

Interférométrie atomique pour la mesure de g et son gradient vertical

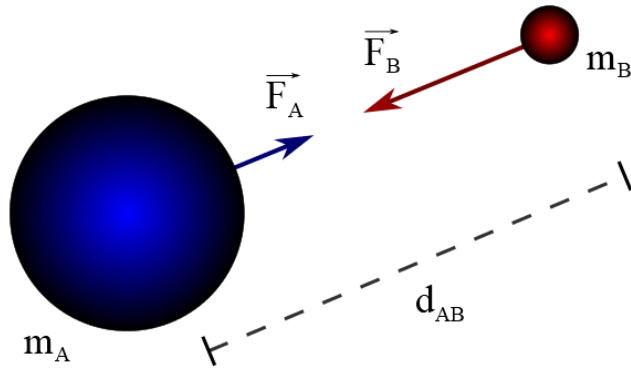
Assemblée générale de FIRST-TF
Caldani Romain

LNE-SYRTE

*Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université,
61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France*

La Gravimétrie

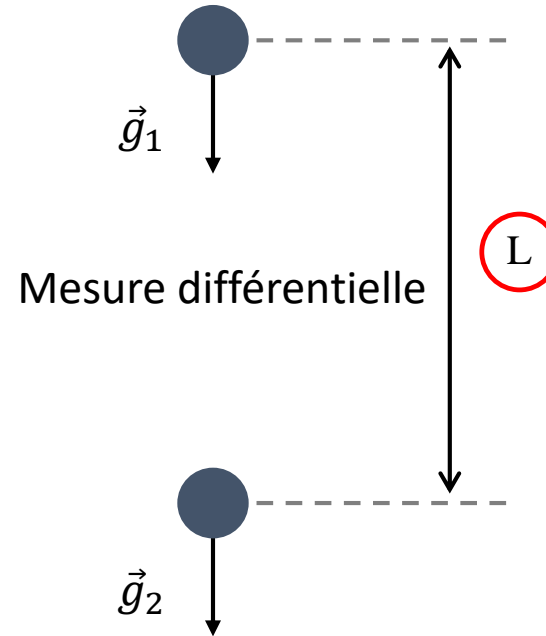
L'étude de g et son gradient



$$\vec{a}_{grav} = -G \frac{m_A}{d_{AB}^2} \cdot \vec{u}_r$$

Accélération de la pesanteur sur Terre:
 $g \sim 9,8 \text{ m/s}^2$
 $g \sim 980 \text{ Gal}$

$$1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$



Gradient vertical d'accélération sur Terre:
 $\gamma \sim 3 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2/\text{m}$
 $\gamma \sim 3000 \text{ E}$

$$1 \text{ E} = 10^{-9} \text{ m/s}^2/\text{m} = 10^{-5} \mu\text{Gal}/\text{m}$$

$$\Gamma = \vec{\nabla} \vec{g} = \begin{pmatrix} \partial_x g_x & \partial_x g_y & \partial_x g_z \\ \partial_y g_x & \partial_y g_y & \partial_y g_z \\ \partial_z g_x & \partial_z g_y & \partial_z g_z \end{pmatrix}$$

