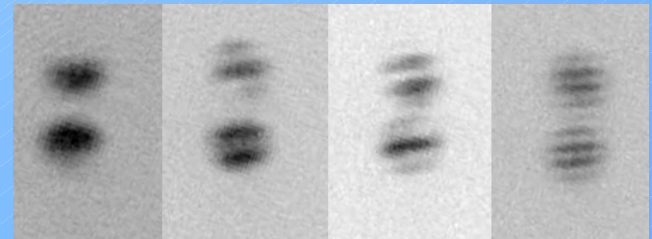
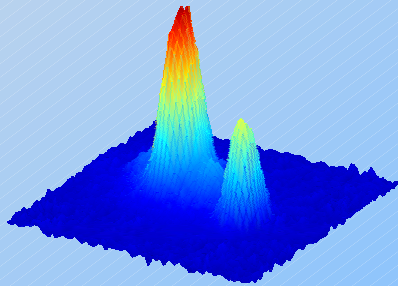


Institut d'Optique

Journées du GREX, Nice, Octobre 2004

INTERFEROMETRIE ATOMIQUE COHERENTE POUR MESURES DE PRECISION DANS L'ESPACE



Yann LE COQ

Institut d'Optique, Orsay, France

I) Interférométrie atomique et sources ultra-froides

- Métrologie avec des atomes froids
- Nécessite de la chute libre
- Sources ultra-froides, CBE et lasers à atomes

II) Spectroscopie de Bragg d'un condensat de Bose-Einstein

- Principe de la diffraction de Bragg
- Implémentation expérimentale
- Mesures

III) Limites dues aux interactions

- Erreurs systématiques et élargissements
- Perte de cohérence
- Expansion rapide en chute libre

Conclusion : vers l'interférométrie avec fermions dégénérés ?

I) Interférométrie atomique et sources ultra-froides

- Métrologie avec des atomes froids
- Nécessite de la chute libre
- Sources ultra-froides, CBE et lasers à atomes

II) Spectroscopie de Bragg d'un condensat de Bose-Einstein

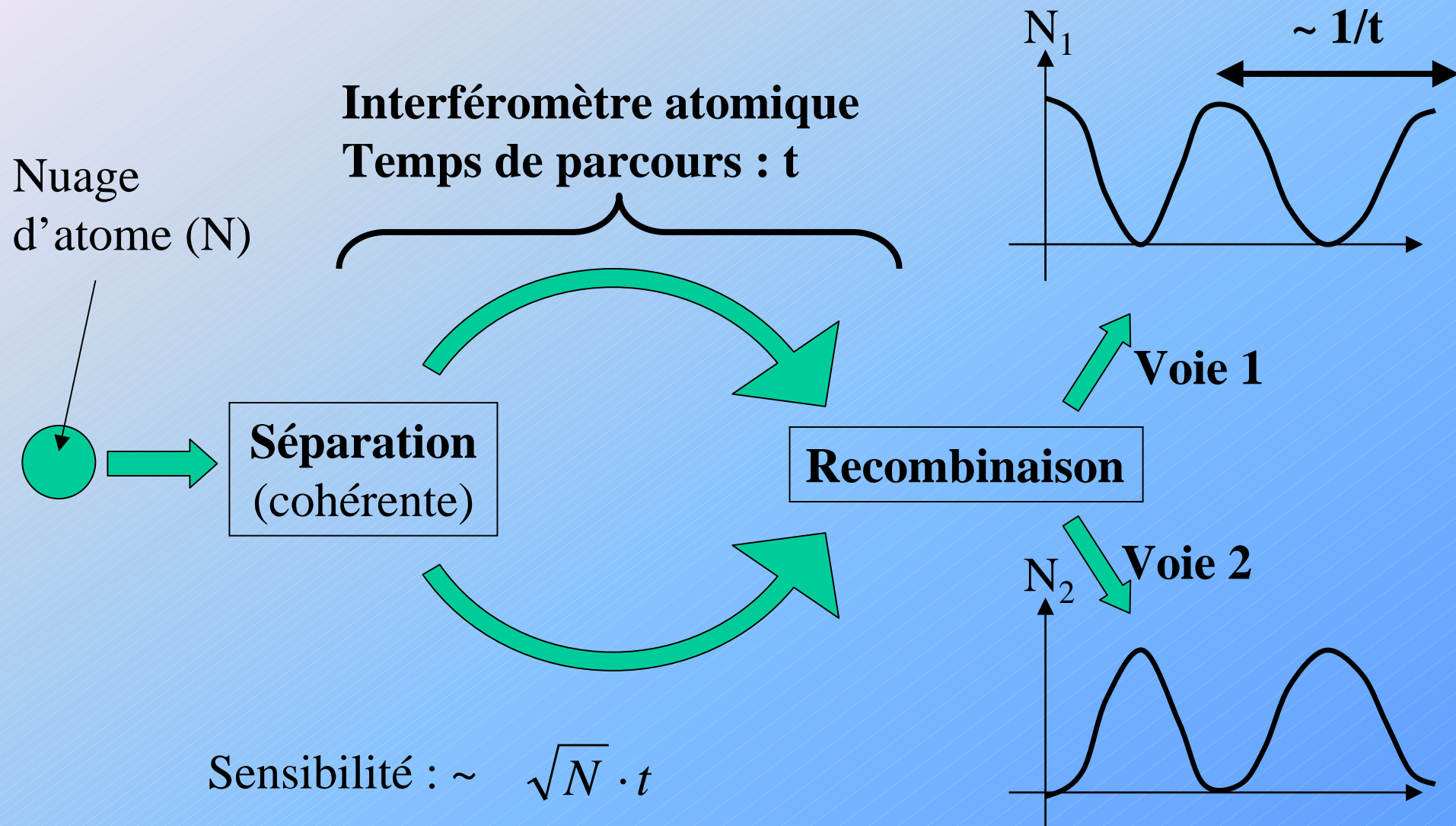
- Principe de la diffraction de Bragg
- Implémentation expérimentale
- Mesures

