

# Transmission cohérente et interaction de type gravitationnel dans un nuage froid de Strontium

Soutenance de thèse

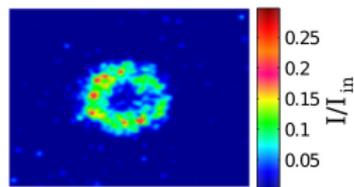
Maryvonne Chalony

Université de Nice Sophia-Antipolis, Institut Non Linéaire de Nice  
Directeur : David Wilkowski

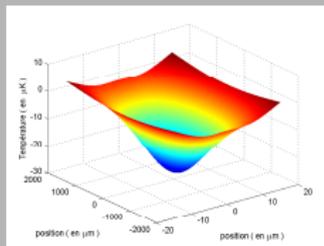
16 décembre 2010

# Développements effectués durant cette thèse

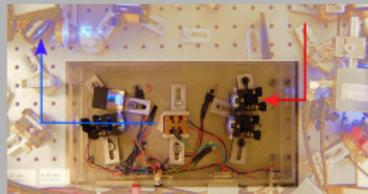
## Transmission cohérente



## Piège dipolaire à 780nm

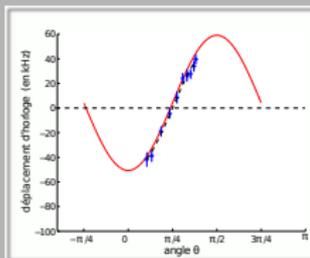


## Doublage de fréquence

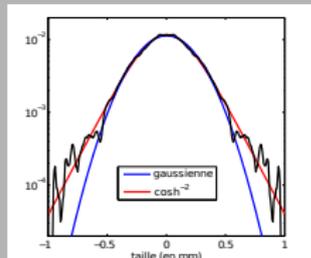


Génération de 200mW à 461nm

## Longueur d'onde magique



## Systèmes autogravitants



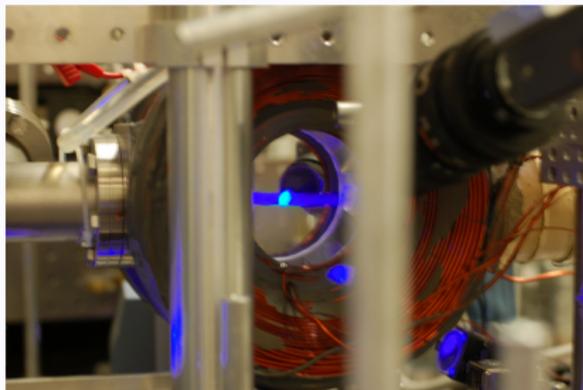
- Refroidissement sur Strontium
- Transmission cohérente par un milieu diffusant
- Interaction de type gravitationnel dans les atomes froids
- Conclusion et perspectives

# Plan

- Refroidissement sur Strontium
- Transmission cohérente par un milieu diffusant
- Interaction de type gravitationnel dans les atomes froids
- Conclusion et perspectives

# Refroidissement de l'atome de Strontium 88

Deux phases de refroidissement : la transition bleue et rouge

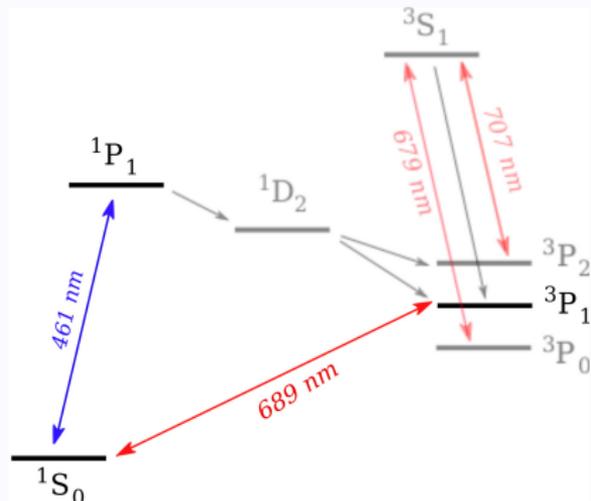


Refroidissement sur la transition  $^1S_0 - ^1P_1$

Nombre d'atomes : quelques  $10^8$

Température :  $10\text{mK}$

Temps de vie du niveau excité :  $\sim 5\text{ns}$



Refroidissement sur la transition  $^1S_0 - ^3P_1$

Nombre d'atomes :  $2 \cdot 10^5$  à  $2 \cdot 10^7$

Température :  $0.8$  à  $5\mu\text{K}$

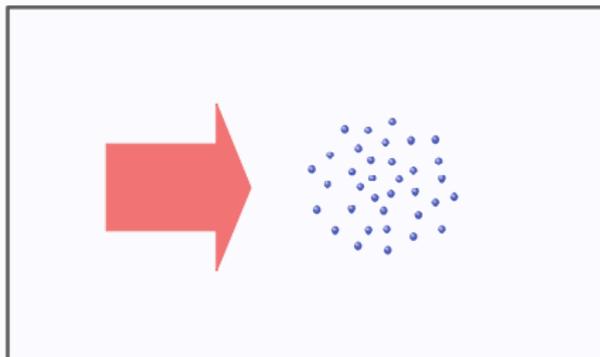
Temps de vie du niveau excité :  $\sim 21\mu\text{s}$

# Plan

- Refroidissement sur Strontium
- Interaction de type gravitationnel dans les atomes froids
- Conclusion et perspectives
- Transmission cohérente par un milieu diffusant
  - Phénomènes de diffusion dans les atomes froids
  - Montage/principe expérimental
  - Observations expérimentales
  - Origine de la surintensité
  - Temps caractéristique à l'extinction de la sonde
  - L'hypothèse de complémentarité
  - Conclusion

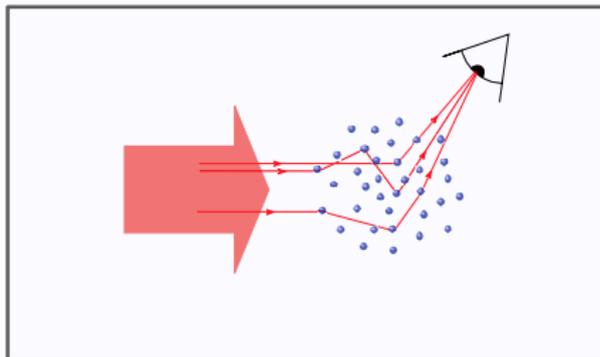
# Un milieu diffusant : le nuage d'atomes froids

Thématique historique du groupe niçois



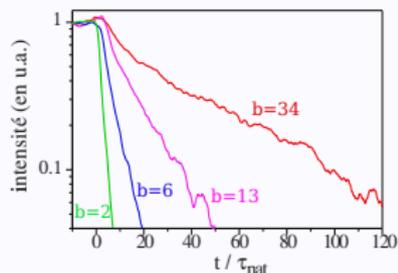
# Un milieu diffusant : le nuage d'atomes froids

