

Soutenance de thèse de doctorat

Atomes de Rydberg en interaction : des nuages denses d'atomes de Rydberg à la simulation quantique avec des atomes circulaires

Tigrane Cantat-Moltrecht
Laboratoire Kastler Brossel, Collège de France

11 janvier 2018

Sous la direction de Michel Brune

Qu'est-ce que la simulation quantique ?

- Systèmes quantiques individuels bien compris (Nobel 2012)
- N corps en interaction ?

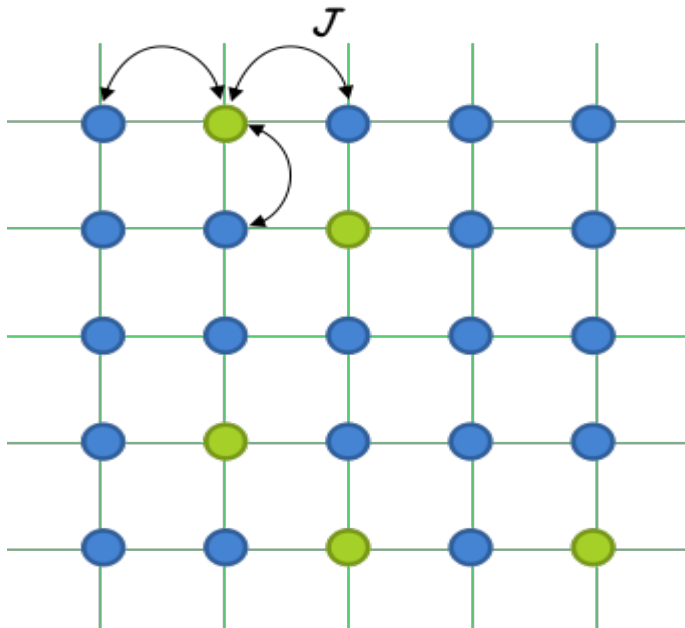
Explorer des phénomènes tels que

- transitions de phase quantiques
- supraconductivité haute T_c
- localisation
- marches aléatoires quantiques
- etc.



Physique de la matière condensée

- Obstacle pour calculer : taille de mémoire nécessaire (2^N nombres pour N spins 1 / 2 !)
- Obstacle expérimental : difficulté d'accès des systèmes

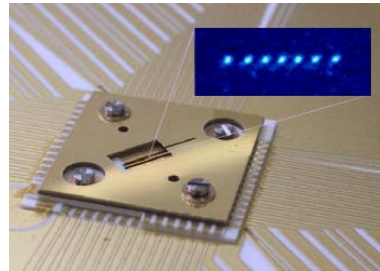


Qu'est-ce que la simulation quantique ?

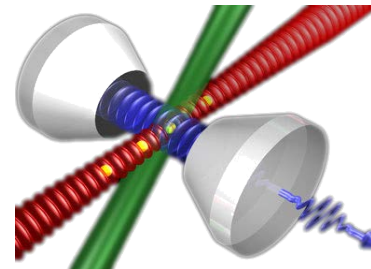
Idée de Feynman (1982) : un système quantique en simule un autre

- contrôle expérimental complet
- conserve les propriétés importantes du système original

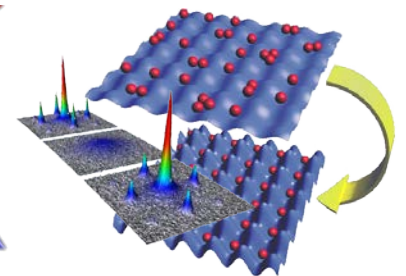
Ions piégés



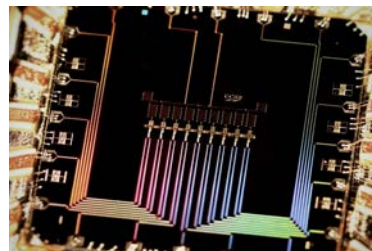
Atomes en cavité



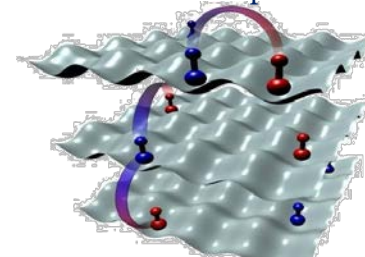
Atomes ultra froids



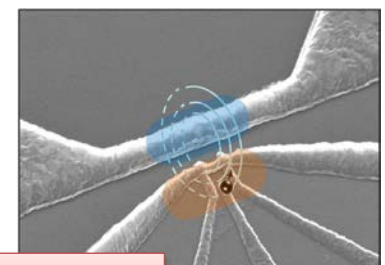
Circuits supraconducteurs



Molécules polaires



Spin-tronique



Avec des atomes de Rydberg ?