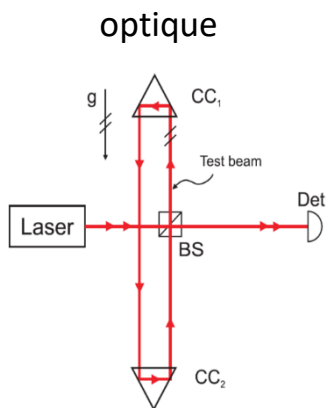
$$\gamma \approx \frac{g_1 - g_2}{L}$$

Si on néglige les termes d'ordre supérieur

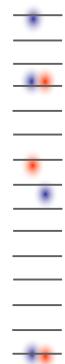
Instrumentation

Une technologie mature

Gravimètres absolus



atomique



FG5

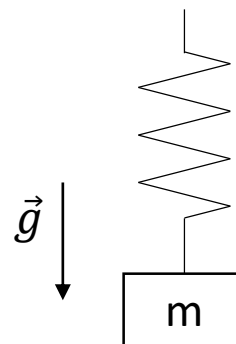


AQG

État de l'art $< 10 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$

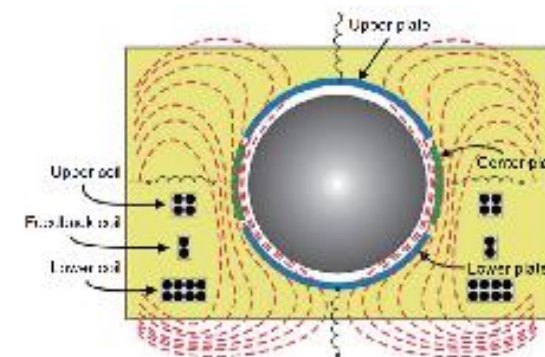
Gravimètres relatifs

mécanique



CG5

supraconducteur



iGrav

État de l'art $< 0.1 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$

Différents types de Gradiomètres

Gradiomètre

sensibilité

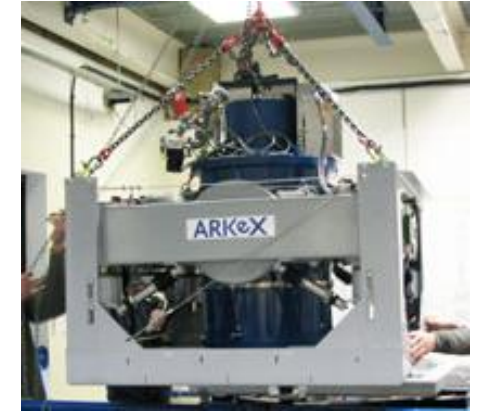
Lockheed Martin	3 E/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Supraconducteur (ARKeX)	1 E/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Electrostatique (GOCE)	15 mE / $\sqrt{\text{Hz}}$
Atomes froids 1 ^{er} generation	≈ 50 E/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Atomes froids 2 ^{eme} generation	15 E/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Instruments:

- Accélérométrie différentielle
- Objets de laboratoire / peu disponible
- Couteux / pas de solution commerciale



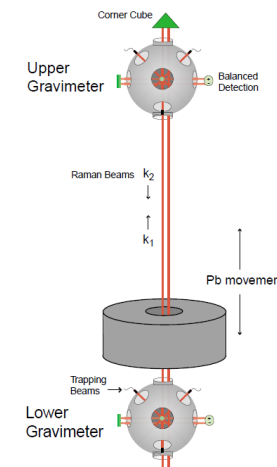
Gradiomètre Lockheed Martin: deux paire d'accéléromètres installé dans un disque rotatif



ARKeX: masses en lévitation avec des aimants supraconducteurs



GOCE: accéléromètres électrostatique. Ne fonctionne que en microgravité.

