

## Synthèse de la thèse de doctorat :

### **Few and Many-body Physics in cold Rydberg gases**

#### Titre traduit :

### **Physique à quelques corps et à N-corps dans les gazes de Rydberg froids**

Paul Huillery

Ce document est une synthèse de la thèse de doctorat soutenue le 13 mars 2013 par Paul Huillery, dont le manuscrit complet est rédigé en anglais.

Cette synthèse comprend une introduction, une description des 5 chapitres développés dans le manuscrit avec une présentation succincte des principaux résultats obtenus, résumés dans une conclusion générale.

#### **I. INTRODUCTION**

La description d'un système physique est souvent faite à partir des interactions à 2-corps. Il y a deux bonnes raisons à cela. Premièrement, les interactions à 2-corps déterminent le comportement d'un grand nombre de systèmes. Deuxièmement, les interactions à 2-corps sont les seules qui peuvent être traitées exactement. Dès lors que 3 corps interagissent, on ne peut traiter le problème sans faire d'approximations (analytiquement), ceci est connu en physique comme le "problème à N-corps".

Cependant, la nature ne se soucie guère des solutions analytiques et certains systèmes physique nécessitent d'aller au delà des traitements à 2-corps. C'est le cas des noyaux, atomes, molécules, solides, étoiles ... Dans ces systèmes, les interactions mutuelles entre plus que 2-corps donne lieu à des phénomènes très intéressants. Décrire ces interactions est un grand challenge pour la physique fondamentale, les contrôler est une source indéniable de progrès technologiques.

Il existe deux principales approches pour traiter les systèmes à N-corps. Lorsque

l'on vise à décrire en détails un système, on est souvent limité à de petits systèmes (sous-systèmes) et l'on parle de physique à quelques corps. Une autre approche est de faire fi des détails pour extraire des comportements généraux, ceci est souvent adapté à la description de grands systèmes et l'on parle de physique à N-corps.

Les systèmes étudiés dans le cadre de cette thèse sont des gazes d'atomes froids.

Les techniques utilisées dans les expériences d'atomes froids ont été développées depuis plus de 50 ans et elles représentent un outil fantastique pour la physique atomique. Le développement de ces techniques a été reconnu par un prix Nobel, décerné en 1997 conjointement à Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji et William D. Phillips "pour le développement de méthodes pour refroidir et piéger des atomes avec de la lumière laser".

Pour former un gaz d'atomes froids, le mouvement des atomes est progressivement ralenti. Les techniques ultimes de refroidissement permettent d'atteindre la condensation de Bose-Einstein. Dans un condensat, tous les atomes ont le degré de mouvement minimum que leurs permet leurs nature quantique, ils se comportent de manière identiques et forment se que l'on appelle une onde de matière géante. Observer pour la première fois en 1995, la réalisation d'un condensat de Bose-Einstein à aussi été reconnue par un prix Nobel, décerné en 2001 conjointement à Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle et Carl E. Wieman.

Dans un condensat la température est de l'ordre de quelques nK et la vitesse thermique des atomes est inférieure à  $1 \text{ mm.s}^{-1}$ .

Dans les expériences menées au cours de cette thèse, partant d'un gaze d'atomes froids, des interactions entre atomes sont générer en créant des atomes de Rydberg.

Un atome de Rydberg est un atome dont un électron est dans un état très excité. Comparé à un atome dans son état fondamental, un atome de Rydberg à des propriétés exagérées. La plus parlante est sa taille. En fonction du nombre quantique principale  $n$  de l'électron de Rydberg, la taille de l'atome varie en  $n^2$ . La taille d'un atome de Rydberg dans l'état  $n = 100$  est de l'ordre de  $1 \mu\text{m}$ . Ceci est illustré sur la figure 1 où un atome de Rydberg est schématiquement représenté.

La très grande distance qui sépare l'électron de Rydberg du cur ionique confère aux

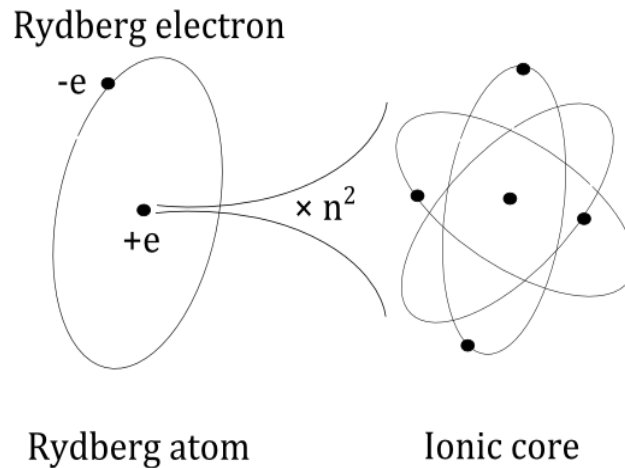


FIG. 1: Representation schématique d'un atome de Rydberg.

atomes de Rydberg une propriété fantastique : Les atomes de Rydberg sont extrêmement sensibles aux perturbations électromagnétiques.