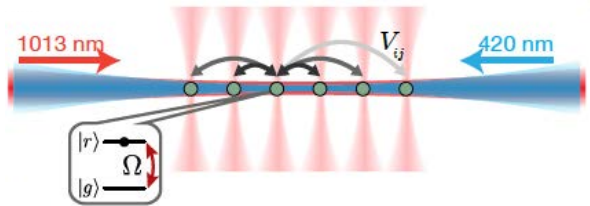
Simulation Quantique avec des atomes de Rydberg

Atomes de Rydberg :

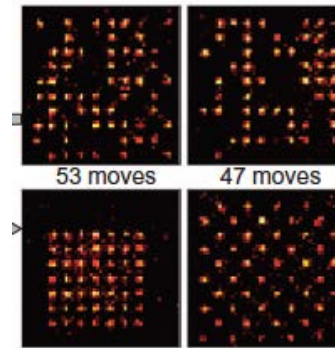
- ✓ Interactions dipolaires fortes (MHz à quelques μm)
- ✓ Interactions contrôlables
- ✓ Systèmes avec de longues durées de vie



Atomes dans l'état fondamental piégés individuellement (pinces optiques) + excitation Rydberg

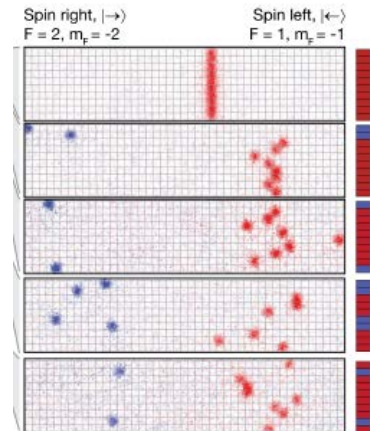


M. Lukin
(Harvard)



A. Browaeys
(Paris Saclay)

Isolateur de MOTT
+ habillage Rydberg



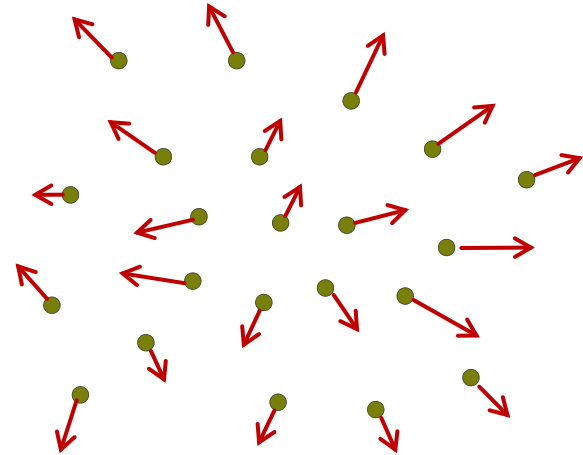
I. Bloch, C. Gross
(Munich)

Du mouvement des atomes de Rydberg en interaction ...

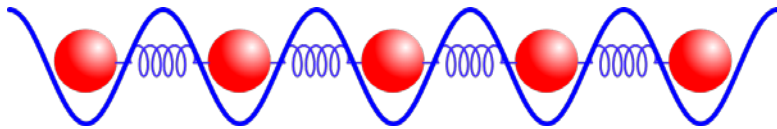
Interactions répulsives \Rightarrow mouvement !

Expériences menées à l'ENS [1] :
10 μ s max. avant désordre

[1] R. Teixeira et al, PRL 115, 013001 (2015)



... aux atomes de Rydberg circulaires



Pour remédier à « l'explosion » du nuage :
piéger les atomes de Rydberg.



Problème : photo-ionisation à bas- l

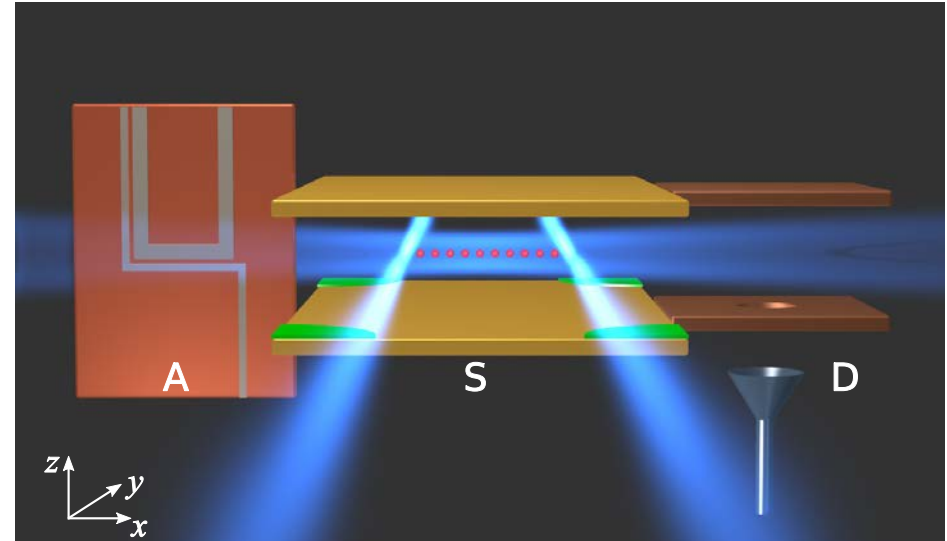
⇒ niveaux de Rydberg circulaires
(moment cin. max.) :