Thématique historique du groupe niçois



## ● Hors axe : le piégeage de radiation

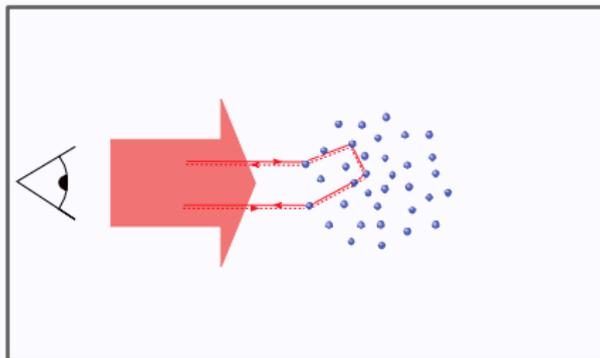
Temps caractéristique de piégeage de l'énergie dans le système



Slow diffusion of light in a cold atomic cloud, G. Labeyrie, E. Vaujour, C.A.Muller, D. Delande, C. Miniatura, D. Wilkowski, R. Kaiser, Phys. Rev. Lett. 91, 223904 (2003)

# Un milieu diffusant : le nuage d'atomes froids

Thématique historique du groupe niçois

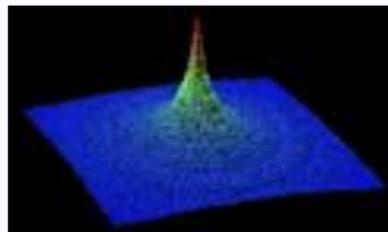


- **Hors axe : le piégeage de radiation**

Temps caractéristique de piégeage de l'énergie dans le système

- **Vers l'arrière : le cône de rétro-diffusion cohérente**

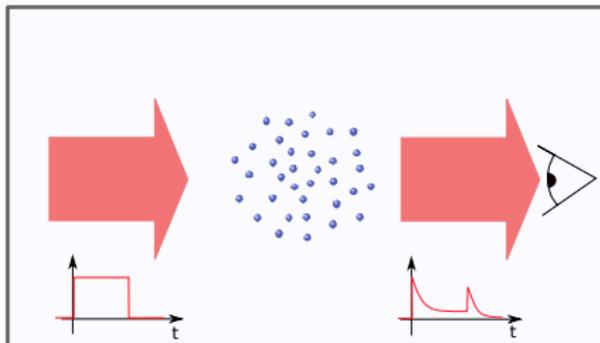
Interférences constructives vers l'arrière entre chemins de diffusion réciproques



*Coherent backscattering of light by cold atoms, G. Labeyrie, F. de Tomasi, J.-C. Bernard, C.A. Müller, Ch. Miniatura and R. Kaiser Phys. Rev. Lett., 83, 5266 (1999)*

# Un milieu diffusant : le nuage d'atomes froids

Thématique historique du groupe niçois



- **Hors axe : le piégeage de radiation**

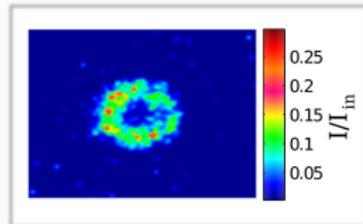
Temps caractéristique de piégeage de l'énergie dans le système

- **Vers l'arrière : le cône de rétro-diffusion cohérente**

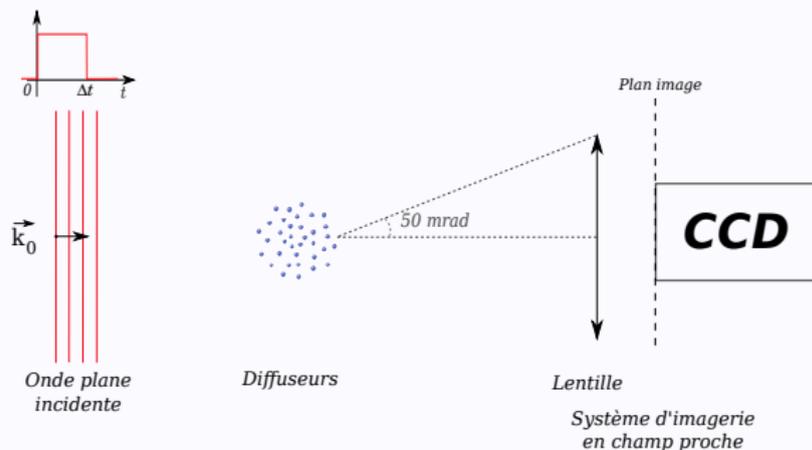
Interférences constructives vers l'arrière entre chemins de diffusion réciproques

- **Vers l'avant : la transmission cohérente**

Étude spatio-temporelle de l'intensité transmise



# Montage expérimental



Échantillon obtenu après refroidissement sur la transition d'intercombinaison

Configuration : imagerie d'ombre

Sonde à résonance sur transition  $^1S_0 - ^3P_1$

à faible saturation ( $s \sim 0.5$ )

Temps de sonde :

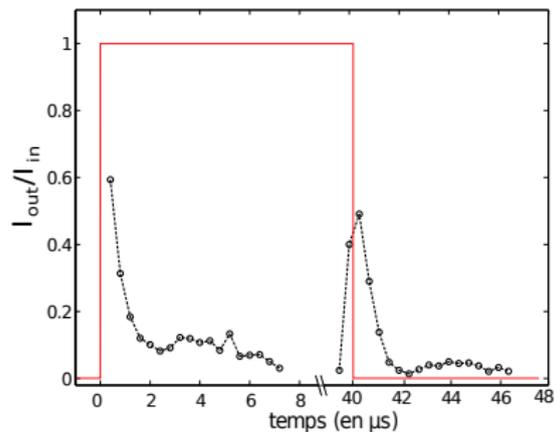
$$\Delta t = 40 \mu s$$

Échelle de temps naturelle :  $\tau_{nat} = 21 \mu s$

Résolution temporelle et spatiale du système d'imagerie :  $\delta t = 400 ns$   
et  $\sim 15 \mu m$