Un champ électrique très faible modifie considérablement les états quantiques des atomes de Rydberg. Ceci est une manière très efficace de contrôler l'état interne des atomes de Rydberg dans les expériences.

En appliquant un champ électrique, on peut aussi ioniser les atomes de Rydberg. C'est d'ailleurs une manière très répandue de les détecter expérimentalement. Un atome de Rydberg dans l'état  $n = 100$  est ionisé à un champ électrique d'environ  $10 \text{ V.cm}^{-1}$ .

Cette sensibilité au champ électrique extérieur fait des atomes de Rydberg des systèmes très prometteurs pour réaliser des senseurs de champ électromagnétique de très grande précision.

Tel un paradigme de leur sensibilité, des atomes de Rydberg ont été utilisés pour implémenter une mesure non-destructive de photons uniques. Cette prouesse expérimentale fait parti du prix Nobel décerné en 2012 conjointement à Serge Haroche et David J. Wineland "pour les techniques expérimentales révolutionnaire permettant de mesurer et de manipuler des systèmes quantiques individuels".

Dans le cadre de l'étude des systèmes en interaction, on tire parti du fait que les atomes de Rydberg interagissent ensemble par des interactions électrostatique à longues portées.

Une particularité des interactions entre atomes de Rydberg est leurs modularités. Les

interactions peuvent être isotropique ou non, leurs dépendances radiales peuvent suivre différentes lois d'échelles, surtout la force des interactions dépend beaucoup des états de Rydberg considérés et prend de très grandes valeurs pour les états très excités.

Expérimentalement, le choix de l'état de Rydberg et l'application de champs électriques extérieur permet de modifier ces paramètres d'interaction de manière contrôlée.

Les gazes de Rydberg froids procurent des conditions très favorables à l'étude d'un ensemble de particules en interaction.

Un premier avantage est que l'on peut réaliser des expériences très courtes durant lesquelles les atomes ne bougent presque pas. Les expériences consistent alors en une image quasi statique du système étudié. Ceci donne lieu à de grandes simplifications pour le traitement théorique connues sous le nom de l'approximation des gazes gelés.

Deuxièmement, Les techniques d'atomes froids permettent de contrôler très précisément les propriétés de l'ensemble atomique, à commencer par sa forme. Dans ce cadre, l'utilisation de réseaux optiques offre des possibilités fantastiques. A titre d'illustrations, trois images de gazes d'atomes froids préparés dans différentes configurations sont représentés sur la figure 2.

Enfin, les gazes d'atomes froids sont des systèmes très dilués ou si l'on ne le souhaite pas, les atomes n'interagissent pas. Les interactions interatomiques donnant lieu à la physique à N-corps que l'on veut étudier sont générées de manière contrôlée. Car il n'existe pas naturellement dans le système d'effets similaires, il est possible d'observer expérimentalement les processus étudiés via des signaux clairs et bien isolés.

Dans le cadre de cette thèse, j'ai pris part à deux types de recherches expérimentales. L'une à Orsay, dans le groupe du Dr. Pierre Pillet, sous la direction de Dr. Daniel Comparat. L'autre à Pise, dans le groupe de Prof. Ennio Arimondo. Les expériences d'Orsay sont du type physique à quelques corps, celles de Pise du type physique à N-corps.

Les interactions entre atomes de Rydberg apparaissent tout d'abord en présence d'un champ électrique extérieur. Un faible champ électrique "déforme" les atomes de Rydberg qui acquièrent alors un moment dipolaire électrique permanent. En présence d'un champ électrique, les atomes de Rydberg interagissent comme des dipôles électriques classiques.