- photo-ionisation négligeable
- plus longues durées de vie

Atomes de Rydberg circulaires piégés pour la simulation quantique

Proposition de simulateur quantique [2]:

- atomes de Rydberg circulaires
- piégés par faisceau laser
- durée de vie préservée (minutes)
- hamiltonien contrôlé
- chaîne 1D de 40 atomes, régulière et sans défaut



[2] T.L Nguyen et al, arXiv 1707.04397

Plan de l'exposé

1. Proposition pour un simulateur quantique

2. Exciter des atomes de Rydberg circulaires sur puce

I. Atomes de Rydberg en interaction : vers un simulateur quantique

Qu'est-ce qu'un atome de Rydberg ?

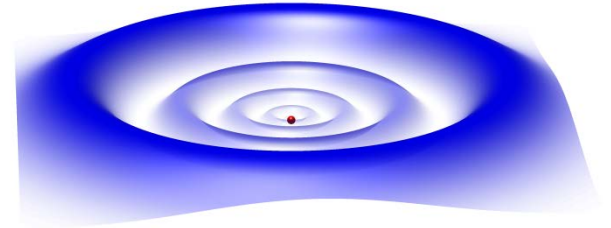
Atome de Rydberg : grand n

⇒ électron de valence très éloigné :

$$\langle r \rangle \sim a_0 \times n^2$$

⇒ très grand moment dipolaire de transition :

$$d \sim ea_0 \times n^2$$



- Très bonnes antennes microonde (sensibilité au champ EM)
- Fortes interactions dipôle-dipôle
- Longue durée de vie naturelle (très sensible au corps noir)

Niveau $n = 50$ (bas l):

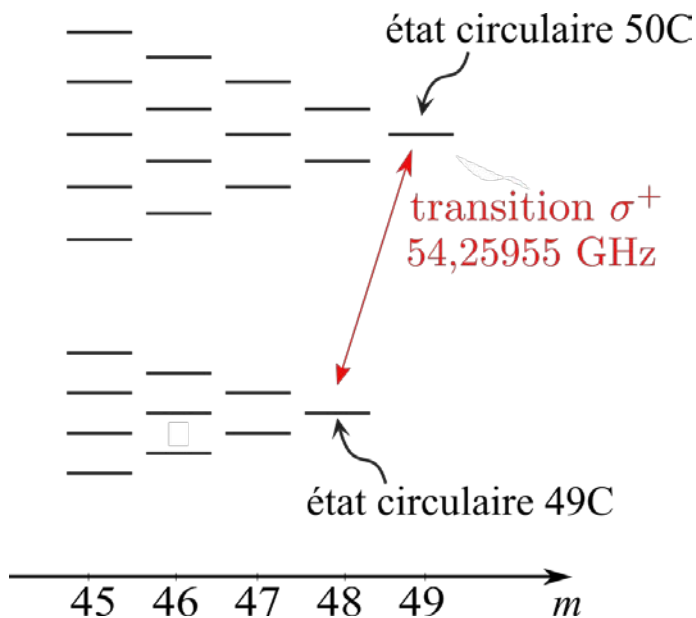
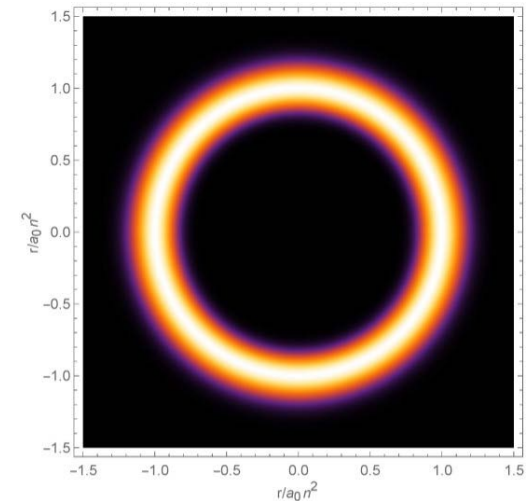
Interaction dipolaire :
 $\sim 1 \text{ MHz à } 5 \mu\text{m}$

Durée de vie :
 $\tau \sim 100 \mu\text{s}$

Qu'est-ce qu'un atome de Rydberg circulaire?

