dipolaire, et des effets qui le limitent (ailes de la gaussienne du nuage)

pourquoi c'est difficile dans un BEC : mention du Pfau shift

mention de la négligeabilité des excitations de paires ?

3.2 Spectroscopie optique du nuage

3.2.1 Description de la manip

spectres à différents temps d'interaction

ou $N_{rydberg}$ en fonction du temps d'interaction pour différents detunings

3.2.2 Données : élargissement de la raie laser par interactions

conséquence de la facilitation

3.3 Modèle de la dynamique d'excitation

3.3.1 Simulations

modèle d'équation de taux
résultats de simulations comparés aux manip

3.3.2 Les limites du modèle

photons thermiques et apparition de niveaux p
LIRE T. PORTO

3.4 Spectroscopie microonde du nuage : voir le mouvement

3.4.1 Description de la manip

spectroscopie 60s-57s et son spectre d'excitation : comment cela nous donne accès au spectre des énergies d'interaction
sonder le nuage à différents moments de son explosion

3.4.2 Données et accord avec les simulations

présenter les courbes de Raul.IV.3.2

Conclusion

il faut prendre en compte le mouvement, mais aussi les transferts thermiques vers les niveaux p

Chapitre 4

Les atomes de Rydberg circulaires en interaction : vers un simulateur quantique

Reprendre le PRX

Chapitre 5

Des atomes de Rydberg circulaires sur puce

5.1 Comment exciter des atomes de Rydberg circulaires

5.1.1 Les niveaux atomiques du fondamental au Rydberg circulaire

schéma de niveaux et Stark maps

5.1.2 Spectroscopie 5s-50d

en champ nul et en champ non-nul -> choix de m_j

5.1.3 Spectroscopie 50d-50f

en champ nul et en champ non-nul -> choix de m_l et problème d'élargissement Stark

Le passage adiabatique

présenter le principe du passage adiabatique (cf Jay, Brian, Eva) et le dispositif radio-fréquence tel qu'il est chez nous

5.2 Comment caractériser les atomes de Rydberg circulaires

5.2.1 Spectroscopie microonde vers les niveaux voisins

50c-51c et optimisation de la RF

50c-49c ?

5.2.2 Temps de vie

temps de vie théorique, temps de vie mesuré, température effective

5.2.3 Temps de cohérence

franges de Ramsey

5.3 Éjectable : Première évidence du piégeage des atomes circulaires

5.3.1 Dispositif laser de piégeage

description de l'optique de mise en forme
et caractérisation du faisceau de piégeage

5.3.2 Comment observer le piégeage des atomes circulaires

problème du temps de vie qui empêche d'observer l'absence de chute libre
comment observer un piégeage de niveaux qui ne vivent pas longtemps ? propositions
envisagées
premiers signaux s'ils existent

Conclusion

Annexes

Laser Trapping of Circular Rydberg Atoms

Abstract: Quantum simulation offers a highly promising way to understand large correlated quantum systems, and many experimental platforms are now being developed. Rydberg atoms are especially appealing thanks to their strong and short-range dipole-dipole interaction.

In our setup, we prepare and manipulate ensembles of Rydberg atoms excited from an ultracold atomic cloud magnetically trapped above a superconducting chip. The dynamics of the Rydberg excitation can be controlled through the laser excitation process. The many-body atomic interaction energy spectrum is then directly measured through microwave spectroscopy. This thesis develops a rigorous Monte Carlo model that provides an insight into the excitation process. Using this model, we discuss a possibility to explore quantum simulations of energy transport in a 1D chain of low angular momentum Rydberg atoms.

Furthermore, we propose an innovative platform for quantum simulations. It relies on a groundbreaking approach, based on laser-trapped ensemble of extremely long-lived, strongly interacting circular Rydberg atoms. We present intensive numerical results as well as discuss a wide range of problems that can be addressed with the proposed model.

Keywords: quantum simulation, Rydberg atoms, circular atoms, dipole-dipole interaction, atom chip, microwave spectroscopy

Piégeage laser d'atomes de Rydberg circulaires

Résumé : La simulation quantique offre un moyen très prometteur pour comprendre les systèmes quantiques corrélés macroscopiques. De nombreuses plateformes expérimentales sont en cours d'élaboration. Les atomes de Rydberg sont particulièrement intéressants grâce à leur forte interaction dipolaire de courte portée. Dans notre manip, nous préparons et manipulons des ensembles d'atomes de Rydberg excités à partir d'un nuage atomique ultra-froid piégé magnétiquement sur une puce à atome supraconductrice. La dynamique de l'excitation est contrôlée par le processus d'excitation du laser. Le spectre d'énergie d'interaction atomique des N corps est mesuré directement par spectroscopie micro-onde. Dans cette thèse, nous développons un modèle Monte Carlo rigoureux qui nous éclaire sur le processus d'excitation. En utilisant ce modèle, nous discutons de la possibilité de réaliser des simulations quantiques du transport d'énergie sur une chaîne 1D d'atomes de Rydberg de faible moment angulaire. De plus, nous proposons une plateforme innovante pour la réalisation de simulations quantiques. Elle repose sur une approche révolutionnaire basée sur un ensemble d'atomes de Rydberg dont le temps de vie est extrêmement long, qui interagissent fortement et qui sont piégés par laser. Nous présentons les résultats de simulations numériques et nous discutons du large éventail de problèmes qui peuvent être traités avec le modèle proposé.

Mots-clés : simulation quantique, atomes de Rydberg, atomes circulaires, interaction dipolaire, puce à atome, spectroscopie micro-onde