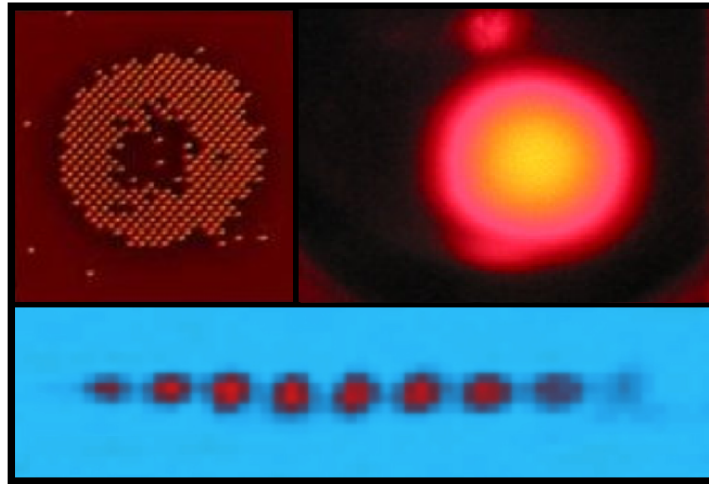


FIG. 2: Gazes d'atomes froids dans différentes conditions. En haut à gauche, image par fluorescence d'atomes de rubidium uniques confinés dans un réseau optique à deux dimensions, en régime de Mott-Insulator. Cette image à été obtenue dans le groupe du Prof. Immanuel Bloch à Munich, tirée de <http://www.quantum-munich.de>. En haut à droite, Photographie d'un piège magnéto-optique de lithium contenant environ 10 milliard d'atomes. Cette photo à été prise dans le groupe du Prof. Tilman Esslinger à Zurich, tiré de <http://www.quantumoptics.ethz.ch>. En bas, image par absorption prise "in-situ" d'un condensat de rubidium séparé en paquets en utilisant un réseau optique à 1 dimension, les paquets contiennent en moyenne 10 milles atomes. Cette image à été obtenue dans le groupe du Prof. Ennio Arimondo à Pise, durant cette thèse.

En l'absence de champ électrique extérieur, les atomes de Rydberg interagissent aussi. On parle dans ce cas d'interactions entre dipôles induits plus connues sous le nom d'interactions de Van-der-Waals.

Dans ce cas, il existe des situations très intéressantes où l'interaction entre dipôles induits prend des valeurs très grandes. On appelle ces situations des résonances de Förster, elles apparaissent "accidentellement" lorsque l'énergie de deux états de Rydberg à 2-corps sont égales. Les deux atomes de Rydberg interagissent alors par le biais d'un échange résonant d'excitation, représenté schématiquement sur la figure 3.

Expérimentalement, on peut volontairement se placer dans ces situations en appliquant un très petit champ électrique qui amène à résonance les énergies de deux états quantiques à 2-corps particuliers.

Une partie de cette thèse à consistée à la réalisation de ces résonance de Förster dans un

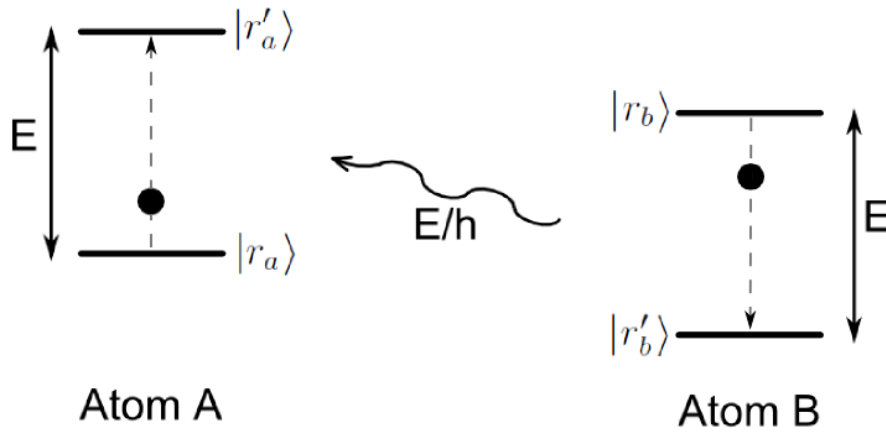


FIG. 3: Représentation schématique d'une paire d'atomes de Rydberg interagissant via une résonance de Förster. Les deux atomes interagissent à travers l'échange d'un photon "virtuel", l'interaction est considérablement favorisée par le caractère résonant du processus :  $E_{|r_a\rangle} + E_{|r_b\rangle} = E_{|r'_a\rangle} + E_{|r'_b\rangle}$ .

piège magnéto-optique de césium.

En plus de la réalisation et de l'optimisation de résonance de Förster à 2-corps, il à été possible de tiré parti de la proximité en champ électrique de deux résonance de Förster pour générer un processus à 4 corps.

Nous avons en effet observé l'interaction mutuelle entre 4 atomes de Rydberg à travers la modification de leurs états quantiques internes.

Cette observation, reportée dans ref[] représente une importante contribution à la physique à quelques corps. Notamment car, en plus de son observation, ce processus cohérent d'interaction entre 4 atomes de Rydberg à été relativement bien caractérisé théoriquement, au niveau quantique.