III) Limites dues aux interactions

- Erreurs systématiques et élargissements
- Perte de cohérence
- Expansion rapide en chute libre

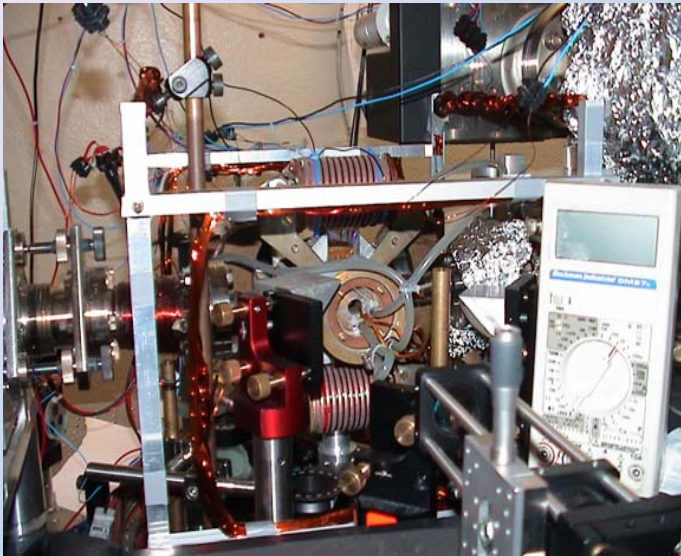
Conclusion : vers l'interférométrie avec fermions dégénérés ?

Métrologie avec des atomes froids

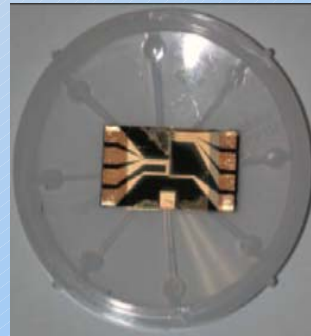


Intérêt de la chute libre

On sait piéger les atomes dans des pièges non-dissipatifs



Pièges magnétiques



Pièges optiques

→ Interféromètres guidés ?

MAIS

Perturbation mal maîtrisée

Perte de cohérence (diffusion de phase)