Une étude de la dynamique spatio-temporelle est donc possible

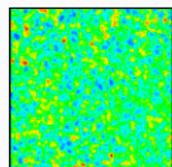
# Observations expérimentales



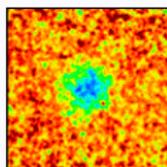
$$b \sim 10$$

$$T \sim 4\mu K$$

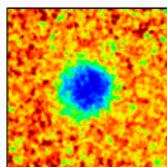
# Observations expérimentales



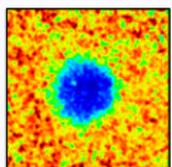
$t = 0 \mu\text{s}$



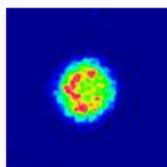
$t = 0.8 \mu\text{s}$



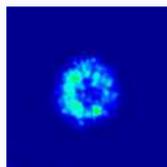
$t = 1.6 \mu\text{s}$



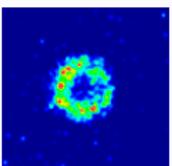
$t = 6.4 \mu\text{s}$



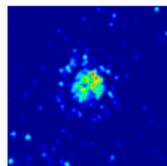
$t = 40.4 \mu\text{s}$



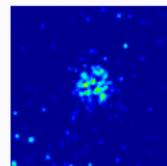
$t = 41.2 \mu\text{s}$



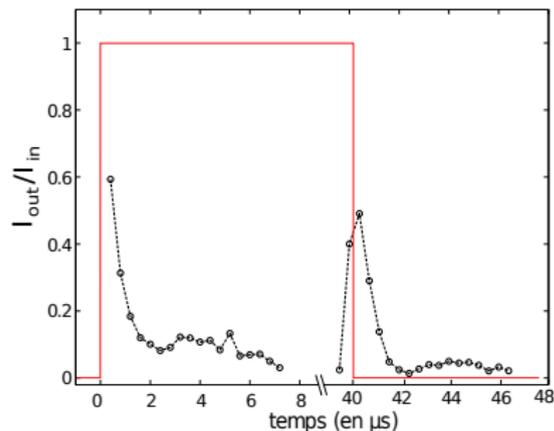
$t = 42 \mu\text{s}$



$t = 44.4 \mu\text{s}$



$t = 46 \mu\text{s}$



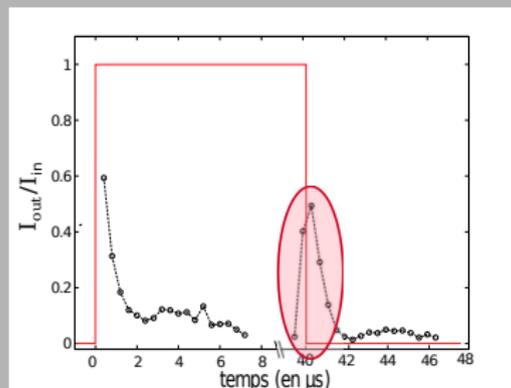
$$b \sim 10$$

$$T \sim 4 \mu\text{K}$$

# À l'extinction de la sonde

## Questions :

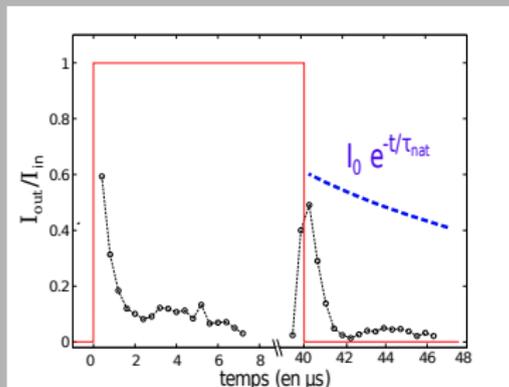
- Effet "flash" : origine de la présence de cette surintensité



# À l'extinction de la sonde

## Questions :

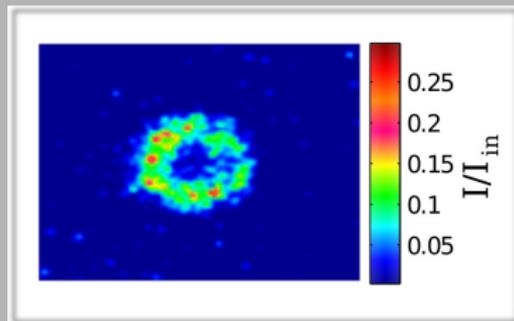
- Effet “flash” : origine de la présence de cette surintensité
- **Le temps caractéristique :**  
 $1\mu s \ll \tau_{nat} = 21\mu s$  ?



# À l'extinction de la sonde

## Questions :

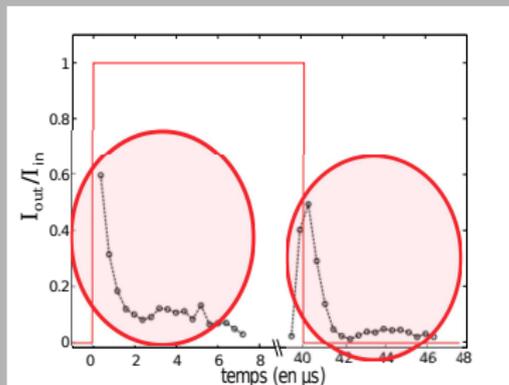
- Effet “flash” : origine de la présence de cette surintensité
- Le temps caractéristique :  
 $1\mu s \ll \tau_{nat} = 21\mu s$  ?
- **Présence d'une dynamique spatio-temporelle**



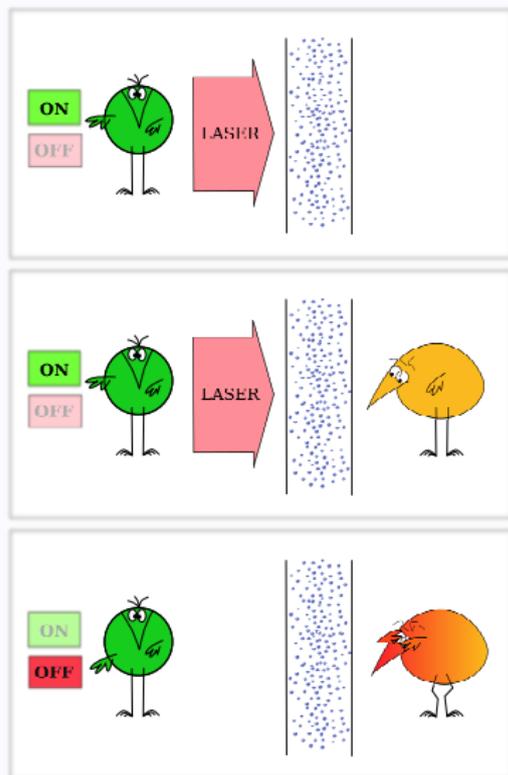
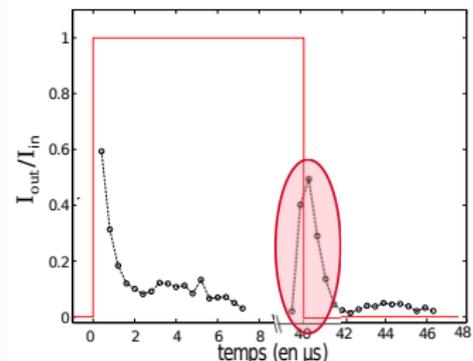
# À l'extinction de la sonde