Les interactions entre atomes de Rydberg ont aussi de fortes manifestations lorsque l'on considère le couplage entre un ensemble d'atomes de Rydberg et le champ électromagnétique. Lorsqu'un gaz d'atomes de Rydberg en forte interaction est illuminé par un champ laser résonant, l'excitation du gaz vers les états de Rydberg est fortement réduite du fait des interactions. Ce phénomène est connu sous le nom de blocage dipolaire.

Dans le cas limite, seule une excitation Rydberg peut être présente dans le système. De tels systèmes ont été proposés pour implémenter des portes logique quantiques, briques

élémentaires pour la réalisation de calculs quantiques.

Les gazes d'atomes de Rydberg en forte interaction ont aussi des propriétés très intéressantes concernant l'émission de photons. Ils pourraient être utilisés pour réaliser des sources de photons uniques ou plus généralement des sources de lumière non classiques.

En utilisant des gazes d'atomes de Rydberg froids au sein de schémas de transparence électro magnétiquement induite, il à été possible de générer en effet Kerr gigantissimement grand.

Les gazes d'atomes de Rydberg en forte interaction pourraient finalement être utilisés pour reproduire divers comportements quantiques. On parle dans ce cas de simulation quantique. La modularité des interactions entre atomes de Rydberg, couplée à celle des gazes d'atomes froids offrent la possibilité de reproduire la dynamique d'autres systèmes quantiques, en particulier des systèmes de physique du solide.

D'un point de vue fondamental, la description des gazes d'atomes de Rydberg en forte interaction à stimulée un grand intérêt théorique. Comme il s'agit d'un problème à N-corps, le Hamiltonien associé ne peut être résolu pour plus qu'un nombre d'atomes mésoscopique. Cependant, du fait des propriétés très attractives que l'on attend de tels systèmes, il est très intéressant d'être capable de les décrire.

Une propriété importante qui est bien décrite théoriquement est que l'excitation laser d'un gaz d'atome de Rydberg en forte interaction donne lieu à des excitations dites collectives. Un grand nombre des propriétés des gazes de Rydberg en forte interaction viennent de ces excitations collectives qui possèdent par exemple une dynamique caractéristique.

Dans le cadre de cette thèse, le phénomène de blocage dipolaire à été étudié théoriquement en utilisant les états quantiques dits états de Dicke. Ces états collectifs sont définis en fonction de leurs symétries relative à l'excitation laser. Il à été possible de tirer parti de ces propriétés de symétrie pour décrire efficacement la dynamique collective des gazes de Rydberg en forte interaction.

Le phénomène de blocage dipolaire à aussi été étudié expérimentalement durant cette thèse, en utilisant un gaz ultra-froid de rubidium.

Un premier résultat, reporté dans ref[] à consisté en la première réalisation expérimentale

de l'excitation Rydberg d'un condensat de Bose-Einstein confiné dans un réseau optique à une dimension. La nature collective de l'excitation Rydberg a été observée à travers sa dynamique caractéristique. C'est un résultat important car la géométrie étudiée pourra s'avérer être l'une des plus utiles pour observer et utiliser les propriétés collectives des gazes d'atomes de Rydberg en forte interaction.

Un autre résultat important, rapporté dans ref[], est l'observation d'une statistique d'excitation très fortement sub-poissonienne, c'est-à-dire, corrélée. Cette observation est une forte signature de la nature collective de l'excitation et confirme le potentiel des gazes de Rydberg en forte interaction pour la réalisation d'états quantiques collectifs et de sources de lumière non classiques.

## II. DESCRIPTION DES CHAPITRES ET MISE EN VALEURS DES PRINCIPAUX RÉSULTATS

### A. Chapitre 1 : Atomes de Rydberg, interaction Rydberg-Rydberg et gazes de Rydberg en forte interaction

Dans le chapitre 1, les bases de la physique des atomes de Rydberg sont exposées.

La description théorique des états de Rydberg est présentée dans des termes simples. Les atomes de Rydberg ont, d'un point de vue théorique, un aspect très "pratique". De fait, les états de Rydberg des atomes alcalins ont une grande similitude avec ceux de l'atome d'hydrogène. Pour les états suffisamment excités, les effets complexes du cur ionique sont négligeables et l'on retrouve quasiment les états quantiques de l'atome d'hydrogène accessibles analytiquement. Ceci est formalisé par la théorie du défaut quantique.

Cette facilité théorique permet de calculer assez aisément un bon nombre de propriétés atomiques tel que la taille, la durée de vie, l'effet d'un champ électrique. Les valeurs exagérées de ces propriétés dans le cas des états de Rydberg et leurs dépendances avec le nombre quantique principale  $n$  sont mises en avant dans ce chapitre.