Atome de Rydberg circulaire : l et m maximaux

⇒ orbite électronique toroïdale semi-classique
 $r \sim a_0 n^2$

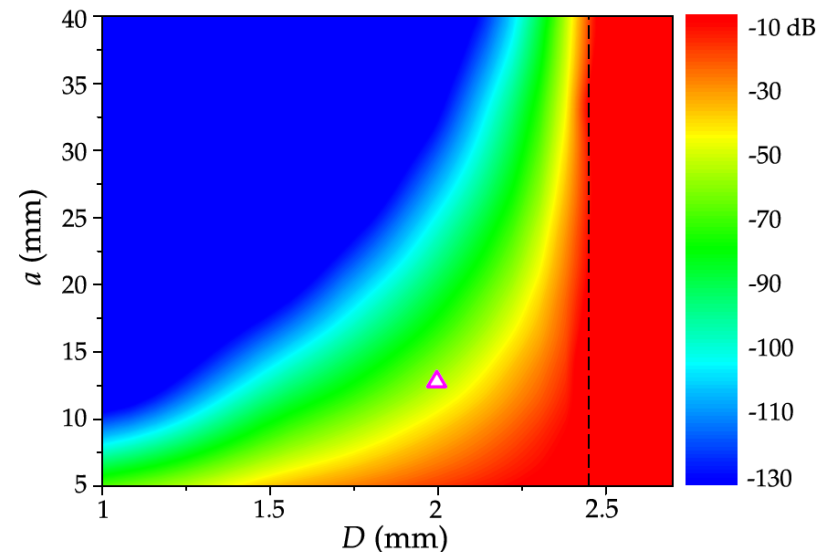
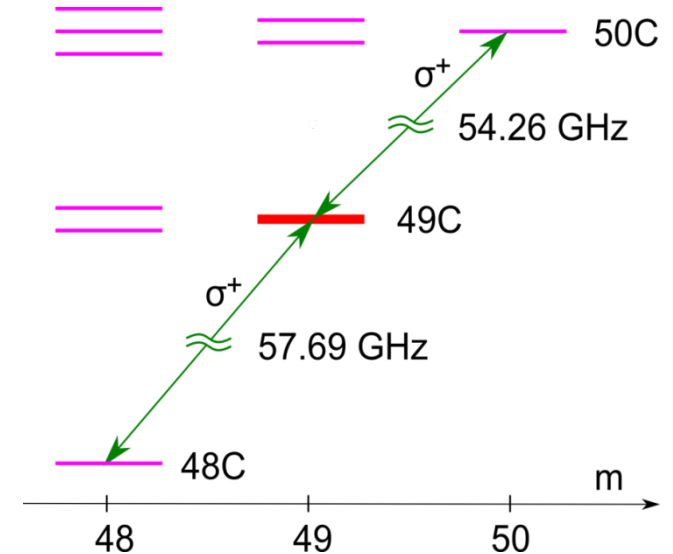
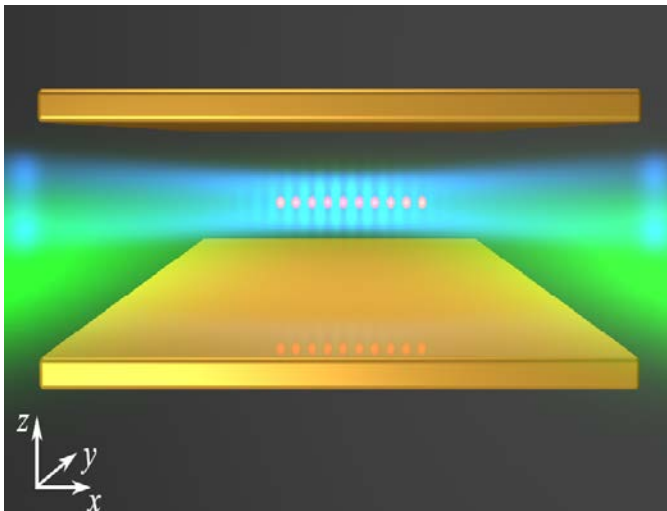


- Seul canal de désexcitation (à $T = 0$) : transition σ^+ vers le circulaire d'en-dessous
- Circulaire 50C : durée de vie $\tau \simeq 29$ ms à $T = 0$
- Transition peut être inhibée ! [3]

Inhiber l'émission spontanée

Mieux que la durée de vie naturelle ?

- ~ 29 ms pour le 50C
- Un seul canal de désexcitation : transition σ^+ vers le niveau 49C
- Inhibition de l'émission spontanée \Rightarrow 2500 s avant une émission σ^+ !



