

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 : des hydrogénoïdes géants | 3 |
| 1.1 Théorie générale des Rydberg | 3 |
| 1.2 Premier cas particulier : les interactions dipole-dipole et VdW à bas l . . | 3 |
| 1.3 Second cas particulier : les atomes de Rydberg circulaires | 3 |
| 1.4 Atomes de Rydberg circulaires en interaction | 4 |
| 2 Des atomes froids en environnement cryogénique | 5 |
| 2.1 Le cryostat | 5 |
| 2.2 La puce et les bobines | 5 |
| 2.3 Séquence de piégeage et refroidissement | 5 |
| 2.4 Imagerie atomique | 5 |
| 2.5 Nuages typiques | 6 |
| 3 Dispositif expérimental : des atomes de Rydberg sur puce | 7 |
| 3.1 Excitation et détection d'atomes de Rydberg | 7 |
| 3.2 Problème des champs électriques près d'une puce | 7 |
| 3.3 Spectroscopie microonde | 7 |
| 4 Interaction entre atomes de Rydberg sphériques | 9 |
| 4.1 Régimes d'excitation en nuage dense : blocage et facilitation | 9 |
| 4.2 Spectroscopie optique du nuage et simulations | 9 |
| 4.3 Spectroscopie microonde du nuage | 9 |
| 5 Des atomes de Rydberg circulaires sur puce | 11 |
| 5.1 Comment exciter des atomes de Rydberg circulaires | 11 |
| 5.2 Comment caractériser les atomes de Rydberg circulaires | 11 |
| 5.3 Théorie de la force pondéro-motrice appliquée aux 50C | 12 |
| 5.4 Piégeage des atomes circulaires | 12 |
| Conclusion | 13 |

Table des figures

Introduction

Chapitre 1

Atomes de Rydberg alcalins : des hydrogénoïdes géants

1.1 Théorie générale des Rydberg

Hamiltonien de l'atome d'hydrogène

particularités aux grands n

Défaut quantique : comment passer aux alcalins

le défaut quantique comme un n effectif quantitativement : $\delta_{n,l,j}$ pour les niveaux qui nous concernent

Les grandes caractéristiques des Rydberg

gigantisme du dipole, sensibilité au champ EM, interactions lois d'échelle

1.2 Premier cas particulier : les interactions dipole-dipole et VdW à bas l

Deux atomes de Rydberg

hamiltonien d'interaction dipole-dipole Van der Waals interaction d'échange

Blocage dipolaire

blocage et facilitation : preview ?

1.3 Second cas particulier : les atomes de Rydberg circulaires

L'effet Stark et les Rydberg en champ électrique

Stark maps à grand l

Niveaux paraboliques

échelle des niveaux de la multiplicité en champ « fort »

Caractéristiques des Rydberg circulaires

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

1.4 Atomes de Rydberg circulaires en interaction

petit flash forward vers le futur de la manip?

Chapitre 2

Des atomes froids en environnement cryogénique

2.1 Le cryostat

description rapide du cryostat

feedthrough pour les courants de bobines et de puce ?

2.2 La puce et les bobines

design de la puce et un petit mot sur la fabrication

bobines supras ?

2.3 Séquence de piégeage et refroidissement

Piégeage magnéto-optique

2d-mot, quad, u-mot, mélasse

Piégeage magnétique

pompage optique et piège magnétique

Refroidissement évaporatif jusqu'au BEC

dispositif de refroidissement RF

2.4 Imagerie atomique

Optique d'imagerie

front et side

L'imagerie par absorption

traitement d'image : absorption et absorption "nolog"
mention de la réduction des franges ?

2.5 Nuages typiques

qu'obtient-t-on comme MOTs, mélasse, nuages ultra-froids avec notre dispositif

Chapitre 3

Dispositif expérimental : des atomes de Rydberg sur puce

3.1 Excitation et détection d'atomes de Rydberg

Schémas d'excitation

schéma laser : schéma de niveaux (60s ou 50d) et schéma optique

Schémas de détection

state selective ionization signaux d'ionisation et toutes les subtilités

3.2 Problème des champs électriques près d'une puce

L'élargissement Stark inhomogène

raies de plusieurs dizaines de MHz de large, drift

Recouvrir la puce de rubidium

dispositif dispensers et raies fines

Contrôle du champ électrique

Lhomond et CdF, électronique de contrôle
électrodes RF pour la circularisation (Simion ?)

3.3 Spectroscopie microonde

mention rapide des domaines de transition entre les niveaux de Rydberg

Chapitre 4

Interaction entre atomes de Rydberg sphériques

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

Rappels sur l'interaction

hamiltonien d'interaction de paire

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

Le blocage dipolaire et la facilitation

les deux régimes d'excitation déterminée par les interactions
négligeabilité des excitations de paires

4.2 Spectroscopie optique du nuage et simulations

Élargissement de la raie laser par interactions

conséquence de la facilitation

Simulations

modèle d'équation de taux

résultats de simulations comparés aux manip

question du chauffage

4.3 Spectroscopie microonde du nuage

Spectre des énergies d'interaction du nuage

détails sur la spectro 60s-57s, dont la quasi absence de terme d'échange dans l'interaction

Mouvement du nuage de Rydbergs

Le gaz gelé ne marche pas !

Chapitre 5

Des atomes de Rydberg circulaires sur puce

5.1 Comment exciter des atomes de Rydberg circulaires

Les niveaux atomiques du fondamental au Rydberg circulaire

schéma de niveaux et Stark maps

Spectroscopie 5s-50d

en champ nul et en champ non-nul \rightarrow choix de m_j

Spectroscopie 50d-50f

en champ nul et en champ non-nul \rightarrow choix de m_l et problème d'élargissement

Le passage adiabatique

et le dispositif radio-fréquence

5.2 Comment caractériser les atomes de Rydberg circulaires

Spectroscopie microonde

50c-51c et optimisation de la RF

50c-49c ?

Temps de vie

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

Temps de cohérence

franges de Ramsey

5.3 Théorie de la force pondéro-motrice appliquée aux 50C

et description du laser de piégeage

5.4 Piégeage des atomes circulaires

chute par gravité et/ou expansion du nuage compensée par un tube de lumière

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