## Questions :

- Effet “flash” : origine de la présence de cette surintensité
- Le temps caractéristique :  
 $1\mu s \ll \tau_{nat} = 21\mu s$  ?
- Présence d'une dynamique spatio-temporelle
- **Comment peut-on comparer la dynamique de l'intensité transmise à l'allumage et l'extinction de la sonde ?**



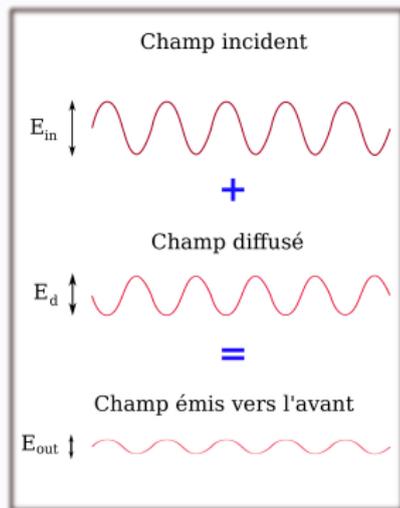
# La surintensité : un effet contre-intuitif



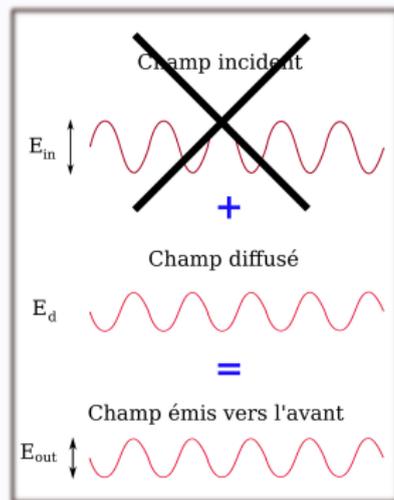
# Origine de la surintensité

Le théorème optique : à l'état stationnaire, l'extinction vers l'avant résulte d'une interférence "globalement" destructive entre le champ incident  $E_{in}$  et le champ diffusé  $E_d$ .

Durant l'état stationnaire :

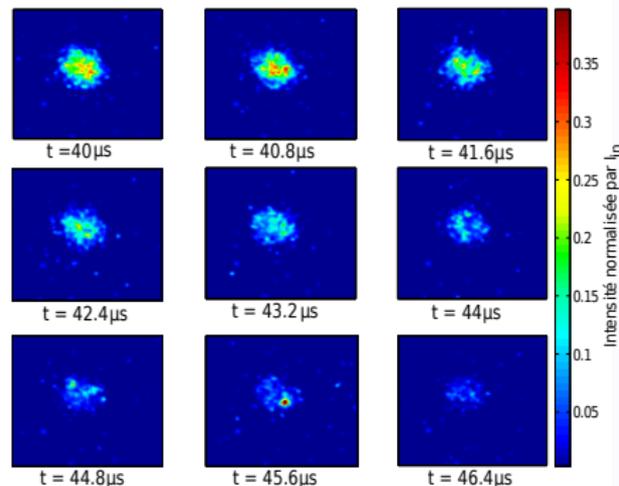
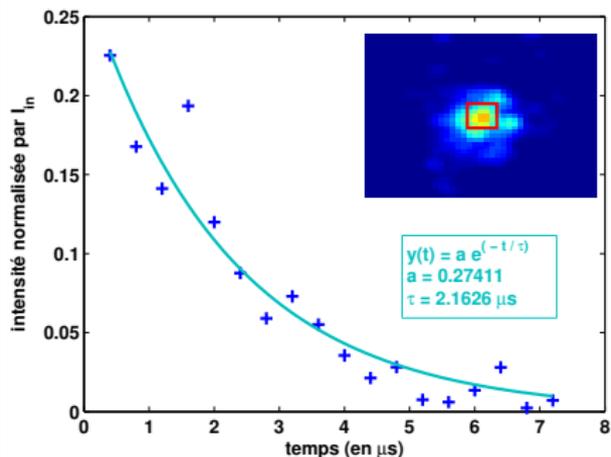


À l'arrêt du champ incident :



# Mesure du temps caractéristique

À faible épaisseur optique ( $b \sim 1$ )

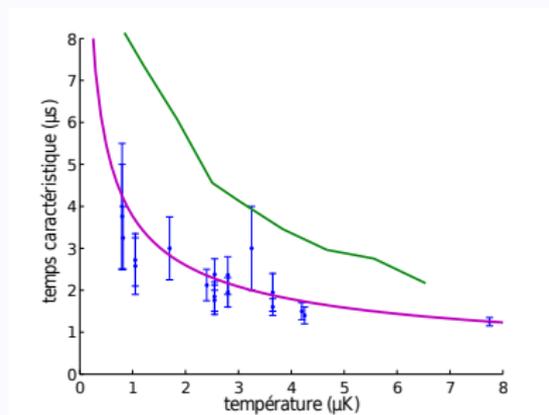


Nuage à  $2.7 \mu K$  et  $b \sim 1$

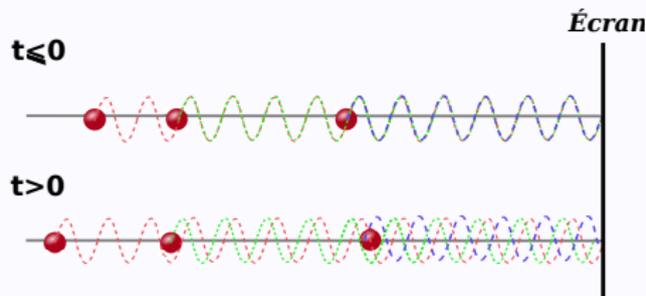
$2.2 \mu s \ll \tau_{nat} = 21 \mu s$

# Le mouvement des atomes : un mécanisme de décohérence

$$1 < b < 1.5$$



Approche qualitative : modèle de sources classiques



Approche quantitative : méthode des dipôles couplés

Approche qualitative

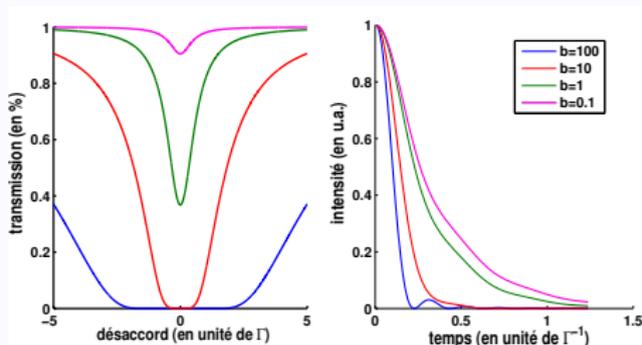
**Loi d'échelle :**  $\tau \propto \frac{1}{\sqrt{T}}$  pour  $T$  grand ( $k\sigma_v \gg \Gamma$ )