Préserver les Rydberg circulaires

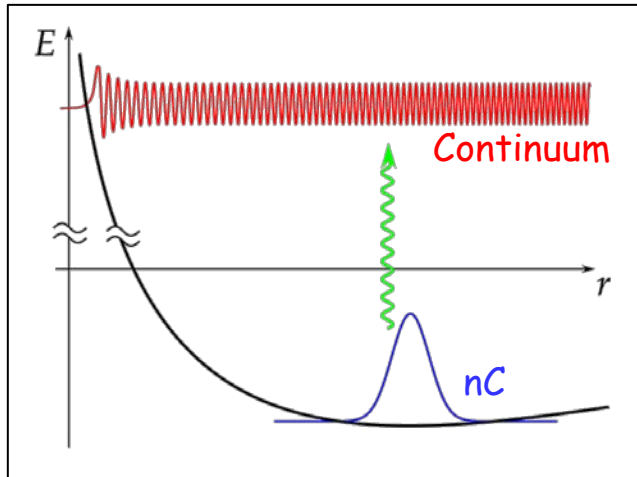
Effet	Durée de vie (s)
Émission spontanée	2500
Processus dus au corps noir	630
Collisions gaz résiduel (10^{-14} mbar)	400
Photo-ionisation	∞
Diffusion élastique des photons du piège	> 180
Relaxation dipolaire	∞
Mélange des niveaux de paire	88
Total (1 atome)	~ 50
Total (chaîne de 40 atomes)	> 1

Durée de vie d'une seconde
 $\Rightarrow 10^4 - 10^5$ temps
caractéristiques d'échange !

Piéger des Rydberg circulaires : potentiel pondéro-moteur

Piéger l'électron de valence dans un potentiel pondéro-moteur :

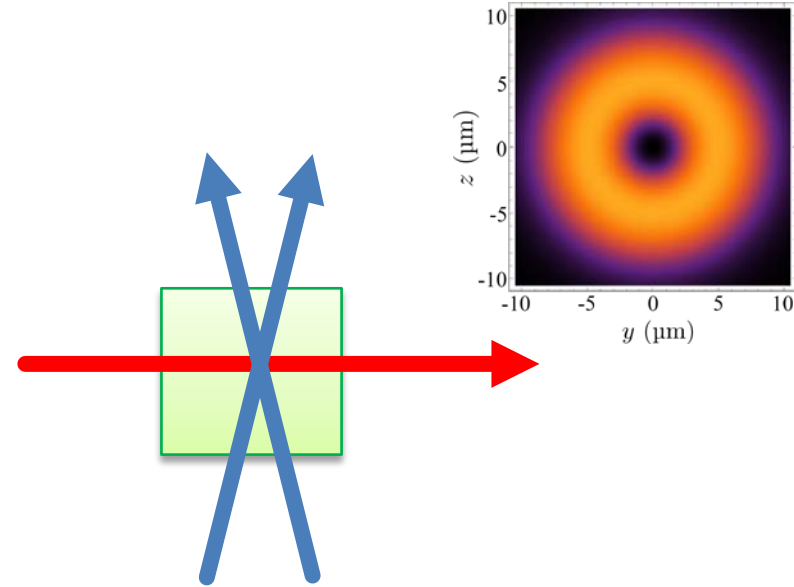
$$V = \frac{\hbar \alpha}{m_e \omega_L^2} \cdot I$$



- atomes cherchent le champ faible
- piège profond grâce à la grande polarisabilité
- quasi-indépendant du nombre quantique principal n
 \Rightarrow faible décohérence due au piégeage
- photo-ionisation quasi-nulle pour les circulaires !
(handicapante à bas l)

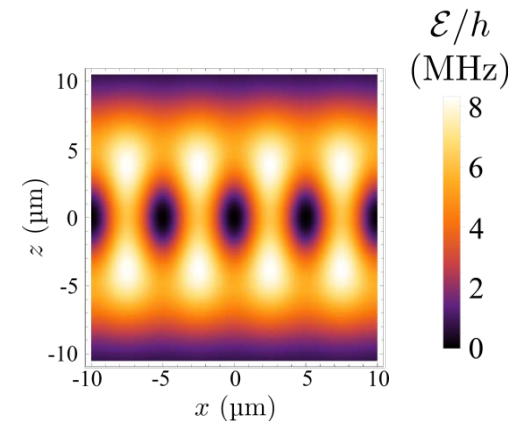
Piéger des Rydberg circulaires : géométrie des faisceaux

- Laser à 1064 nm
- Piégeage radial dans un faisceau Laguerre-Gauss
(0,5 W sur $w_{y,z} = 7 \mu\text{m}$)
- Piégeage longitudinal dans un réseau ajustable $d \sim 5 \mu\text{m}$
(1,45 W sur $w_x = 200 \mu\text{m}$, $w_z = 7 \mu\text{m}$)



