

SENSIBILITÉ DES INTERFÉROMÈTRES ATOMIQUE POUR LA DÉTECTION DES ONDES GRAVITATIONNELLES

Pacôme Delva, Marie-Christine Angonin, Philippe Tournenc

INTRODUCTION

1927 – Diffraction d'électrons par un cristal (Davisson & Germer)

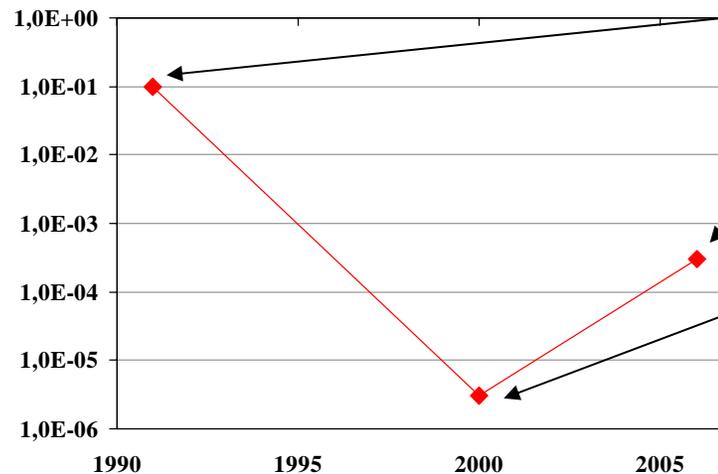
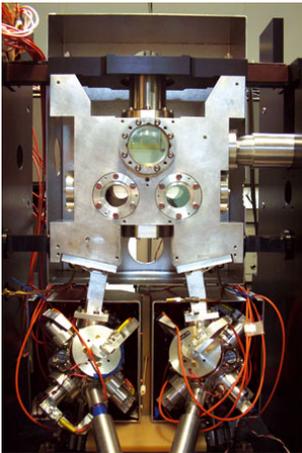
1975 – Premier interféromètre à neutrons (Colella et al.)

1991 – Premiers interféromètres à atomes (Carnal & Mlynek, Keith et al., Riehle et al., Kasevich & Chu)

1995 – Premières condensations de Bose-Einstein (Anderson et al., Davis et al., Bradley et al.)

Un exemple d'interféromètre : le gyromètre atomique

$$\Delta\phi \sim \frac{1}{\sqrt{\dot{N}t}}$$



Keith et al., ~ 100 at/s

Canuel et al., ~ 10⁷ at/s (bonne stabilité, compact)

Gustavson et al., ~ 10¹¹ at/s (mauvaise stabilité, grand)

La suite ? Robins et al. 2006, « achieving peak brightness in an atom laser », 4.2*10⁹ at/s

SENSIBILITÉ D'UN INTERFÉROMÈTRE ATOMIQUE AUX EFFETS INERTIELS

• Métrique : $ds^2 = (\eta_{\mu\nu} + K_{\mu\nu}) dx^\mu dx^\nu$, $K_{\mu\nu} \ll 1$

• Différence de phase dans un interféromètre :

$$\Delta\phi \sim \frac{c^2}{\hbar} \int K_{\mu\nu} p^\mu p^\nu \frac{dt}{E}$$

(Formule de Linet-Tourenç)