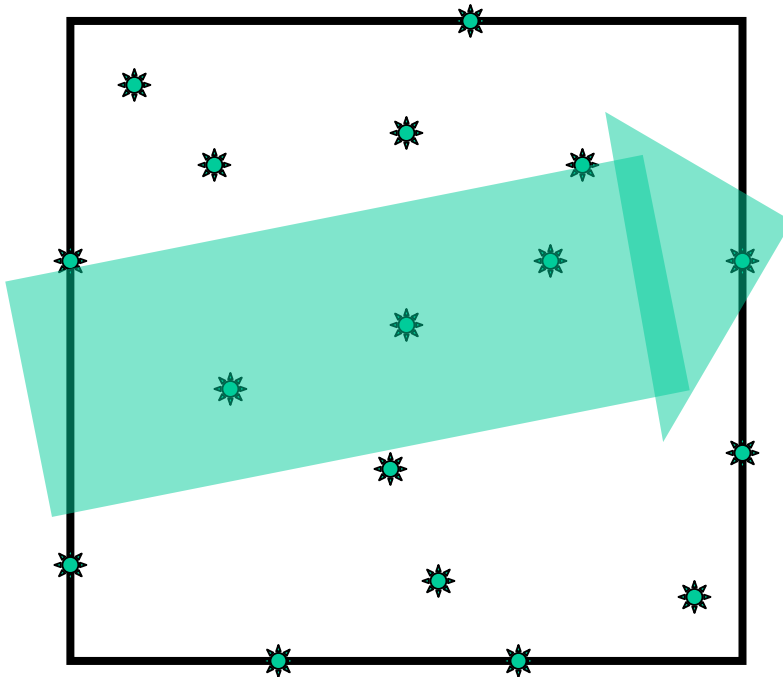
→ exactitude

→ sensibilité

Intérêt des sources ultra froides pour la métrologie en micro-gravité

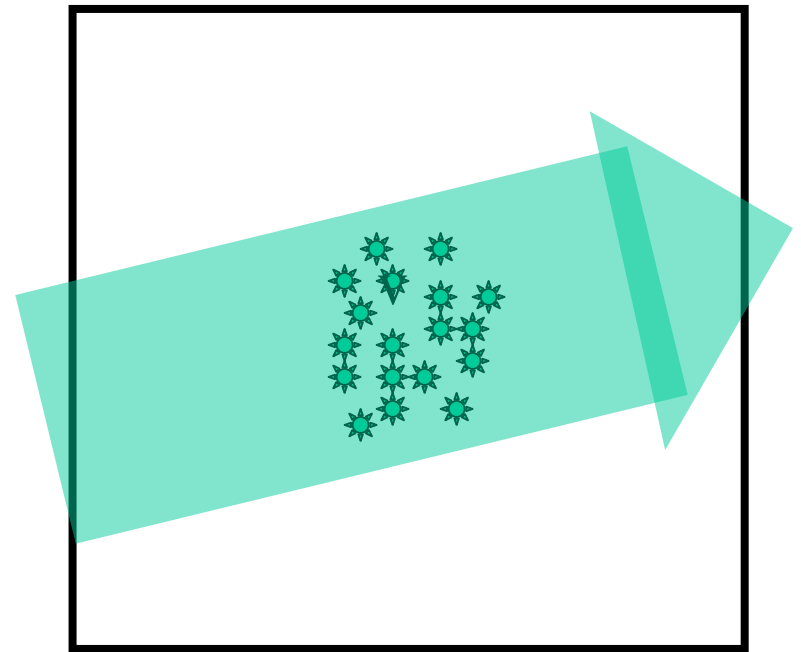
Sources froides « classiques »

Lecture

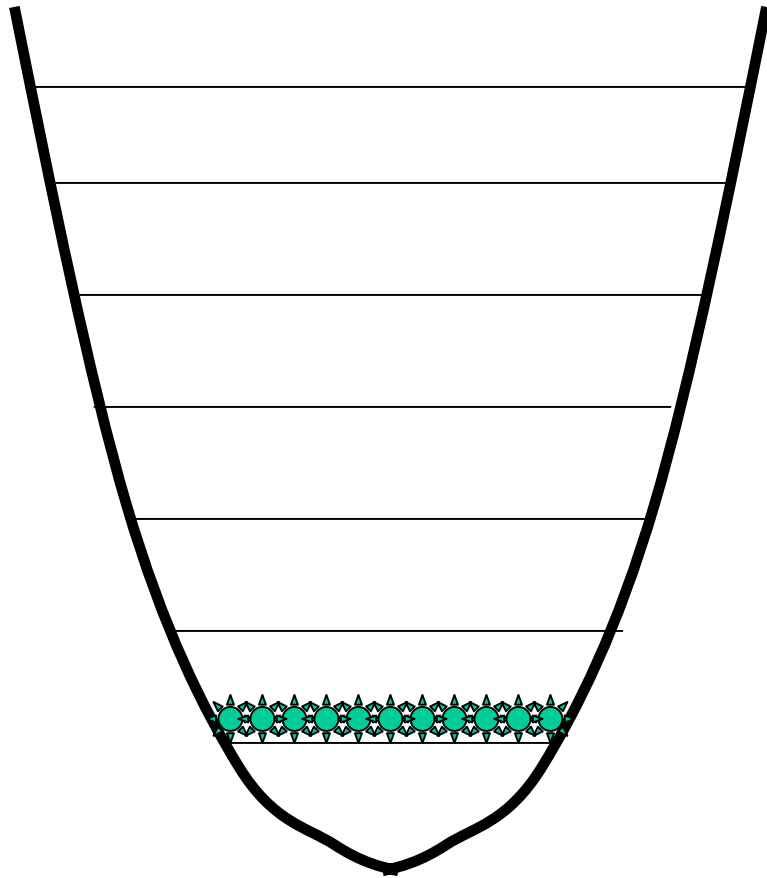


Sources Ultra-froides

Lecture



Le condensat de Bose-Einstein : Source ultra froide ultime



CBE = étape ultime du refroidissement
d'un gaz d'atomes piégés

Intérêts:

- $T = 0$ K, fortes densités \Rightarrow temps
d'interactions interféromètre ↗
à RSB constant
- Cohérence (1 seul état peuplé) \rightarrow
quelles utilisations possibles ?
 - Mesure directe l'interférogramme
 - squeezing en phase, ... ?