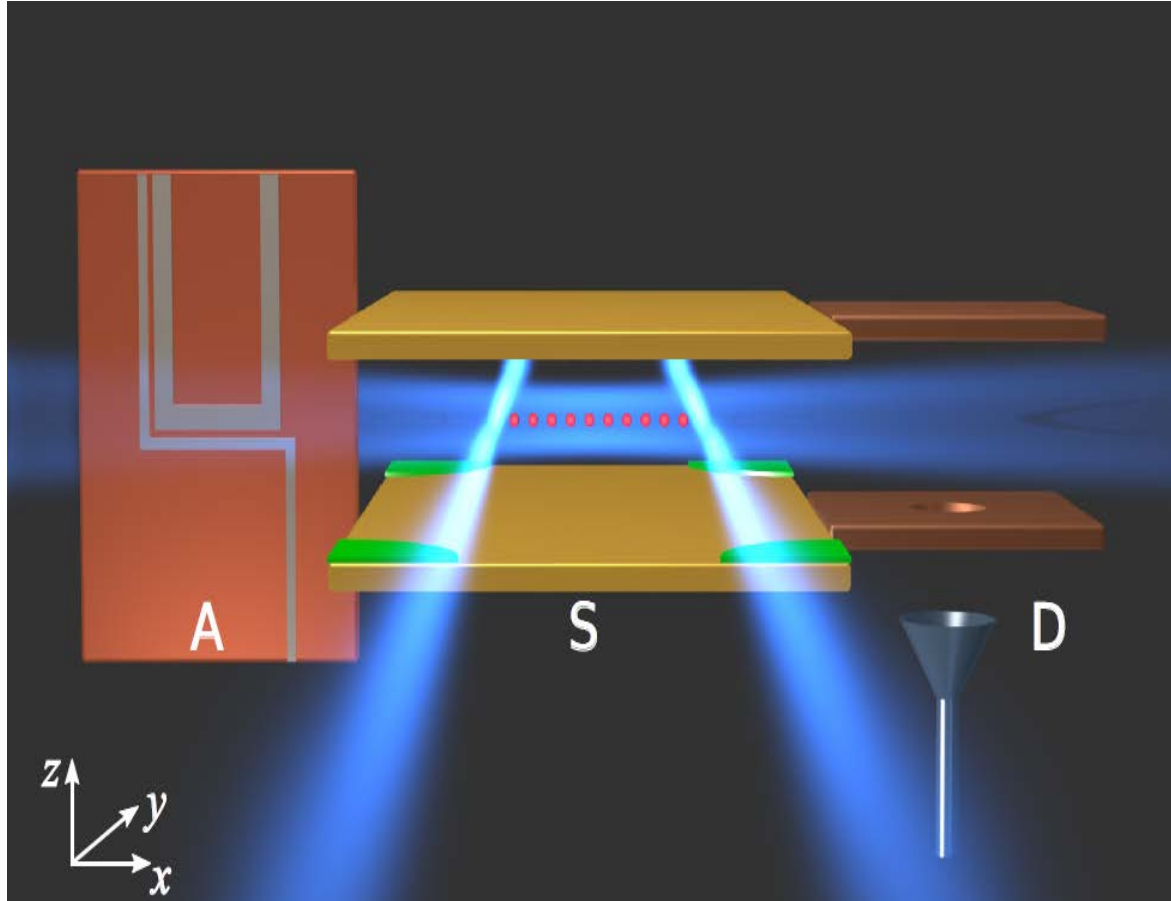
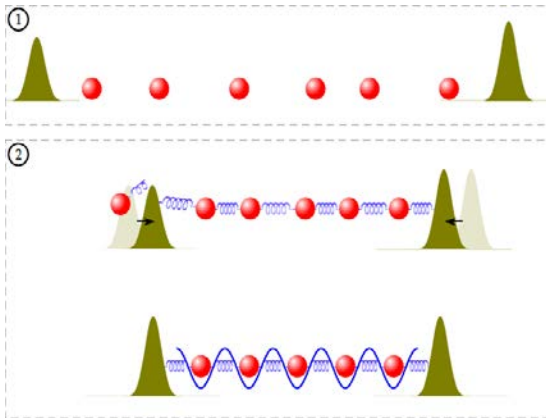
⇒ Potentiel de piégeage confinant et profond :

- fréquence longitudinale : $\omega_x \simeq 2\pi \cdot 24 \text{ kHz}$
- fréquence radiale : $\omega_{y,z} \simeq 2\pi \cdot 12 \text{ kHz}$
- profondeur : $U_0 \simeq h \cdot 5 \text{ MHz} \simeq k_B \cdot 250 \mu\text{K}$