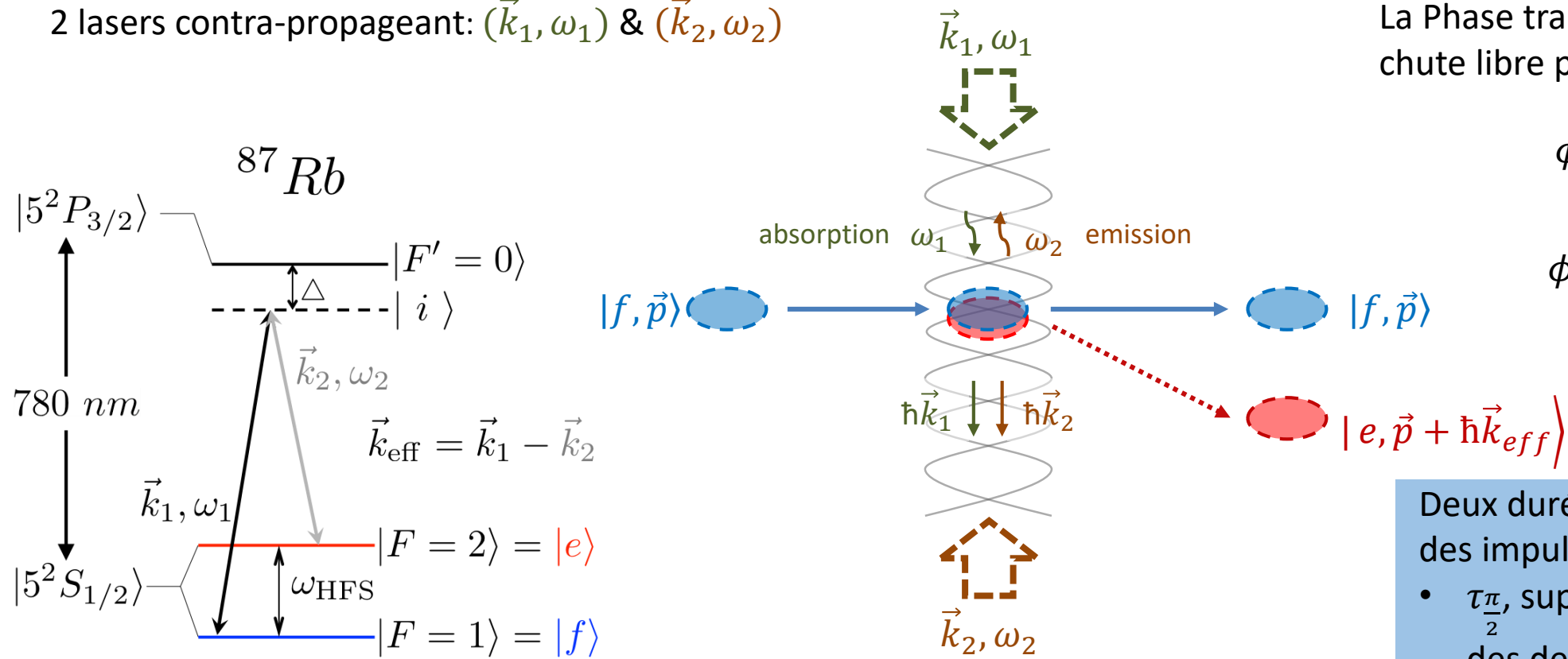


Interféromètre atomique

Séparatrice Raman

Outil historique de l'interférométrie atomique

2 lasers contra-propageant: (\vec{k}_1, ω_1) & (\vec{k}_2, ω_2)



La Phase transférée aux atomes en chute libre par une impulsion Raman:

$$\phi(t) = k_{\text{eff}}z(t)$$

$$\phi(t) = \frac{1}{2}k_{\text{eff}}gt^2$$

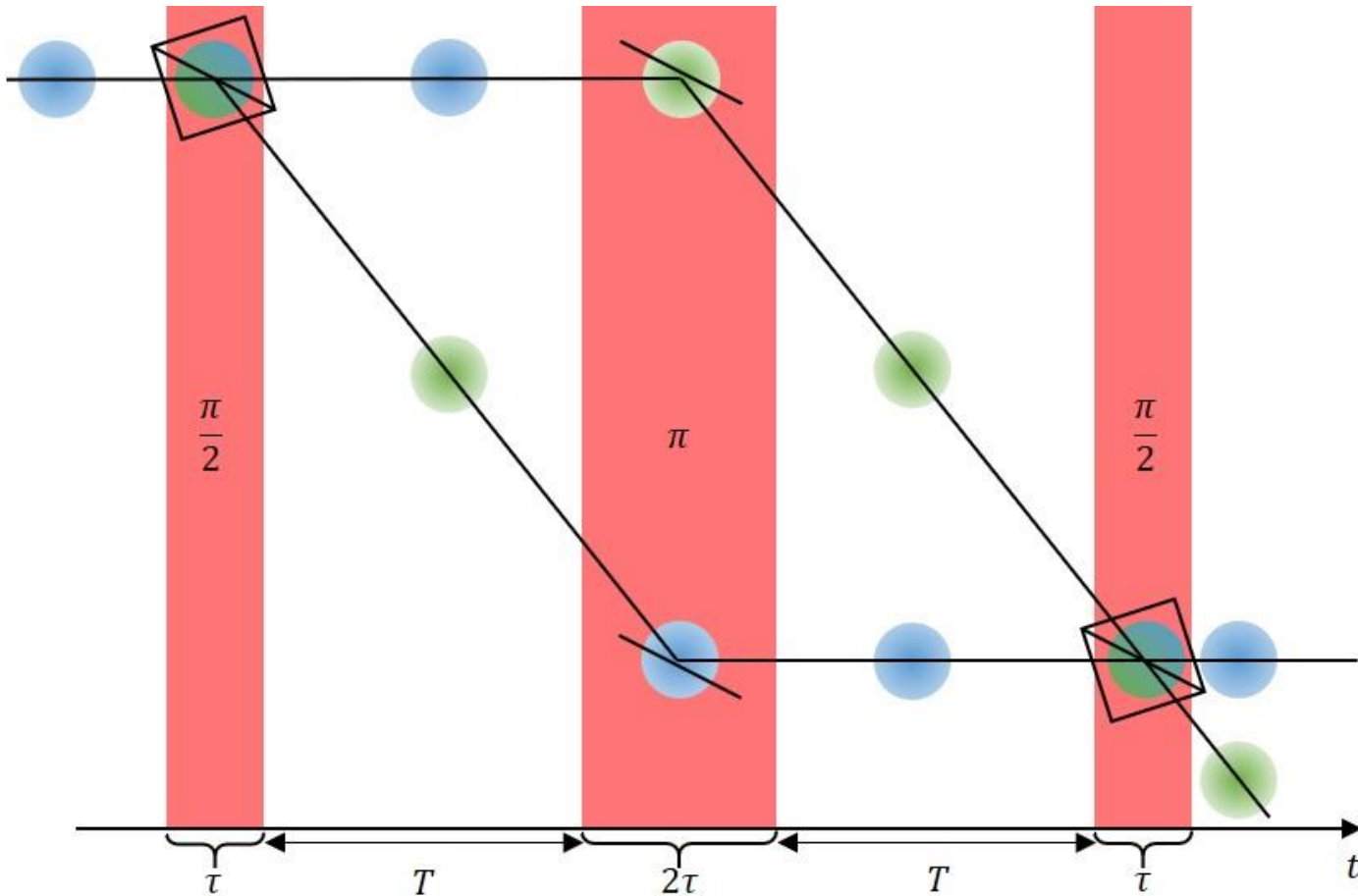
Deux durées caractéristiques des impulsions Raman:

- $\tau_{\frac{\pi}{2}}$, superposition cohérente des deux états 50/50
- τ_{π} , inversion des deux états

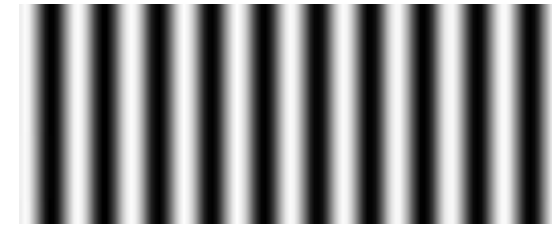
Les deux états $|f\rangle$ et $|e\rangle$ sont couplés par la transition à deux photons

Interférométrie Atomique

Interferometre de Mach-Zehnder: 3 impulsions Raman $\pi - \frac{\pi}{2} - \pi$



Interférence à deux ondes



Observable: $P = \frac{N_2}{N_1 + N_2} = \frac{1}{2} (1 - \cos \Phi)$

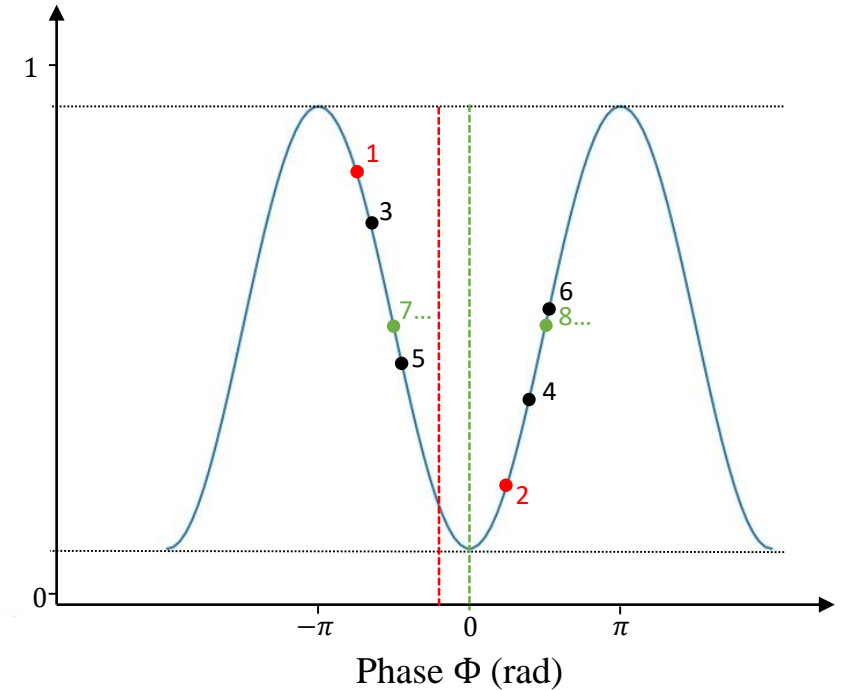
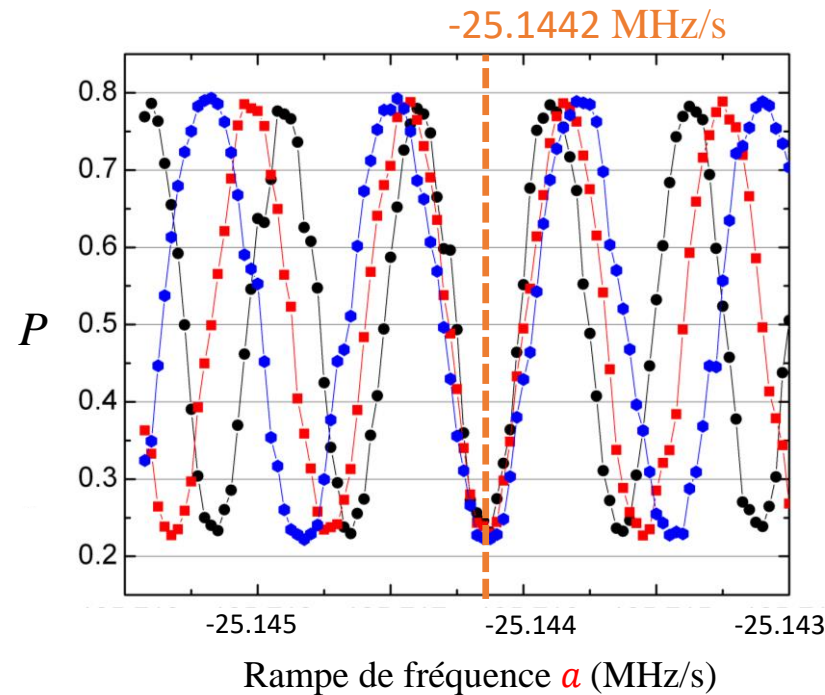
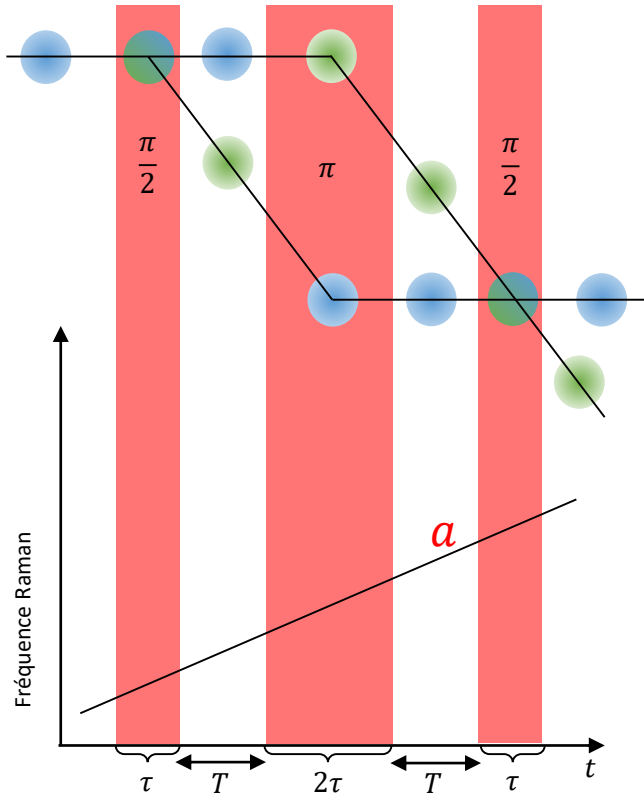
$$\Phi = \phi(0) - 2\phi(T) + \phi(2T)$$