Plan de l'exposé

I) Interférométrie atomique et sources ultra-froides

- Métrologie avec des atomes froids
- Nécessite de la chute libre
- Sources ultra-froides, CBE et lasers à atomes

II) Spectroscopie de Bragg d'un condensat de Bose-Einstein

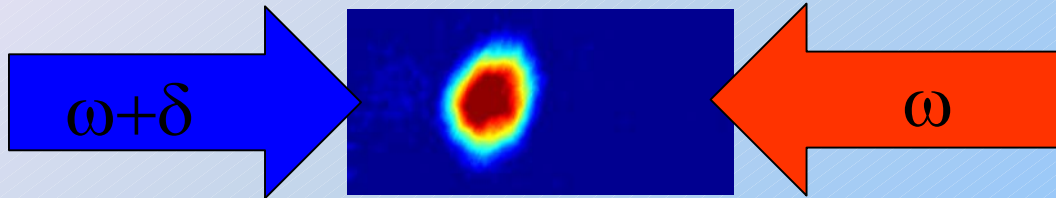
- Principe de la diffraction de Bragg
- Implémentation expérimentale
- Mesures

III) Limites dues aux interactions

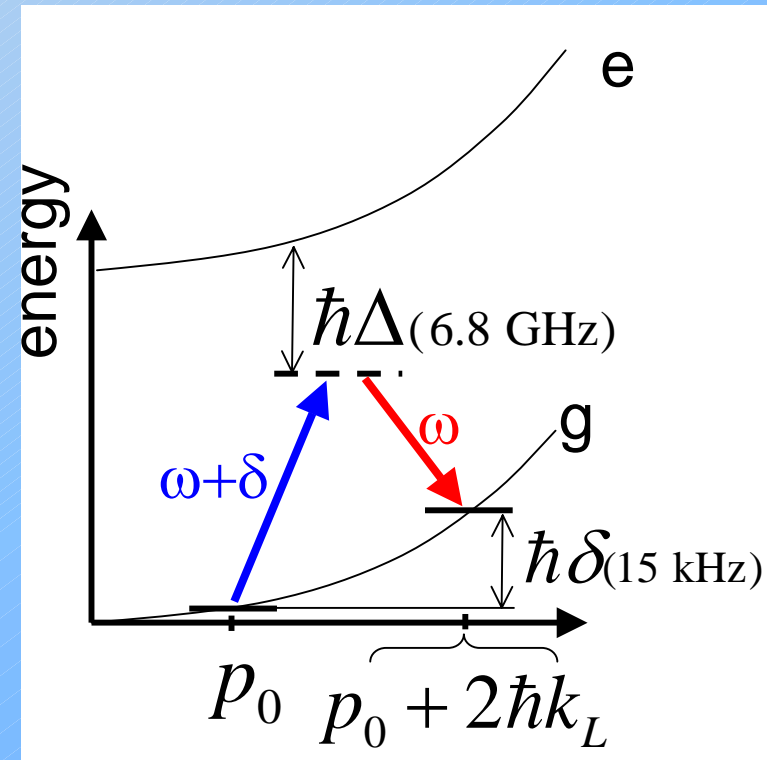
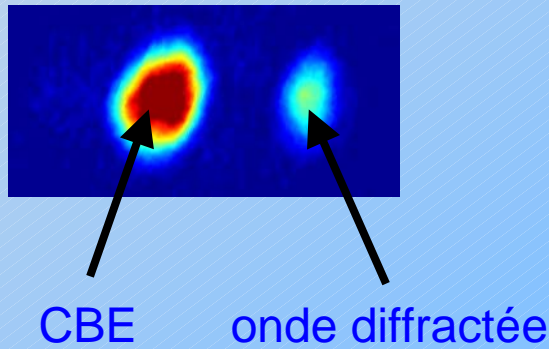
- Erreurs systématiques et élargissements
- Perte de cohérence
- Expansion rapide en chute libre

Conclusion : vers l'interférométrie avec fermions dégénérés ?