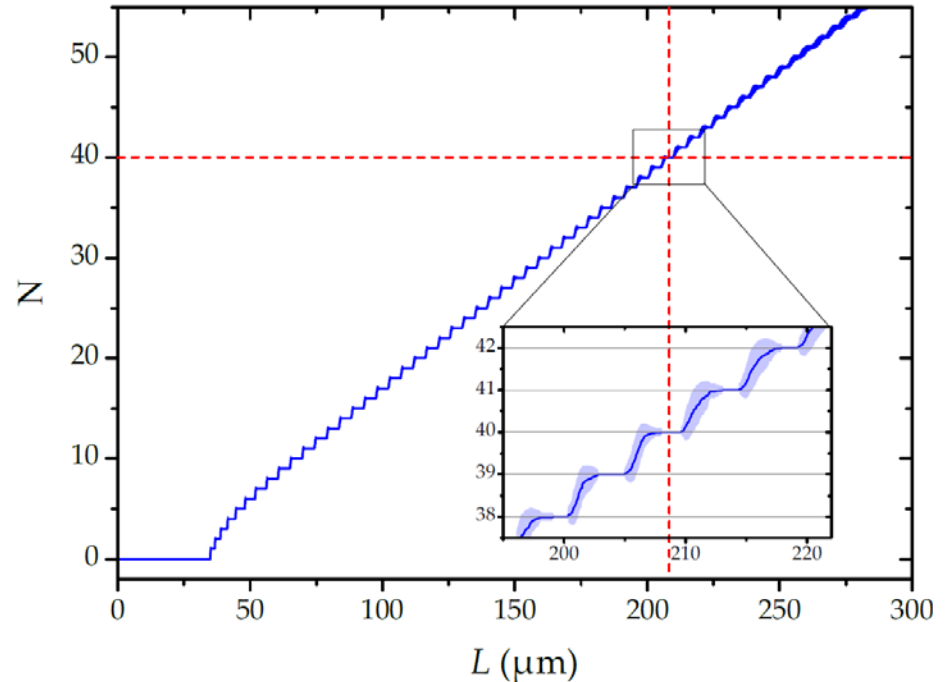
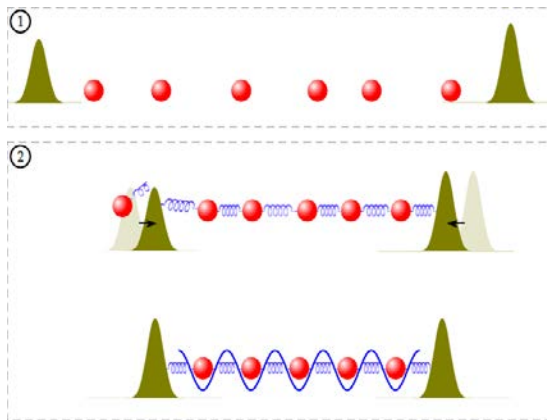
Préparer une chaîne régulière : « évaporation van der Waals »

1. Exciter les atomes circulaires
2. Piéger selon l'axe x
3. Boucher les extrémités du piège selon x
4. Comprimer
→ “refroidissement évaporatif VdW”
5. Allumer le réseau



Préparer la chaîne : simulation du processus

Simulation du mouvement des atomes pendant cette "évaporation" :



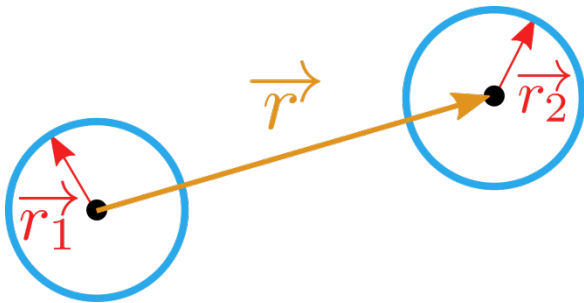
⇒ Préparation déterministe d'une chaîne régulière 1D de 40 atomes de Rydberg circulaires !

- Robustesse par rapport aux conditions initiales
- Technique utile pour la détection des atomes un par un

Deux atomes de Rydberg en interaction

Interaction dipôle-dipôle
entre 2 atomes de Rydberg :

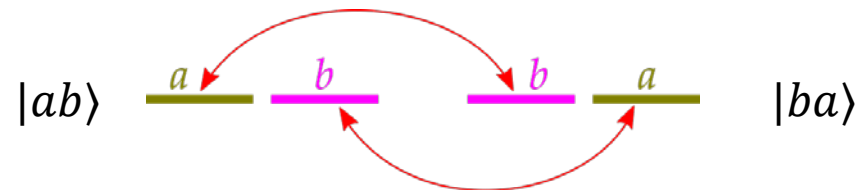
$$V_{dd} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^3} \left[\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2 - 3 \left(\vec{r}_1 \cdot \frac{\vec{r}}{r} \right) \left(\vec{r}_2 \cdot \frac{\vec{r}}{r} \right) \right]$$



- Deux atomes dans le même état :
interaction de type van der Waals

$$V_{\text{eff}}(r) = hC_6/r^6$$

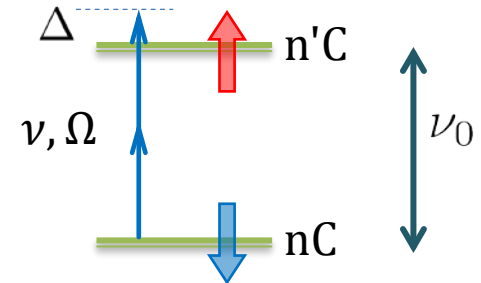
- Deux atomes dans des états différents a et b
 \Rightarrow interaction d'échange en plus :