# Le rôle de l'épaisseur optique

Par analyse spectrale

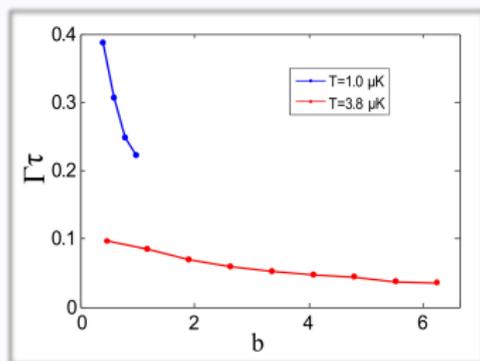
La transmission :

$$T(\delta) = \frac{I_{out}(\delta)}{I_{in}} = e^{-b(\delta)}$$



Plus l'épaisseur optique est grande  
plus le temps caractéristique associé  
est rapide

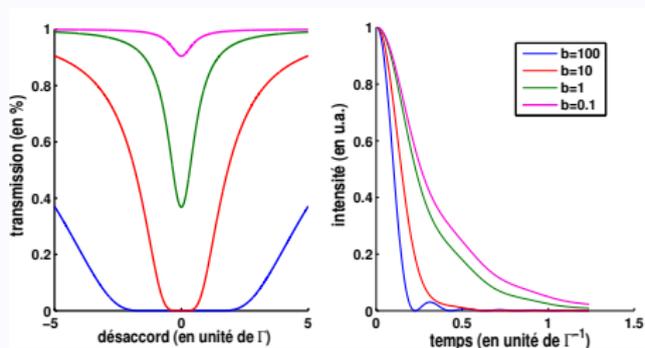
En intégrant radialement :  
comportement en fonction de  $b$  du  
temps caractéristique pour une  
température donnée



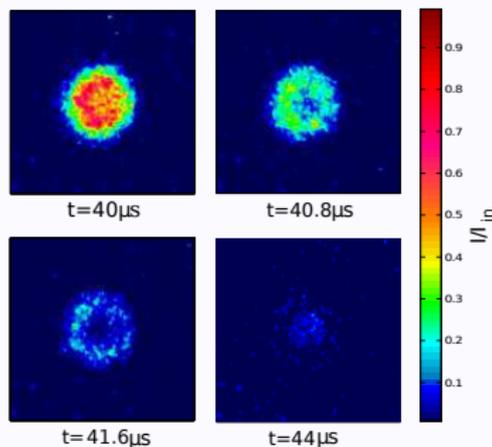
Temps caractéristique dépend de  
l'épaisseur optique

# Le rôle de l'épaisseur optique

Appliqué à une géométrie de boule gaussienne :



Plus l'épaisseur optique est grande  
plus le temps caractéristique est  
rapide



Structures observées  
expérimentalement et dans la  
simulation numérique

# l'hypothèse de complémentarité

À faible saturation et quelle que soit l'épaisseur optique :  
Le champ transmis  $E_{out}$  est relié au champ incident  $E_{in}$  par un opérateur linéaire  $H$  :

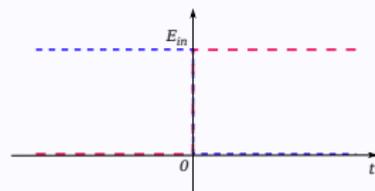
$$E_{out} = H E_{in}$$

Un créneau montant :

$$\begin{cases} E_{in_1} = 0 & \text{pour } 0 \leq t \\ E_{in_1} = E_{in}^{st} & \text{pour } t > 0 \end{cases}$$

Un créneau descendant :

$$\begin{cases} E_{in_2} = E_{in}^{st} & \text{pour } 0 \leq t \\ E_{in_2} = 0 & \text{pour } t > 0 \end{cases}$$



$$E_{out_1}(t) + E_{out_2}(t) = H \underbrace{(E_{in_1}(t) + E_{in_2}(t))}_{E_{in}^{st}}$$

$$E_{out_1}(t) + E_{out_2}(t) = E_{out}^{st}$$

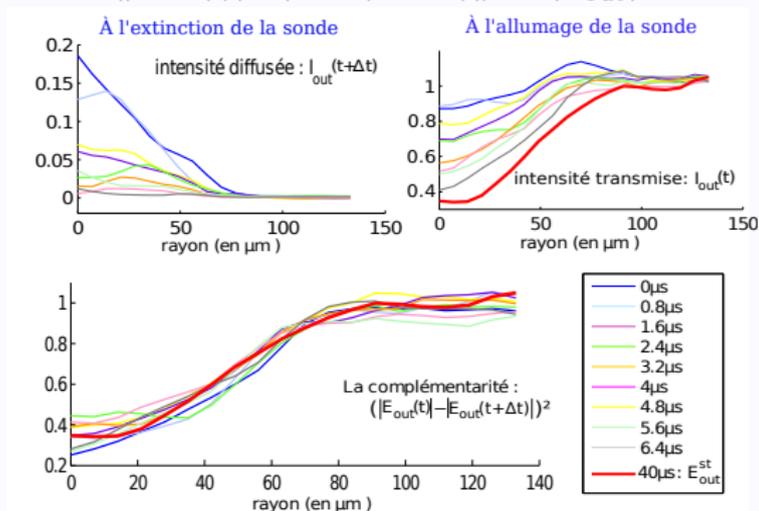
Appliqué à un signal échelon positif, nous obtenons pour  $0 \leq t < \Delta t$  :

$$E_{out}(t + \Delta t) + E_{out}(t) = E_{out}^{st}$$

# À faible épaisseur optique : validation de l'hypothèse de complémentarité

Conséquence du théorème optique **pour un milieu optiquement mince** : à résonance, opposition de phase entre le champ incident et le champ diffusé  
L'hypothèse de complémentarité donne :

$$(|E_{out}(t)| - |E_{out}(t + \Delta t)|)^2 = |E_{out}^{st}|^2$$

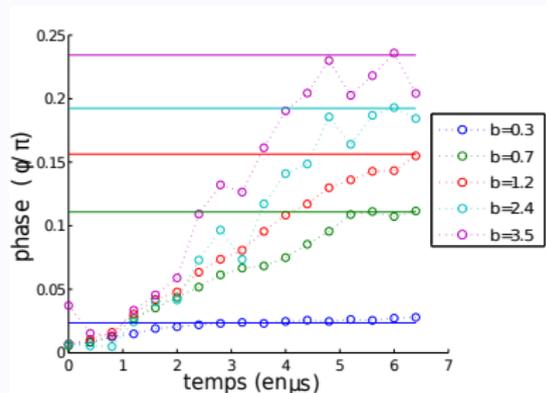
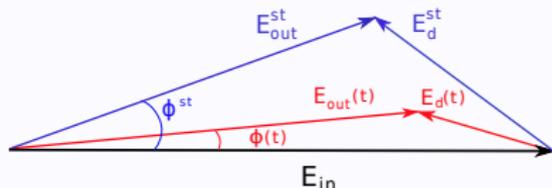