Principe de la diffraction de Bragg

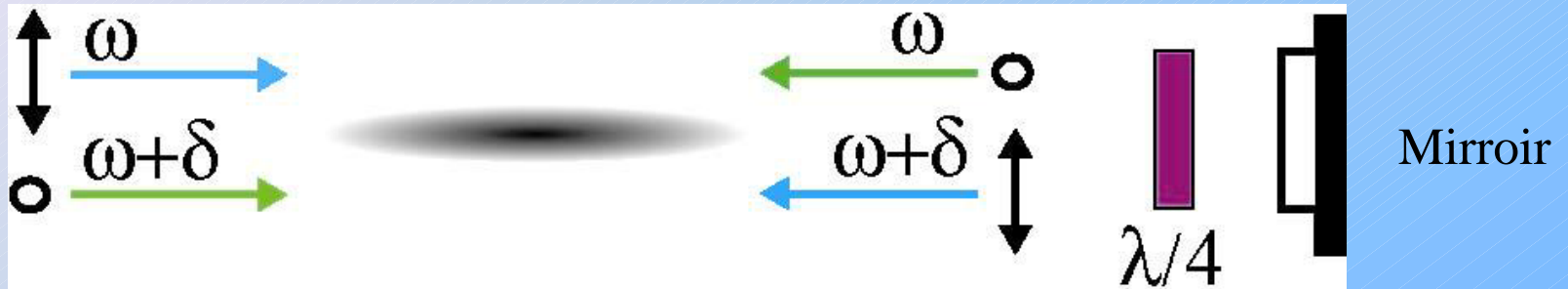


Tof 21 ms



M. Kozuma et al., PRL 82, 871 (1999)
J. Stenger et al., PRL 82, 4569 (1999)

Mise en oeuvre expérimentale



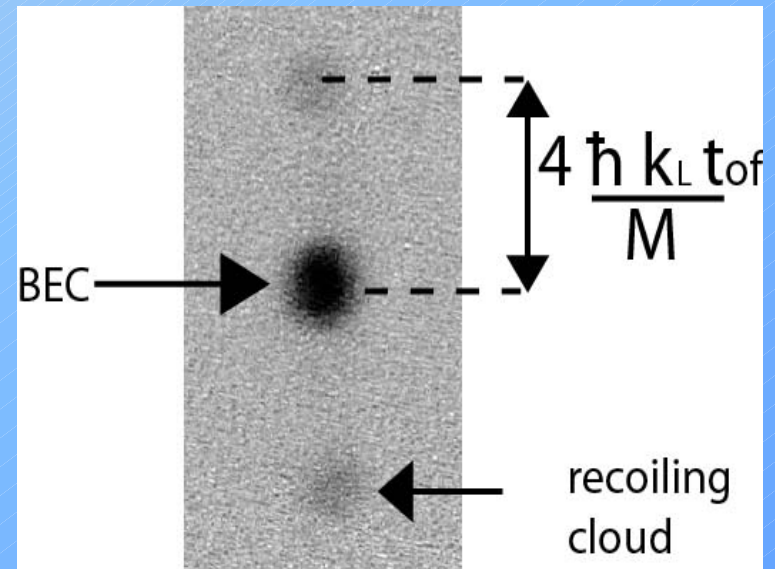
2 AOM's indépendents (80 MHz)
avec driver très stables

Faisceaux co-propageants
Réjection de mode commun
Un seul miroir à stabiliser

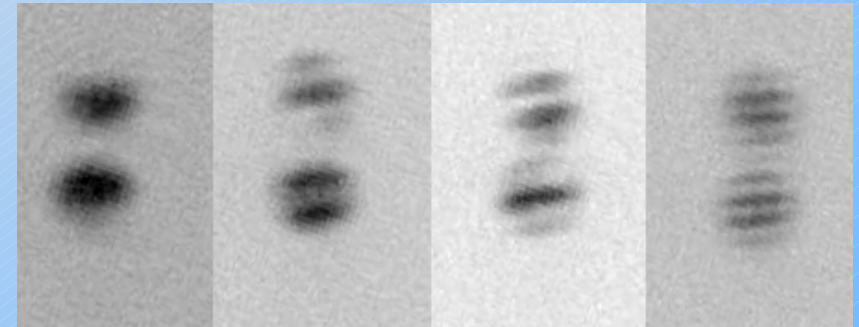
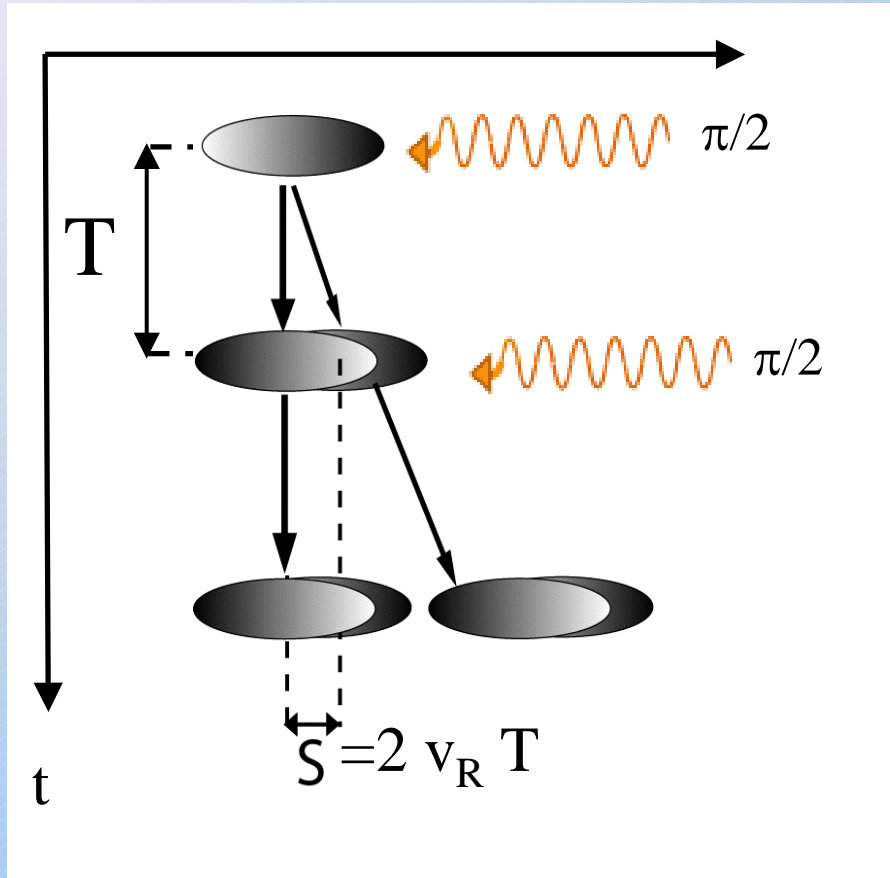
Deux réseaux optiques