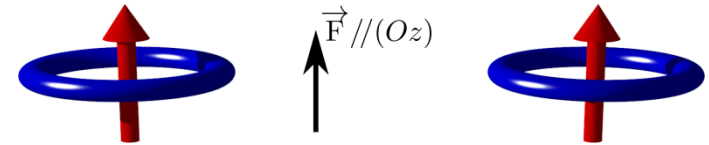
Deux atomes de Rydberg en interaction : équivalence avec deux spins 1/2

Correspond à un système de 2 spins-1/2 :

- terme d'énergie $\rightarrow J_Z \sigma_1^Z \sigma_2^Z$
- terme d'échange $\rightarrow J(\sigma_1^X \sigma_2^X + \sigma_1^Y \sigma_2^Y)$
- couplage microonde externe $\rightarrow \frac{\Delta}{2}(\sigma_1^Z + \sigma_2^Z) + \frac{\Omega}{2}(\sigma_1^X + \sigma_2^X)$



- $J_Z \propto 1/r^6$
- $J \propto 1/r^6$ ou $1/r^3$
- champ élec. ou magn. \rightarrow contrôle de J



Choix des niveaux :

- $n' = n + 2 \Rightarrow J \sim J_Z \propto 1/r^6$
- n plus grand \Rightarrow temps de vie limité (corps noir)
- n plus petit \Rightarrow interaction plus faible

\Rightarrow Niveaux choisis :
48C et 50C

Hamiltonien XXZ d'une chaîne de Rydberg circulaires

Extension à une chaîne de N atomes
 → hamiltonien XXZ d'une chaîne de N spins 1/2

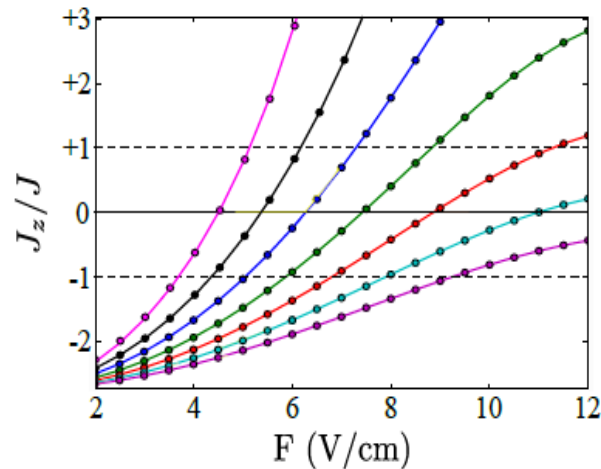
Couplage de spins
longitudinal

Couplage de spins
transverse

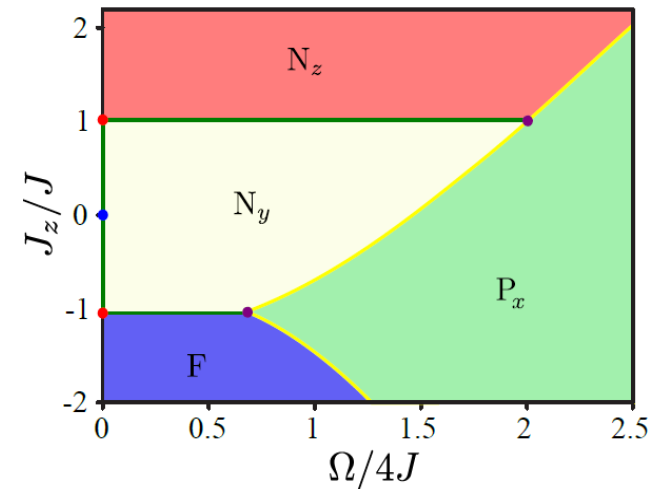
Champ magnétique
longitudinal

Champ magnétique
transverse

$$\mathcal{H} = J_Z \sum_j \sigma_j^Z \sigma_{j+1}^Z + J \sum_j (\sigma_j^X \sigma_{j+1}^X + \sigma_j^Y \sigma_{j+1}^Y) + \frac{\Delta}{2} \sum_j \sigma_j^Z + \frac{\Omega}{2} \sum_j \sigma_j^X$$



- J quasi-constant : 17 kHz à 5 μm
- temps caractéristique : $1/4J \sim 15 \mu\text{s}$
- J_Z contrôlé par F et B
- $J_Z, \Omega, \Delta \rightarrow$ exploration du diag. de phase



Un bon simulateur

- Nouvelle proposition de simulateur quantique avec des atomes de Rydberg circulaires piégés par laser :
 - interactions fortes et hamiltonien contrôlé
 - très longues durées de vie: $> 1\text{s} \sim 10^{4-5}$ **temps d'échange**
 - préparation déterministe et détection de chaque atome (single site)

⇒ promet un très bon simulateur quantique !

Avec un simulateur en état de marche :

- Validation (benchmarking) sur des phases connues
- Trempes et processus hors-équilibre
- Désordre : transport et localisation
- Deux chaînes côte-à-côte : phase de Haldane pour des spins 1
- Extension de la géométrie à deux ou trois dimensions

II. Des atomes de Rydberg circulaires sur puce