**À faible épaisseur optique, l'hypothèse de complémentarité est vérifiée**

# À forte épaisseur optique : observation d'une dynamique temporelle de la phase

En nous basant sur l'hypothèse de complémentarité :

$$\cos(\phi(t) - \phi_{st}) = \frac{|E_{out}(t + \Delta t)|^2 - |E_{out}^{st}|^2 - |E_{out}(t)|^2}{-2|E_{out}^{st}||E_{out}(t)|}$$



# En résumé...

- Mise en évidence du caractère interférentiel dans la transmission vers l'avant  $\Rightarrow$  l'effet flash
- Mise en évidence du rôle de la température et de l'épaisseur optique du nuage dans la dynamique de la transmission vers l'avant
- Échantillon en boule gaussienne : apparition d'une structure en anneau
- La connaissance de la transmission à l'allumage et à l'extinction de la sonde  $\Rightarrow$  étude dynamique de la phase  $\Rightarrow$  connaissance complète du champ transmis (amplitude et phase)

# Plan

- Refroidissement sur Strontium
- Transmission cohérente par un milieu diffusant
- Interaction de type gravitationnel dans les atomes froids
  - Systèmes à interactions attractives à longue portée
  - Montage/principe expérimental
  - Système 1D présentant des interactions type gravitationnel
  - Résultats expérimentaux
  - Conclusion
- Conclusion et perspectives

# Un nuage d'atomes froids :

Un système présentant des interactions de type gravitationnel

Lorsque la longueur d'interaction entre les éléments microscopiques d'un système devient comparable à la taille de ce système

⇒ Système d'interaction à longue portée

La force gravitationnelle : Un exemple d'interaction à longue portée



Notre galaxie

# Un nuage d'atomes froids :

Un système présentant des interactions de type gravitationnel

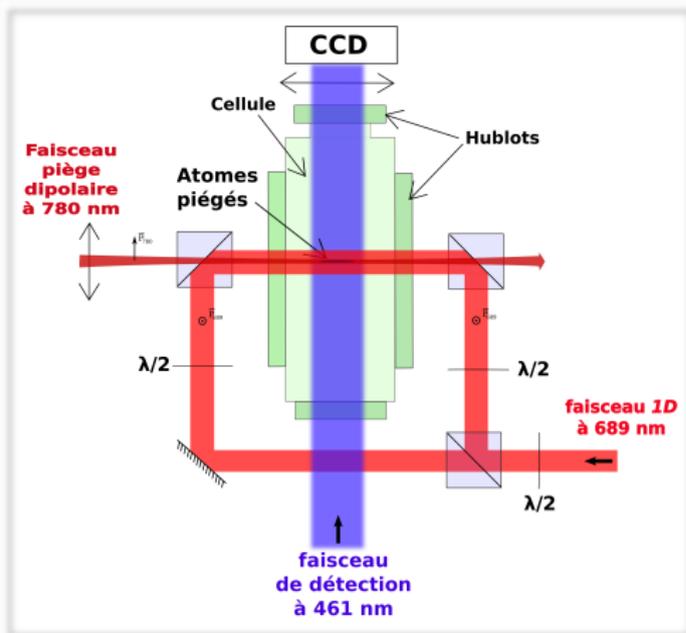
## Problématique expérimentale :

Beaucoup de théories et simulations numériques proposées  
Mais aucune expérience de laboratoire sur des systèmes présentant des interactions attractives à longue portée.

## Dans les atomes froids à $1D$ :

La force due à l'effet d'ombre est une force attractive  
Dans la condition  $b \ll 1$ , cette force s'apparente à une force gravitationnelle à  $1D$

# Montage expérimental et forces en présence



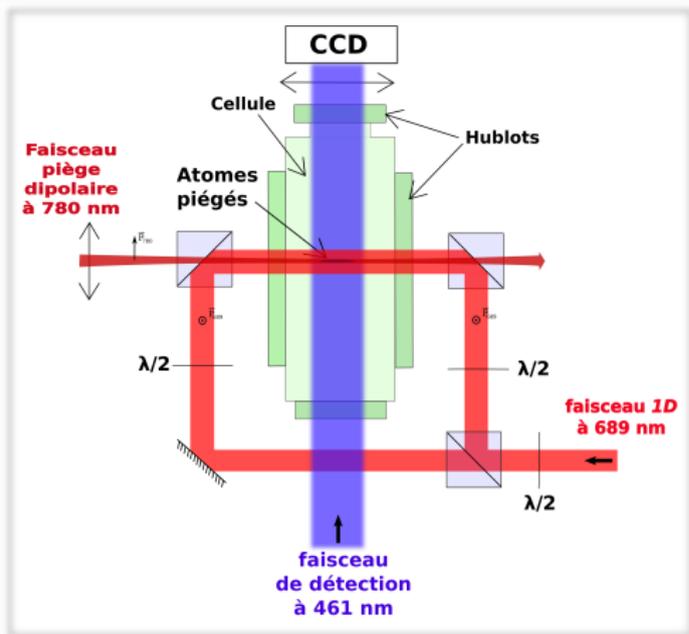
## ● Piègeage dipolaire :

$$\vec{F}_{dip}(x, y, z) = -m (\omega_0^2 z \hat{z} + \omega_{\perp}^2 (x \hat{x} + y \hat{y}))$$

$$\omega_0 = 2\pi \times 7 \text{ Hz}$$

$$\omega_{\perp} = 2\pi \times 680 \text{ Hz}$$

# Montage expérimental et forces en présence



- Piègeage dipolaire :

$$\vec{F}_{dip}(x, y, z) = -m (\omega_0^2 z \hat{z} + \omega_{\perp}^2 (x \hat{x} + y \hat{y}))$$

$$\omega_0 = 2\pi \times 7 \text{ Hz}$$

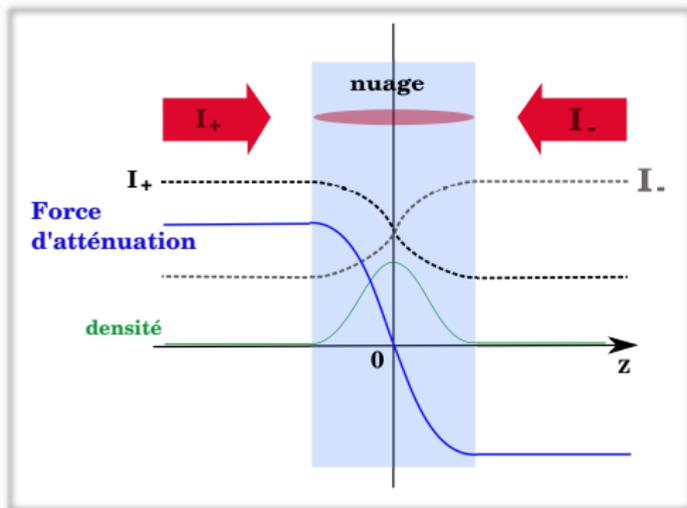
$$\omega_{\perp} = 2\pi \times 680 \text{ Hz}$$