$$= k_{\text{eff}} \cdot g(z) \cdot T^2$$

$k_{\text{eff}} \cdot T^2 = \text{facteur d'échelle de l'instrument}$

Gravimétrie Atomique

Principe de la mesure



Utilisation d'une rampe de fréquence pour contrôler la phase en ajoutant un terme $2\pi a T^2$.

Franges d'interférence pour différentes durées d'interféromètre T .
La frange centrale correspond à g .

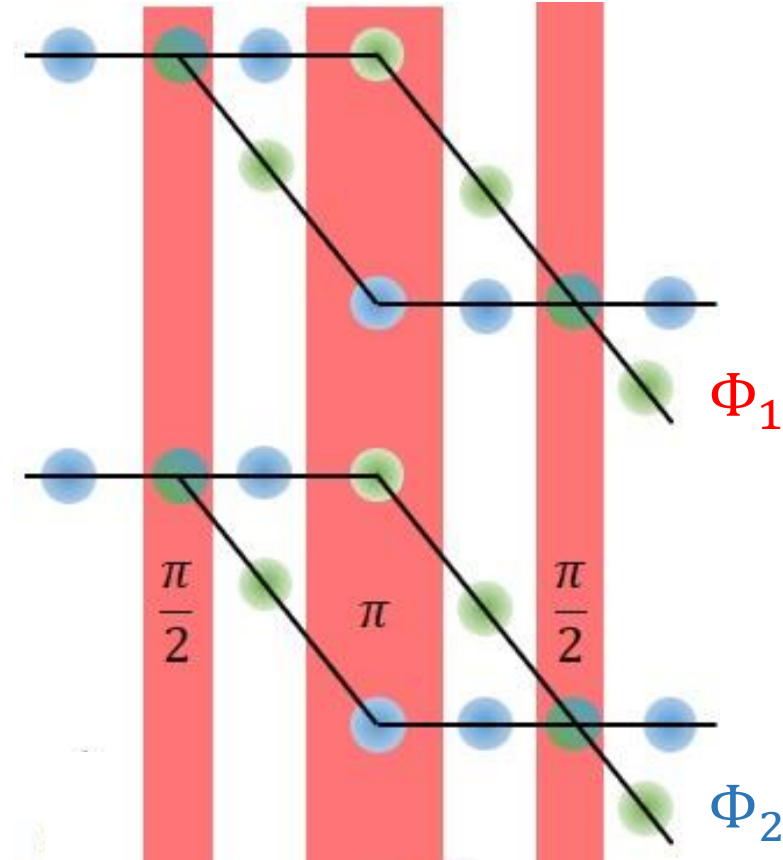
Asservissement de la phase à mi-frange avec un intégrateur numérique.

$$\Phi = k_{\text{eff}} g T^2 + 2\pi a T^2 = 0 \rightarrow g = \frac{2\pi a}{k_{\text{eff}}} \text{ Mesure de } g \text{ en unité de fréquence}$$