Les mécanismes fondamentaux d'interaction entre deux atomes de Rydberg sont aussi présentés dans ce chapitre. A partir de l'interaction électrostatique dominante dans le



cas des atomes de Rydberg, décrite par le Hamiltonien dipôle-dipôle, les principaux cas d'interaction sont présentés : l'interaction dipôle-dipôle en champ électrique, l'interaction de Van-der-Waals et les résonances de Förster. La résolution de systèmes modèles à deux niveaux permet de poser les bases théoriques des descriptions plus réalistes. La modularité des interactions entre atomes de Rydberg est ici mise en avant.

Dans ce chapitre, les études théoriques et expérimentales faites sur le sujet des gazes de Rydberg en forte interaction sont passées en revue de manière non exhaustive mais assez complète. Le but est ici d'extraire les principales caractéristiques de ces systèmes qui ont été le sujet d'un nombre très important de publications durant les dix dernières années. Le phénomène de blocage dipolaire, au cur de la physique à N-corps régissant ces systèmes est notamment exposé puis mis en relief à travers divers résultats expérimentaux.

Un dernier aspect de ce chapitre introductif est de mettre en avant les champs d'applications, fondamentaux ou applicatifs, liés aux gazes de Rydberg en forte interaction. Le rôle potentiels de ces systèmes dans le calcul quantique, la simulation quantique ou la réalisation de composant photoniques est abordé ainsi que le lien entre les gazes froids de Rydberg et les plasmas froids.

Au long de ce chapitre, les propriétés fascinantes des atomes de Rydberg et de leurs interactions mutuelles sont abordées assez simplement. La sensibilité des atomes de Rydberg aux champs électromagnétiques extérieurs et la force des interactions entre atomes de Rydberg étant les intérêts essentiels motivant leur étude.

## **B. Chapitre 2 : Calculs des états quantiques de deux atomes de Rydberg en interaction, en présence de champs électrique et magnétique**

Dans ce deuxième chapitre, le calcul des états quantiques d'un système de deux atomes de Rydberg en interaction, en présence de champs électrique et magnétique uniformes est présenté.

Ces calculs ont été implémentés dans un code informatique durant cette thèse.

L'implémentation de ces calculs permet une description précise des interactions électrostatiques entre deux atomes de Rydberg, notamment pour des faibles distances interatomiques.

Un grand nombre d'informations utiles pour la compréhension des expériences peut être obtenu par ces calculs. A titre d'exemple, la fig 4 représente un diagramme des énergies propres d'un système de deux atomes de Rydberg en fonction de la distance interatomique, dans la gamme d'énergie autour de l'état  $70p_{3/2} + 70p_{3/2}$ . Du fait de la densité importante d'états à 2 corps et de la force des interactions, un grand nombre d'états interagissent ensemble. Un tel diagramme comporte ce que l'on appelle des "spaghetti curves".

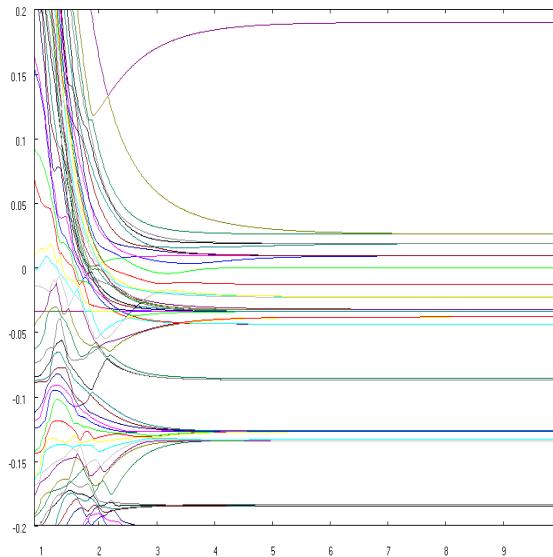


FIG. 4: Energie de deux atomes de Rydberg en fonction de leur distance. Les énergies sont données en  $\text{cm}^{-1}$ , les distances en  $\mu\text{m}$ . Le zéro en énergies correspond à l'état  $70p_{3/2} + 70p_{3/2}$ .

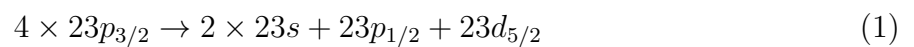
### C. Chapitre 3 : Expériences à quelques corps

Dans ce troisième chapitre, les expériences réalisées à Orsay concernant la réalisation de processus d'interaction entre quelques atomes de Rydberg sont présentées.

Le montage expérimental utilisé pour ces expériences a été intégralement construit au cours de cette thèse, il est présenté au début du chapitre.