- La force de pression de radiation :

$$F_{\pm}(z, v_z) = \frac{F_m}{I_s} \frac{I_{\pm}(z)}{1 + 4 \left( \frac{\delta_L \pm kv_z}{\Gamma} \right)^2}$$

où  $F_m = \frac{\hbar k \Gamma}{2}$  et  $I_s$  est l'intensité de saturation

# Mécanisme de la force attractive



L'atténuation des lasers à faible épaisseur optique :

$$dI_{\pm} = \mp I_{\pm} \sigma n(z) dz$$

où  $\sigma = \frac{3\lambda^2}{2\pi} \frac{\Gamma^2}{4\delta^2 + \Gamma^2}$  : la section efficace de diffusion (pour un désaccord laser  $\delta$  et en négligeant sa dépendance en vitesse)

$n(z)$  : la densité atomique

# Système 1D présentant des interactions type gravitationnel

## Les hypothèses

À faible saturation  $I_+, I_- \ll I_s$ ,

La linéarisation en vitesse :

$$F_{\pm}(z, v_z) \simeq \frac{F_m}{I_s} \frac{I_{\pm}(z)}{1 + 4\bar{\delta}_L^2} \left( 1 \mp \frac{8\bar{\delta}_L \frac{kv_z}{\Gamma}}{1 + 4\bar{\delta}_L^2} \right)$$

où  $\bar{\delta}_L = \frac{\delta_L}{\Gamma}$

L'épaisseur optique  $b$  petite :

$$b = \sigma \int_{-\infty}^{+\infty} \rho dz \ll 1$$

En régime de faible vitesse ( $kv \ll \delta_L$ ) et dans la limite sur-amortie, la densité spatiale vérifie l'équation de Schmoluchoski en régime stationnaire :

$$-\nabla_r \left( \frac{F_{tot}(r)}{m\kappa} \rho \right) + D \nabla_r^2 \rho = 0$$

$D = \frac{k_B T}{m\kappa}$  le coefficient de diffusion

Longueur caractéristique de l'interaction attractive :

$$L_i = \frac{2k_B T}{\hbar k \Gamma b} (1 + 4\bar{\delta}_L^2) \frac{I_s}{I_0}$$

$I_0$  étant l'intensité de chacun des lasers.

Deux longueurs caractéristiques présentes dans notre système :  
 $L_i$  et  $L_{\setminus\setminus}$

$$L_{\setminus\setminus} = \sqrt{\frac{k_B T}{m\omega_0^2}}$$

# Profil de densité

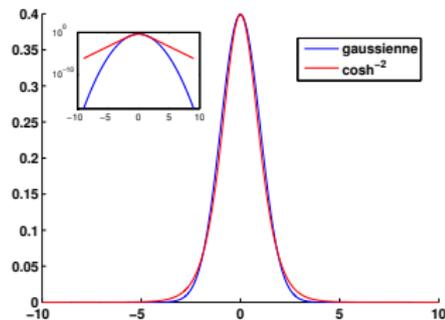
Une solution analytique de l'équation de Schmoluchowski peut être obtenue en se plaçant dans l'approximation  $L_i \ll L_{\setminus}$   
 Le profil de densité est alors :

$$\rho_0(z) = \frac{1}{L_i} \frac{2(1 - e^{-b/4})^2}{b^2} \frac{1 - \tanh^2[(1 - e^{-b/2})z/2bL_i]}{1 - \frac{(1 - e^{-b/4})^2}{(1 + e^{-b/4})^2} \tanh^2[(1 - e^{-b/2})z/2bL_i]}$$

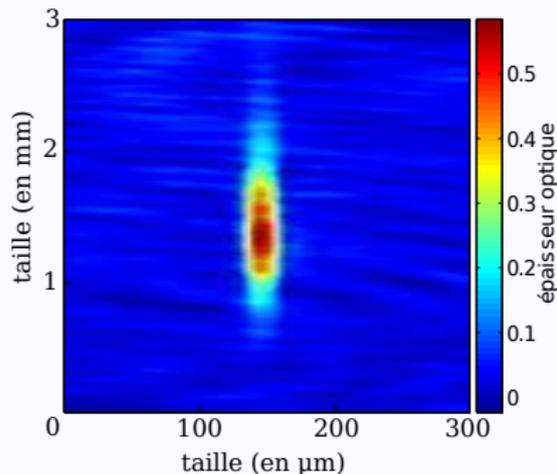
En nous plaçant dans la limite  $b \ll 1$ , la solution pour le profil de densité devient :