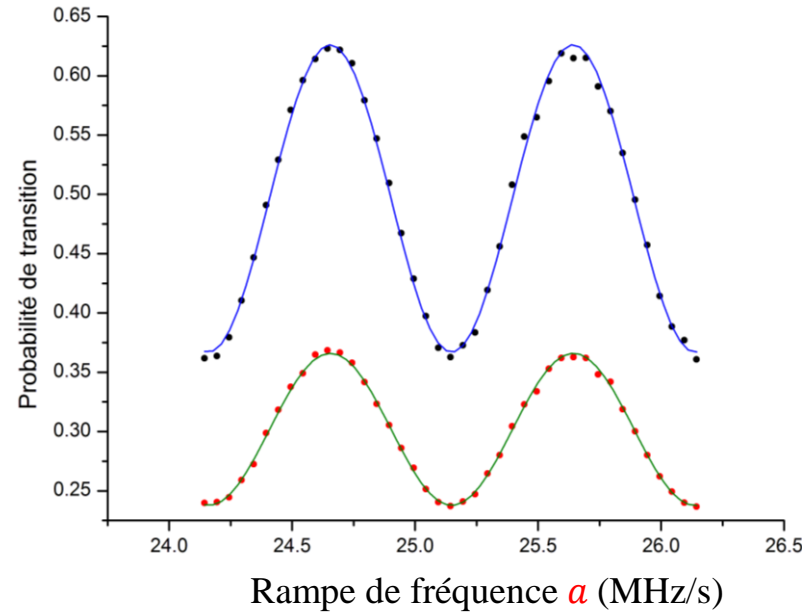
Gradiométrie atomique

Méthode d'extraction de la phase différentielle

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$$



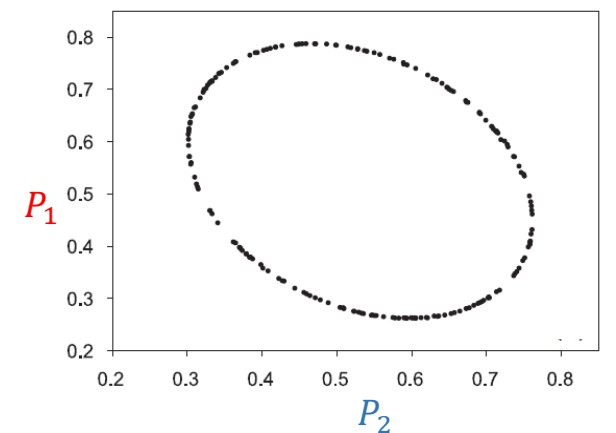
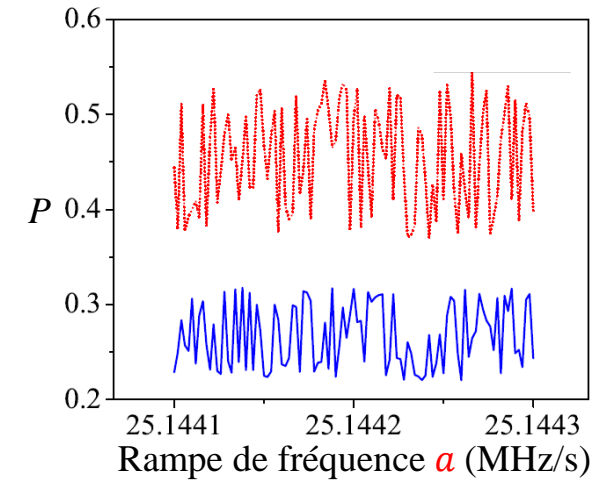
Selon le niveau de bruit de phase, deux méthodes sont accessibles.



Ajustement de franges

$$P_1 = A_1 + \frac{c_1}{2} \cos(\Phi_1)$$

$$P_2 = A_2 + \frac{c_2}{2} \cos(\Phi_2)$$



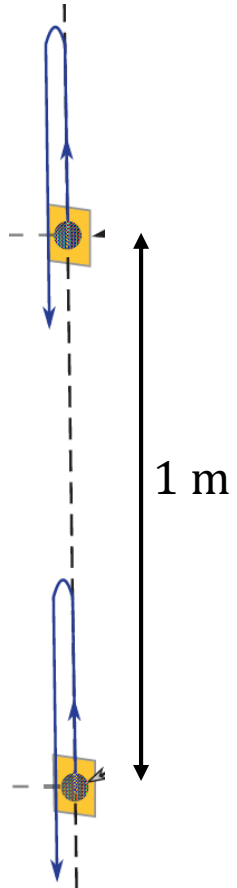
Ajustement d'ellipses

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0$$

$$\Delta\phi = \cos^{-1} - B/2\sqrt{AC}$$

Le Gravi-Gradiomètre

Un démonstrateur pour application embarqué



Concepts:

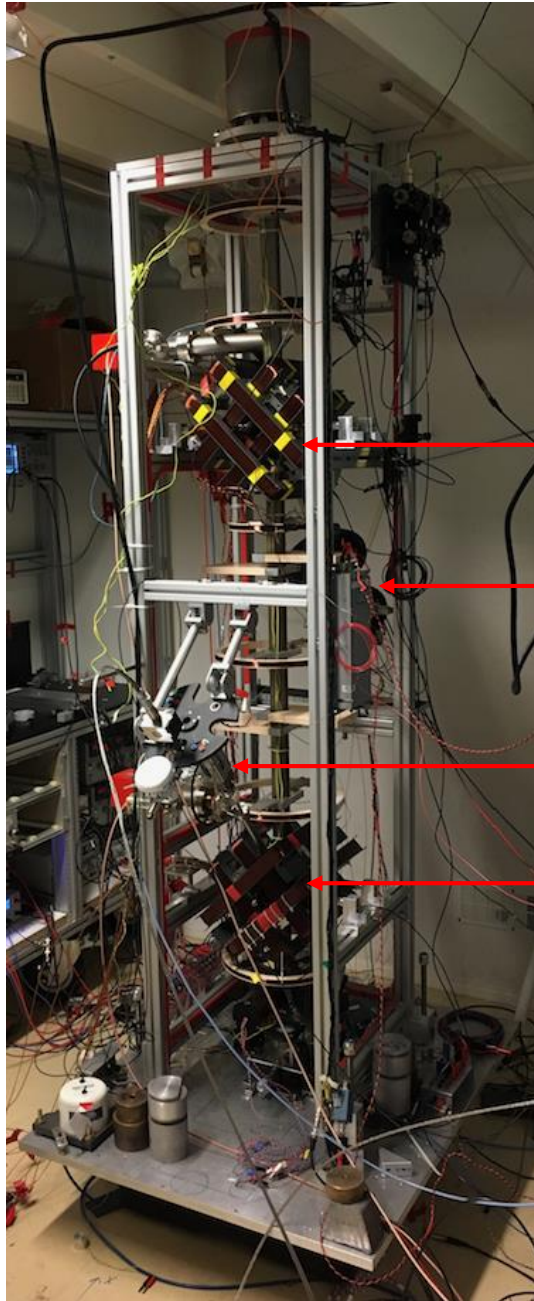
- Deux interféromètres simultanées sur deux nuages atomiques.
- La mesure de phase différentielle permet d'extraire la différence d'accélération:
$$\Delta\Phi = k_{\text{eff}} \cdot \gamma \cdot L \cdot T^2$$
- Suppression des bruits de phase commun aux deux interféromètres, en particulier le bruit de vibration.
- Une méthode de mesure originale permettant de mesurer simultanément de g et γ :

$$\begin{cases} g = \frac{G \cdot M}{d^2} \\ \gamma = \frac{-3 \cdot G \cdot M}{d^3} \end{cases}$$

Performances:

- Atomes ultra-froids sur puce, $\sim 10^5$ atomes à ~ 100 nK.
- Opération en fontaine atomique avec un ascenseur de Bloch, $2T = 500$ ms.
- Séparatrice multi-photonique, $p + n\hbar k$ avec $n = 100$.
- Temps de cycle 2 s.
- Sensibilité:
 - Sur $g \sim 10^{-10} \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$
 - Sur $\gamma \sim 100 \text{ mE}/\sqrt{\text{Hz}}$

Sources atomiques



PMO 3D supérieur

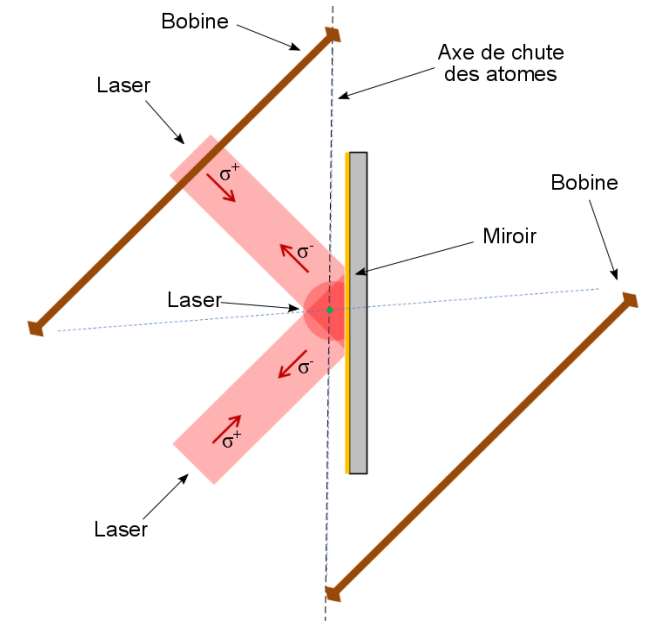
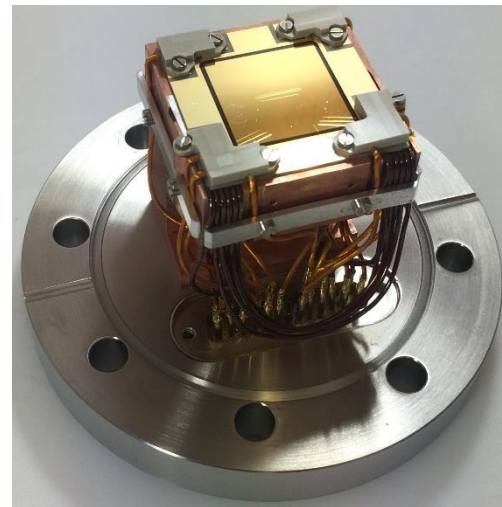
PMO 2D supérieur