Accélération a

Rotation Ω

Onde Gravitationnelle h^{TT}

$$K_{00} \sim \frac{aL}{c^2}$$

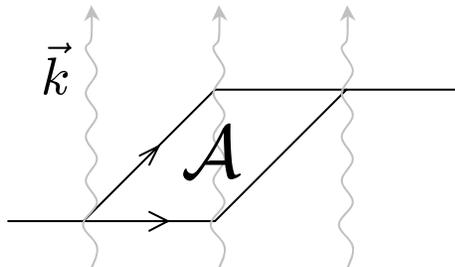
$$K_{0i} \sim \frac{\Omega L}{c}$$

$$K_{ij} \sim h^{TT}$$

$$\Delta\phi \sim \frac{ma}{\hbar} \cdot \frac{\mathcal{A}}{v}$$

$$\Delta\phi \sim \frac{m\Omega}{\hbar} \cdot \mathcal{A}$$

$$\Delta\phi \sim \frac{mh^{TT}}{\hbar} \cdot \frac{\mathcal{A}}{T}$$



$$\mathcal{A} = \frac{\hbar k v T^2}{m}$$

$$\Delta\varphi \sim kaT^2$$

$$\Delta\varphi \sim k\Omega v T^2$$

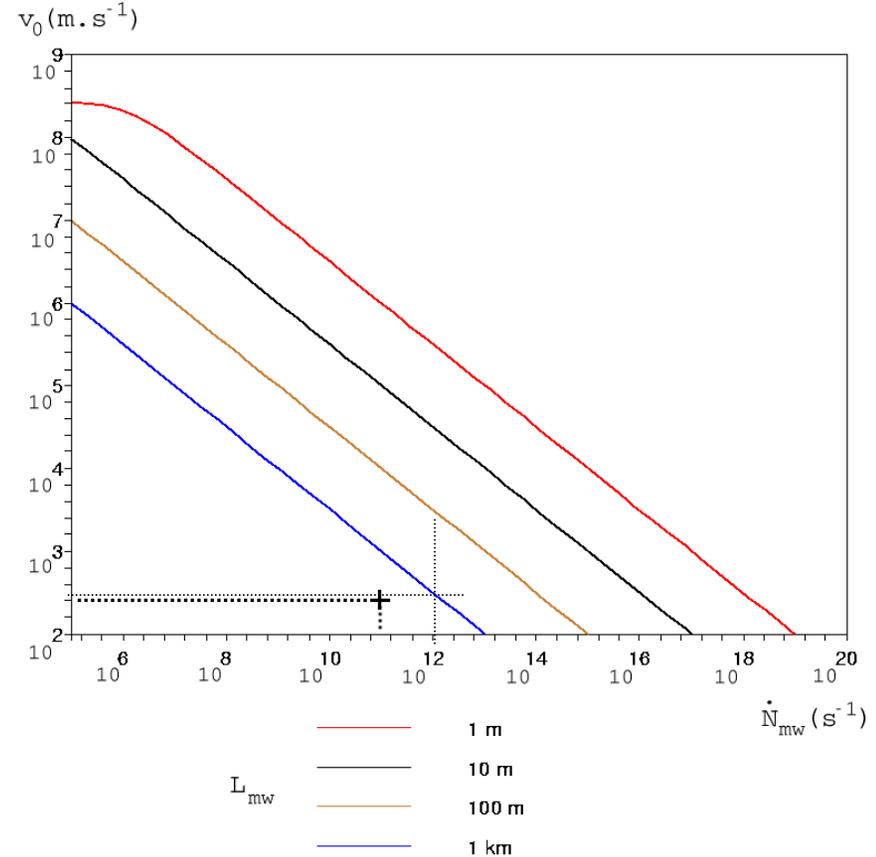
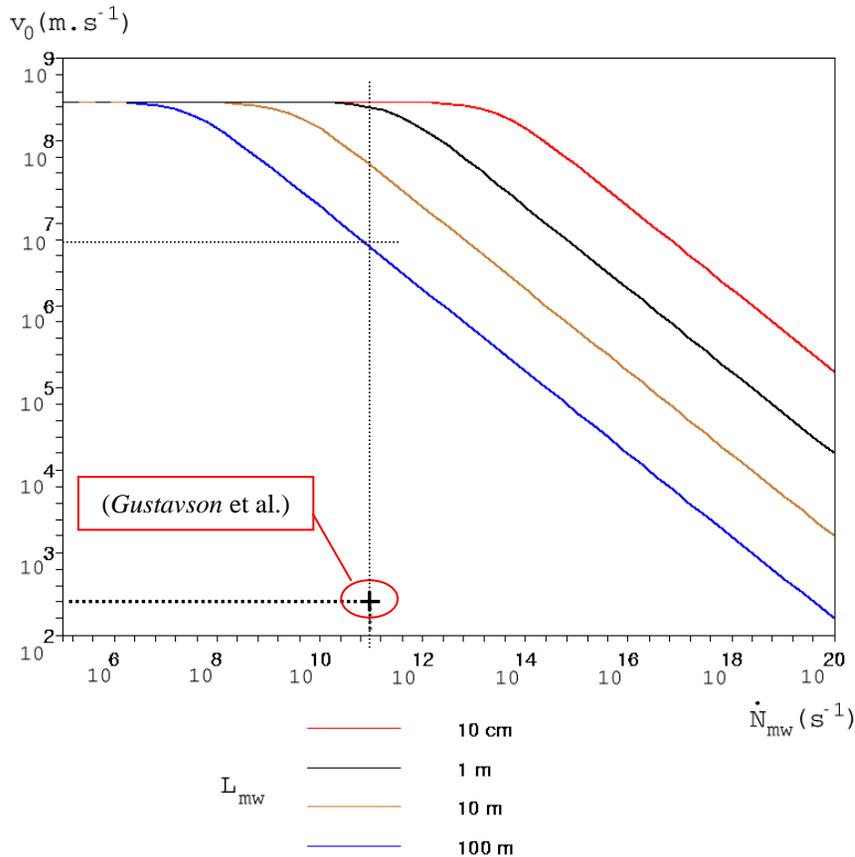
$$\Delta\varphi \sim kh^{TT} v T$$

INTERFÉROMÈTRES OPTIQUE ET INTERFÉROMÈTRES ATOMIQUES

- P. Delva, M.-C. Angonin and P. Tournenc, *A comparison between matter wave and light wave interferometers for the detection of gravitational waves*. In press, Physics Letters A (disponible en ligne).