→ 2 ordres diffractés $\pm 4 k_L$

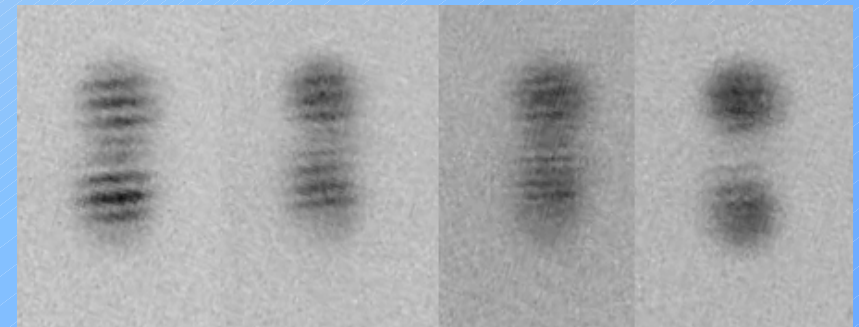
Bragg à 4 photons pour plus grand transfert d'impulsion



Un exemple d'interféromètre à CBE

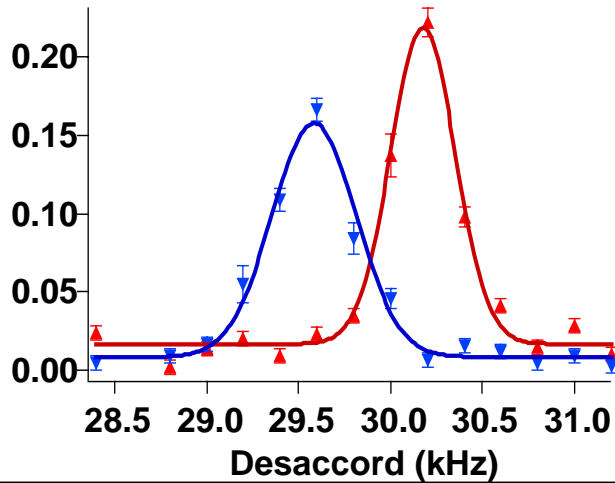


$S = 6 \mu\text{m}$ $12 \mu\text{m}$ $23 \mu\text{m}$ $35 \mu\text{m}$



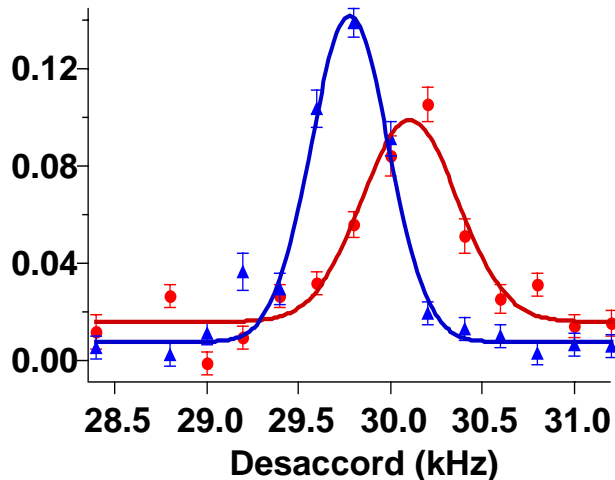
$S = 47 \mu\text{m}$ $59 \mu\text{m}$ $70 \mu\text{m}$ $82 \mu\text{m}$