Le principe des expériences est d'exciter des atomes de Rydberg au sein d'un piège magnéto-optique de césium. Une particularité de ce montage est que l'excitation Rydberg peut être réalisée en présence d'un champ électrique. Après un temps d'interaction, les atomes de Rydberg sont détectés par ionisation par champ électrique. En utilisant une rampe de champ électrique, cette méthode de détection permet de différencier les différents états de Rydberg dans lesquelles se trouvent les atomes.

Le principal résultat obtenu, reporté dans ref[1] est l'observation d'un processus d'interaction entre 4 atomes de Rydberg. Ce processus peut être décrit comme la réaction suivante



Il a été observé expérimentalement pour un champ électrique d'environ  $80.0 \text{ V.cm}^{-1}$ . Cette interaction effective à 4-corps peut être comprise comme une combinaison d'interactions à 2-corps. De fait, deux résonances de Förster apparaissent à des champs électrique très proches. Ces deux résonances de Förster peuvent être décrites par les réactions suivantes



Elles apparaissent respectivement à des champs électriques d'environ  $79.9 \text{ V.cm}^{-1}$  et  $80.4 \text{ V.cm}^{-1}$ .

Expérimentalement, le processus à 4-corps a été observé en mesurant la proportion d'atomes dans l'état  $23d_{5/2}$  (état produit) après l'excitation laser de l'état  $23p_{3/2}$  en fonction du champ électrique. Les résultats sont présentés sur la fig 5 par les points rouges où la résonance à 4-corps apparaît clairement.

En plus de son observation expérimentale, nous avons développé un modèle théorique décrivant le processus à 4-corps. Le modèle est basé sur l'existence des deux résonances de Förster, les termes d'interactions correspondent ainsi que les énergies des états à 4-corps considérés sont tirés des calculs présentés au chapitre 2. Les résultats du modèle sont présentés

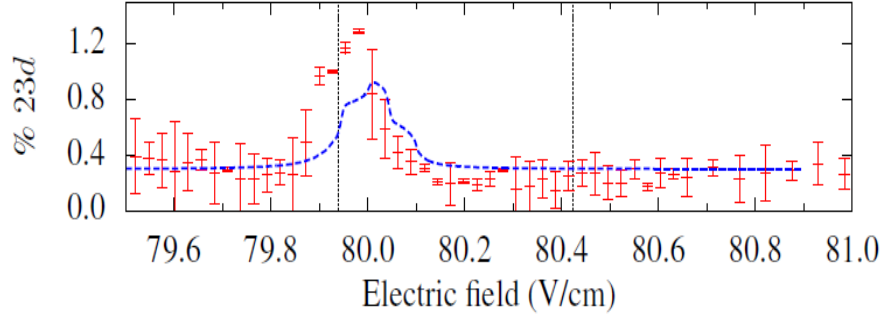


FIG. 5: Fraction des atomes dans l'état  $23d_{5/2}$  parmi tous les atomes de Rydberg détectés en fonction du champ électrique. Les données expérimentales correspondent aux points rouges. La ligne pointillée bleue correspond aux résultats du modèle.

sur la fig 5, on trouve un bon accord avec les données expérimentale ce qui confirme notre compréhension du processus à 4-corps.

#### D. Chapitre 4 : Expériences à N-corps

Dans le chapitre 4, les expériences réalisées à Pise au cours de cette thèse sont présentées.

Ces expériences consistent en l'étude de l'excitation laser d'un gaz de Rydberg en forte interaction. Cette situation donne lieu au phénomène de blocage dipolaire et à la présence d'excitation collectives.

La nature collective des excitations Rydberg à été démontrée à travers la statistique d'excitation. De fait, si l'excitation d'un gaz de particules sans interaction donne lieu à une statistique poissonnienne (non corrélée), la présence d'interaction se traduit par une statistique sub-poissonnienne (corrélée) du nombre d'atomes excités dans l'état de Rydberg.

La statistique d'excitation à été étudiée via deux quantité statistiques, le nombre moyen d'excitations  $N_R$  et le facteur de Mandel  $Q_R$  défini par

$$Q_R = \frac{\sigma^2}{N_R} - 1 \quad (4)$$

Où  $\sigma^2$  est la variance du nombre d'excitations.

Une statistique sub-poissonnienne est caractérisée par un facteur de Mandel  $Q_R$  négatif.