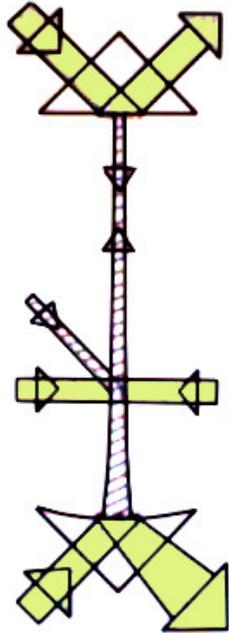
Pour atteindre la sensibilité de Virgo il faut des vitesses relativistes (accélération ?)

Pour atteindre la sensibilité de LISA avec des vitesses thermiques, il faut un interféromètre d'une longueur d'environ 1km (cavité atomique ?)



CAVITÉS ATOMIQUES

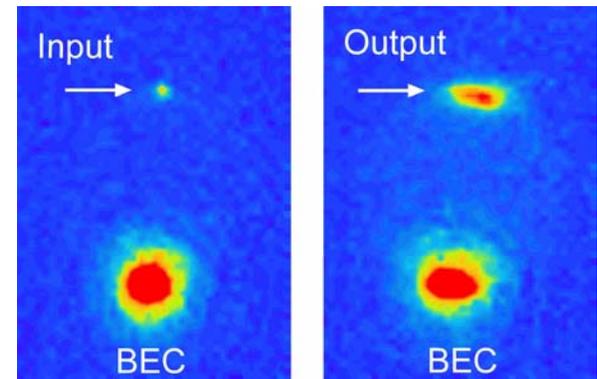
Balykin & Letokhov (1988)



- Avec une cavité atomique d'une bonne finesse (~ 1000 aller-retours), on peut atteindre la sensibilité de LISA avec un interféromètre atomique de 1 m de long.

- Utilisation d'un laser à atomes : meilleur flux, manipulation cohérente.
- Accélération cohérente d'atomes (Cladé 2005, LKB)
- On peut amplifier de façon cohérente un laser à atomes.

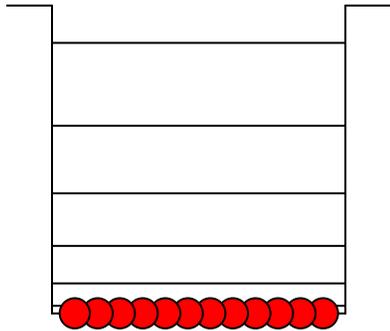
Ketterle (2001)



- Couplage d'un laser à atome avec un Condensat de Bose-Einstein.
- Description d'un Condensat de Bose-Einstein en relativité générale.

DESCRIPTION « SIMPLE » D'UN C.B.E. EN RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Puit de potentiel carré



$$T < T_C$$

- On néglige les interactions entre atomes -> contrainte sur la densité du condensat
- Equation de Klein-Gordon (relativiste)

$$(\square - m^2) \Psi(x) = 0, \quad \square \equiv g^{\alpha\beta} \nabla_\alpha \nabla_\beta$$

- Conditions aux limites

$$\begin{cases} \Psi(0) = 0 \\ \Psi(L) = 0 \end{cases}$$

- Changement de la température critique T_C (Al'taie 1978)
- Variation des niveaux d'énergies
- Phénomène de résonance pour les ondes gravitationnelles -> le condensat a une probabilité non nulle d'être excité.
- L'état final dépend du spectre d'onde gravitationnelle. Problème : faible durée de vie d'un condensat (\sim mn).

CONCLUSION

- L'essor incroyable de l'interférométrie atomique depuis 15 ans, couplée à un essor tout aussi important de la manipulation d'ondes atomique cohérentes, mène au développement de détecteurs très sensible aux effets inertiels, et à de nouveaux outils expérimentaux (cavités atomique, lasers à atome, amplificateur et accélérateurs cohérents d'onde de matière...).
- Cet essor pourrait mener à la fabrication d'un interféromètre atomique sensible aux ondes gravitationnelles pouvant concurrencer LISA, dont l'intérêt est de mesurer seulement un mètre, et qui pourrait être refroidi énormément pour lutter contre le bruit thermique.
- Le couplage entre un condensat de Bose-Einstein et un laser atomique peut mener à un nouveau type de détecteur, basé sur la résonance entre une cavité atomique et une onde gravitationnelle (article en cours de rédaction).

Merci!