Mesure de la vitesse recul



2 spectres provenant des deux réseaux opposés

Rejection de mode commun de l'effet Doppler
(vitesse initiale du CBE)



Valeur centrale = 4x énergie de recul

Mesure de la vitesse recul

Moyennage sur 3000 points
donne :

$$\hbar/m = \lambda^2/4 \times \delta\nu$$

Valeur moyenne :

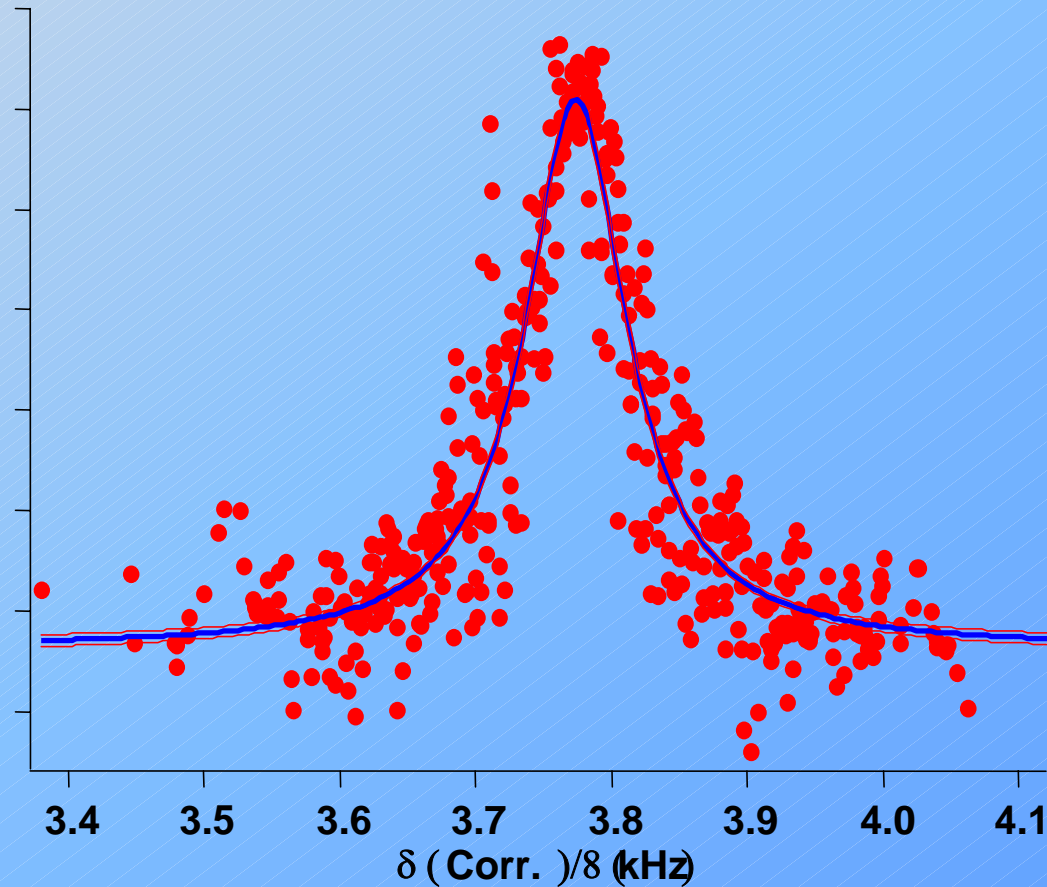
4.59468 ± 0.00006

nJ.s/kg

Valeur attendue

(CODATA)

$4.591359 \cdot 10^{-9}$ nJ.s/kg



Plan de l'exposé

I) Interférométrie atomique et sources ultra-froides

- Métrologie avec des atomes froids
- Nécessite de la chute libre
- Sources ultra-froides, CBE et lasers à atomes

II) Spectroscopie de Bragg d'un condensat de Bose-Einstein

- Principe de la diffraction de Bragg
- Implémentation expérimentale
- Mesures

III) Limites dues aux interactions

- Erreurs systématiques et élargissements
- Perte de cohérence
- Expansion rapide en chute libre

Conclusion : vers l'interférométrie avec fermions dégénérés ?