Expérimentalement, les quantités mesurées  $N_D$  et  $Q_D$  correspondent au nombre d'ions détectés après ionisation par champ électrique des atomes de Rydberg. Les quantités relatives à l'excitation Rydberg  $N_R$  et  $Q_R$  sont obtenues en multipliant  $N_D$  et  $Q_D$  par  $1/\eta$  où  $\eta$  est l'efficacité de détection, évalué à  $35 \pm 10\%$ .

la fig 6 présente le résultat majeur ayant été obtenu. Les atomes de rubidium étant initialement dans leur état fondamental, piégés dans un piège magnéto-optique, pour différentes durées du pulse d'excitation laser excitant l'état  $71d_{5/2}$ ,  $N_D$  et  $Q_D$  ont été mesurés après la répétition de 100 expériences identiques.

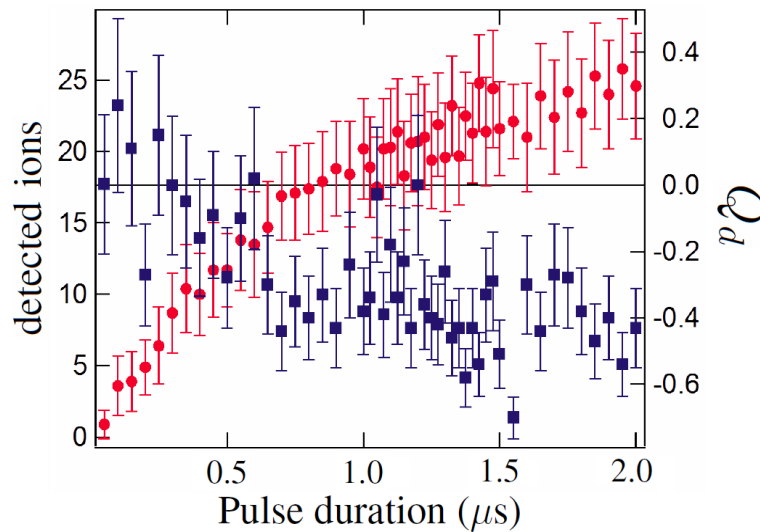


FIG. 6: Excitation laser de l'état  $71d_{5/2}$ , nombre d'ions détectés et Q facteur associé en fonction de la durée du pulse d'excitation. Les cercles rouges représentent le nombre d'ions, les carrés bleus le facteur Q de Mandel correspondant aux ions.

On voit clairement sur la fig 6 que d'une part, le nombre d'excitations augmente puis atteint un régime de saturation, et d'autre part, que le Q facteur diminue, devient sub-poissonien, avant d'atteindre lui aussi un régime de saturation.

Le point remarquable de ces mesures expérimentales est la valeur du Q facteur dans le régime de saturation,  $Q_R \approx -1$ . Cette valeur constante de -1 correspond à la valeur minimum que le facteur Q de Mandel peut prendre. Cela démontre d'une part la présence de corrélations atomiques et donc des excitations collectives mais aussi que les excitations Rydberg sont organisées en remplissant le volume excité de manière maximum permise par le blocage dipolaire.

Ce dernier point soulève des questions très intéressantes auxquelles les développements théoriques décrivant l'excitation laser des gazes de Rydberg en forte interaction sont amenés à répondre. Notamment, on peut montrer qu'une vision de type sphères dures (ou Super-Atomes) des excitations collectives donne un Q facteur  $Q_R \geq -0.75$ , un Q facteur inférieur montre donc que les corrélations sont présente à un niveau plus profond.

### E. Chapitre 5 : Modélisation à N-corps, model coopératif

Le chapitre 5 de cette thèse présente les développements théoriques effectués à Orsay sur le sujet de l'excitation laser des gazes de Rydberg en forte interaction.

L'intérêt de tels développements vient du fait que la situation étudiée correspond à un problème à N-corps, insoluble par les ordinateurs d'aujourd'hui pour plus de quelques dizaines d'atomes. Il est donc ici nécessaire de faire des approximations dans la résolution des équations pour obtenir des résultats.

Plusieurs approches théoriques sont à l'étude pour traiter de tels systèmes, toutes apportent des éléments de compréhension différents. Les principales approches sont des traitements de champ moyen, la résolution d'équations de taux ou enfin la résolution exacte du Hamiltonien, limitée donc à quelques dizaines d'atomes mais pouvant être poussé à quelques centaines grâce au model du Super-Atome.

Au cours de cette thèse, une nouvelle approche à été développée. Cette approche utilise les états collectifs de Dicke. Cette approche à été initialement choisi car elle permet d'accéder assez facilement à la statistique d'excitation Rydberg.