$$\rho_0(z) = \frac{1}{8L_i} \frac{1}{\cosh^2(z/4L_i)}$$

**Profil connu pour les systèmes 1D à interaction de type gravitationnel**



# Présence d'une force attractive

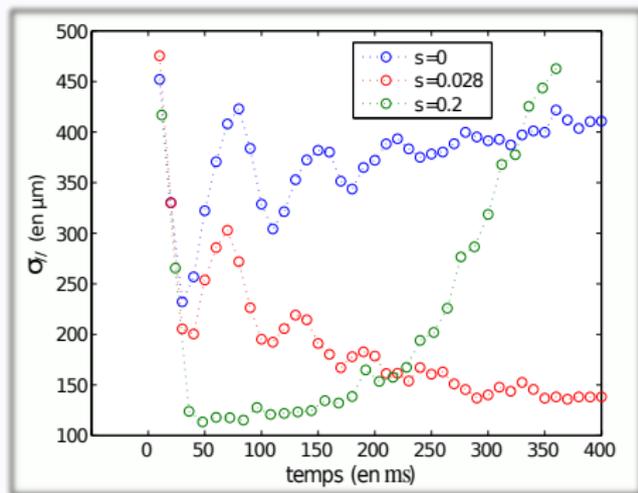


Nombre d'atomes :  $2.10^5$

Profondeur du piège :  $\sim 20\mu K \gg 1\mu K$

$\omega_{\parallel} = 2\pi \times 7$  Hz

## Dynamique temporelle de compression du nuage



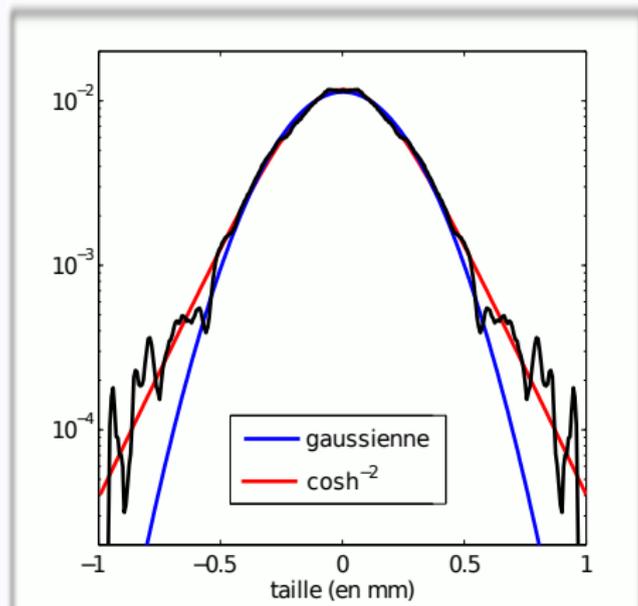
# Signature sur le profil

En régime stationnaire

En présence des lasers

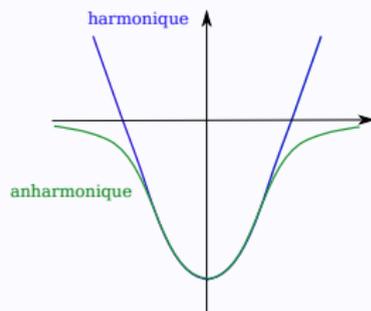
Lorsque les conditions  $b \ll 1$  et  $L_i \ll L_{\parallel}$  ( $\frac{L_i}{L_{\parallel}} \sim \frac{1}{7}$ )

sont vérifiées



**Signature encourageante**

Attention : effets  
systématiques dus à  
l'anharmonicité  
 $\Rightarrow$  artefact ???



# Signature sur le mode de respiration.

En régime sous-amorti

En assumant que la force d'interaction est de la forme  $\frac{1}{r^k}$ , on a :

$$\left(\frac{\omega_{\parallel}}{\omega_0}\right)^2 = (3 - k)\left(\frac{L_{\parallel}^2}{\sigma_{rms}^2} - 1\right) + 4$$

Condition de force à longue portée pour un système de dimension  $d$  :

$$F(r) \propto \frac{1}{r^k} \quad \text{avec} \quad \frac{k}{d} < 1$$

$\omega_{\parallel}$  pulsation du mode de respiration

$\omega_0$  pulsation du mode propre du piège

$L_{\parallel}$  taille de l'échantillon thermique à l'équilibre avec le piège dipolaire

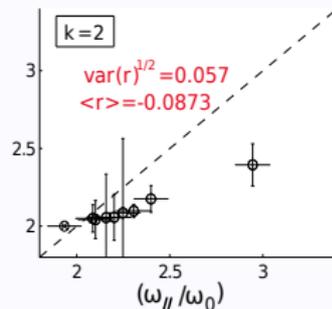
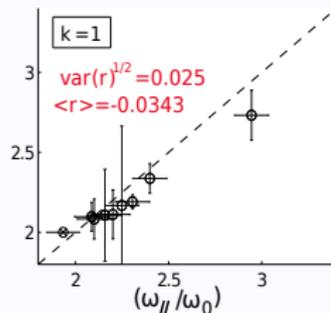
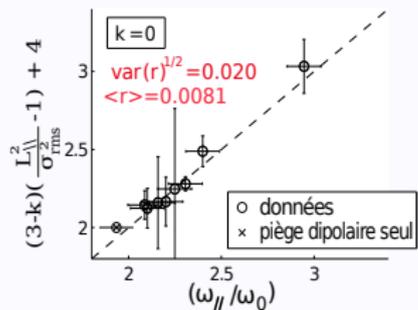
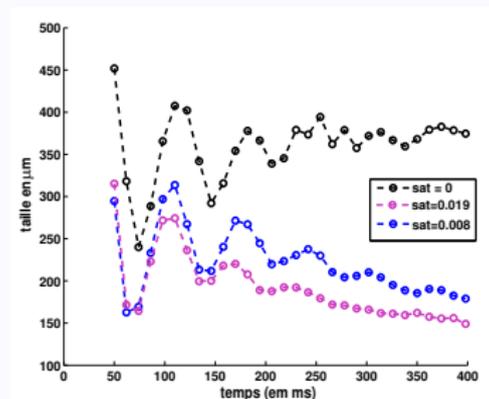
$\sigma_{rms}$  distribution spatiale en présence de l'interaction.

# Signature sur le mode de respiration

En régime sous-amorti

## Mesures expérimentales

$$\left(\frac{\omega_{\parallel}}{\omega_0}\right)^2 = (3 - k) \left(\frac{L_{\parallel}^2}{\sigma_{rms}^2} - 1\right) + 4$$



# En résumé...

- Modèle de système à  $1D$  présentant une interaction à longue portée dans les atomes froids par l'utilisation de la force attractive due à l'effet d'ombre
- Signatures encourageantes sur le profil de densité et sur les modes d'oscillations du nuage

# Plan

- Refroidissement sur Strontium
- Transmission cohérente par un milieu diffusant
- Interaction de type gravitationnel dans les atomes froids
- Conclusion et perspectives

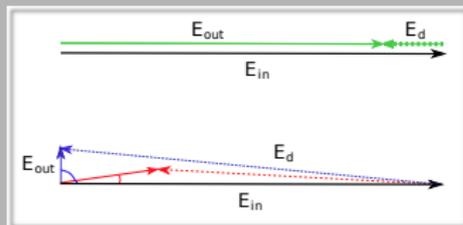
# Conclusion/Rappels

- **Utilisation inédite des propriétés de la transition d'intercombinaison du Strontium**
- **Transmission cohérente :**
  - Échelles de temps suffisamment longues pour permettre une étude temporelle
  - Mise en évidence de temps caractéristiques liés à la température et l'épaisseur optique
  - Visualisation de structures
  - Observation d'une dynamique de phase
- **Système à interaction type gravitationnel**
  - Mise en place d'un dispositif expérimental efficace : piège dipolaire, annulation du déplacement d'horloge...
  - Proposition d'un modèle de système à  $1D$  présentant une interaction à longue portée dans les atomes froids
  - Signatures encourageantes sur le profil de densité et sur les modes de vibration du nuage

# Perspectives

## Transmission cohérente :

- Compréhension des mécanismes de la dynamique de la phase à forte épaisseur optique
- Possibilité d'observer un "super flash" ? ("flash" lumineux d'intensité supérieure à  $I_{in}$ )



## Système à interaction de type gravitationnel :

- Une étude en fonction du nombre d'atomes dans le piège.
- Passage à un système à deux dimensions : présence d'une transition de phase.

# Remerciements

## Transmission cohérente :

- Dominique Delande
- Romain Pierrat

## Système à interaction de type gravitationnel :

- Julien Barré
- Bruno Marcos
- Alain Olivetti

## Piège dipolaire :

- Bruce Klappauf