Mesure de la vitesse recul : effet des interactions

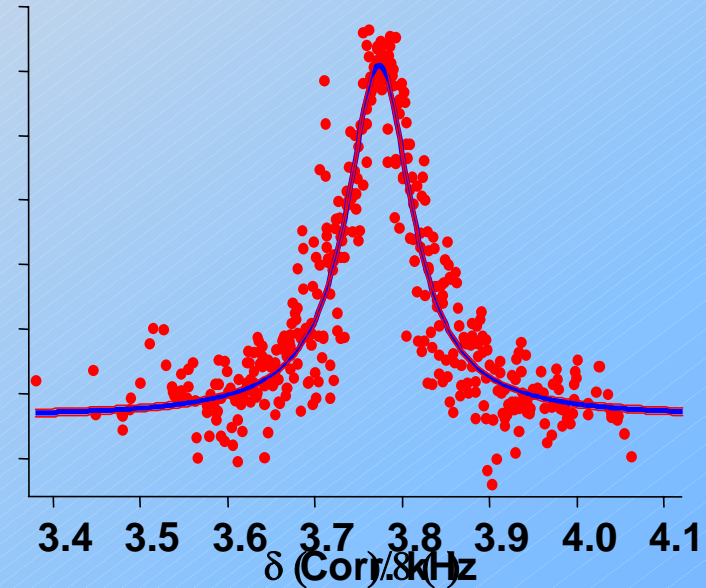
Moyennage sur 3000 points
 donne : $h/m = \lambda^2/4 \times \delta\nu$

Valeur moyenne :

4.59468 ± 0.00006 nJ.s/kg

Valeur attendue (CODATA)

4.591359... nJ.s/kg



Condition de résonance locale :

$$E_i = p_i^2 / 2m + U \cdot n(\vec{r})$$

$$E_f = p_f^2 / 2m + 2 \cdot U \cdot n(\vec{r})$$



$$h/m = \lambda^2/4 \cdot \left(\delta\nu - 1/2 \cdot U \cdot n(\vec{r}) \right)$$

Ecart à la théorie :

Mesuré :

0.00332 nJ.s/kg

Effet des interactions

(calculé)

0.0033 ± 0.0003 nJ.s/kg

Les limites due aux interactions

- **Biais résiduels** difficiles à connaître avec grande précision
(mesure de U , mesure de N ?)
- **Diminution de la cohérence**
(inhomogénéité des effets des interactions)
- **Expansion balistique** dominé par l'effet des interactions

Solution : diminuer les densités atomiques ?
(mais refroidissement inefficace à faible densité)
(comment atteindre l'équilibre thermodynamique ?)

Plan de l'exposé

I) Interférométrie atomique et sources ultra-froides

- Métrologie avec des atomes froids
- Nécessite de la chute libre
- Sources ultra-froides, CBE et lasers à atomes

II) Spectroscopie de Bragg d'un condensat de Bose-Einstein

- Principe de la diffraction de Bragg
- Implémentation expérimentale
- Mesures

III) Limites dues aux interactions

- Erreurs systématiques et élargissements
- Perte de cohérence
- Expansion rapide en chute libre

Conclusion : vers l'interférométrie avec fermions dégénérés ?

Sources **ultra froides** dans l'**espace**

→ longs **temps d'interrogation**, bon **RSB**

Applications

→ Mesures de **constantes fondamentales**

→ **horloges atomiques**

→ senseurs de champs **gravito-inertiels**

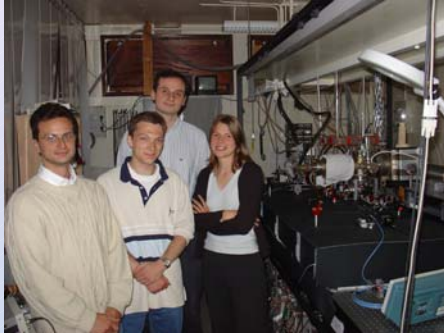
Limites des interactions : **Fermions dégénérés ?**

Principe de Pauli → pas de collisions ondes paires (s,d, etc...)

Très basse T → énergies collisionnelles faibles (seulement onde s)

 Gaz de **fermions ultra froid sans interactions !!!**
(Problème : cohérence limitée en $n^{-1/3}$)

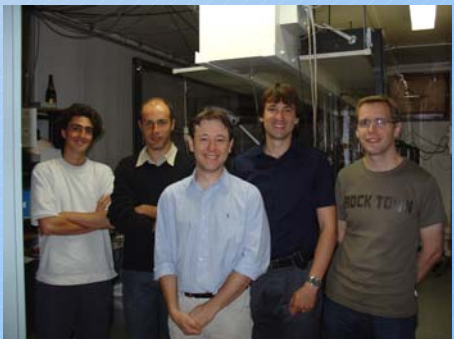
Collaborations



P. Bouyer (CNRS)
 A. Aspect (CNRS)
 M. Fauquembergue (DGA)
 J.F. Rioux
 W. Guérin (DGA)
 S. Schwartz (Thalès)



F. Gerbier (Mainz - I. Bloch)
 S. Richard (DGA)
 JH. Thywissen (U. Toronto)
 M. Hugbart (IXSEA)
 J. Retter (U.E.)
 A. Varon



P. Touboul (ONERA)
 A. Bresson (ONERA)
 S. Boussen (ONERA)
 A. Landragin (SYRTHE)
 C. Bordé (LPL)