Cependant, les états de Dicke offrent deux avantages majeurs, le premier est qu'ils correspondent intrinsèquement à des états collectifs à N-corps et non à une simple juxtaposition d'états atomiques. Le deuxième avantage est que les états de Dicke sont définis en fonction de leurs symétries relatives à l'excitation laser. La construction des états de Dicke pour N atomes est similaire à celle d'une base couplée de N moments angulaires (N spins  $1/2$ ). La valeur du moment angulaire total correspond au nombre d'atomes excités et, la est

le point le plus intéressant, sa projection est conservée par l'excitation laser. Cette dernière propriété s'est avérée être un énorme avantage pour le traitement théorique du système.

En utilisant les états de Dicke, nous avons développé un modèle théorique, appelé modèle coopératif. Bien qu'encore perfectible, ce modèle offre une vision nouvelle de la dynamique de l'excitation laser d'un gaz de Rydberg en forte interaction. Il permet de comprendre un certain nombre de propriétés observées expérimentalement et notamment les valeurs très négatives du facteur  $Q$  de Mandel.

Le modèle montre que la symétrie des états collectifs joue un grand rôle dans la dynamique de l'excitation avec notamment un effet d'accumulation dans des états ayant le degré minimum de symétrie, ces états, peuplés du fait des interactions, n'étant pas couplés par le laser à des états contenant moins d'excitations.

Un comportement qualitatif a été proposé décrivant la dynamique d'excitation dans la base des états collectifs de Dicke, représenté sur la fig 7.

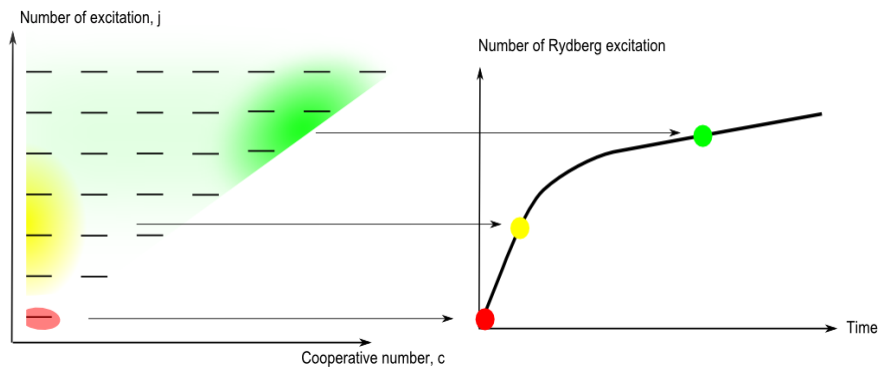


FIG. 7: Vision schématique de la dynamique des excitations collectives. Les zones colorées donnent une idée des états de Dicke peuplés à différents temps d'excitation.

Le modèle coopératif que nous avons développé représente une avancée très prometteuse pour la description théorique de l'excitation laser des gazes de Rydberg en forte interaction. Dors et déjà, en tant que nouvelle approche, il offre de nouveaux éléments de compréhension qui pourront être exploités dans de futures expériences.

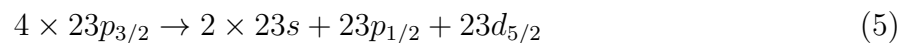
### III. CONCLUSION

Dans le cadre de cette thèse, une large gamme d'effets physiques liés aux atomes de Rydberg a été étudiée expérimentalement et théoriquement. Cette diversité est représentative du fait que la physique des atomes de Rydberg inclue de nombreux aspects, des plus techniques aux plus fondamentaux. Dans les deux cas, les propriétés remarquables des atomes de Rydberg en font des objets fascinants à étudier, permettant des développements technologiques prometteurs.

Dans cette conclusion les principaux résultats obtenus sont résumés.

Des calculs numériques permettant d'obtenir les états quantiques d'une paire d'atomes de Rydberg en interaction, en présence de champs électrique et magnétique uniformes ont été implémentés.

Un processus d'interaction entre 4 atomes de Rydberg a été observé. Ce processus révèle le fait que 4 atomes de Rydberg excités dans un état donné, peuvent, sous l'effet de leurs interactions mutuelles, échanger de l'énergie et changer d'états internes. Ce processus décrit par la réaction suivante, a été caractérisé théoriquement au niveau quantique.



Une statistique fortement sub-poissonienne de l'excitation laser d'un gaz de Rydberg en forte interaction a été observé avec un facteur  $Q$  de Mandel très proche de -1. Cette observation révèle sans ambiguïté la nature collective des excitations Rydberg en régime de forte interaction.

Finalement, la dynamique d'excitation d'un gaz de Rydberg en forte interaction a été étudié théoriquement en utilisant les états collectifs de Dicke. Dans ce cadre un model coopératifs a été élaboré. Le model donne des résultats prometteurs et apporte une nouvelle vision de la dynamique collective de tels systèmes.