PMO 2D inférieur

PMO 3D inférieur

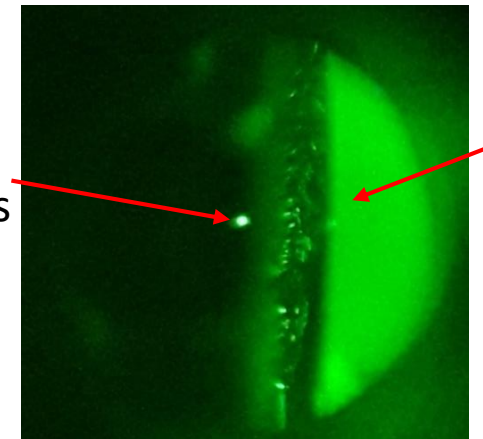
Chaque PMO 3D est chargé à partir d'un PMO 2D

Puce de test installée dans le PMO 3D supérieur



Nuage d'atomes

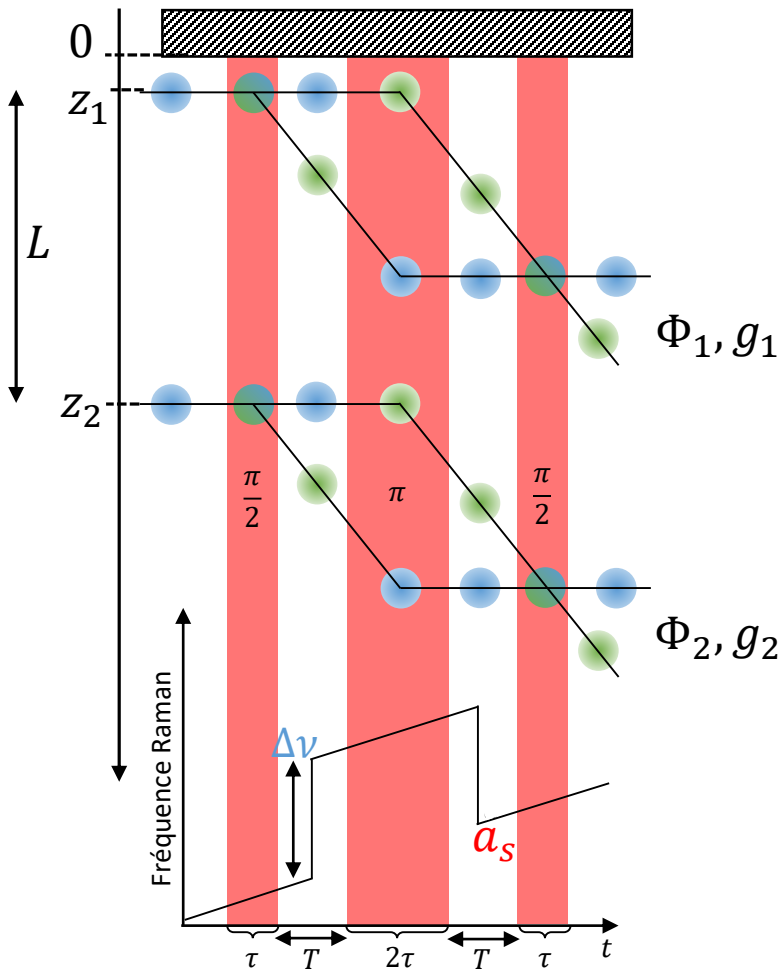
Miroir



Contrôle des phases

Rampe de fréquence:

- Phase commune au deux interféromètres
- 1 bras de levier pour deux phases ...



Saut de fréquence:

$$\phi(t) = kz = \frac{4\pi z}{c} v_{\text{eff}}$$

Nous ajoutons un saut de fréquence $\Delta\nu$ sur l'impulsion Raman π .

$$\Phi = \phi(0) - 2\phi(T) + \phi(2T) + \frac{8\pi z}{c} \Delta\nu$$

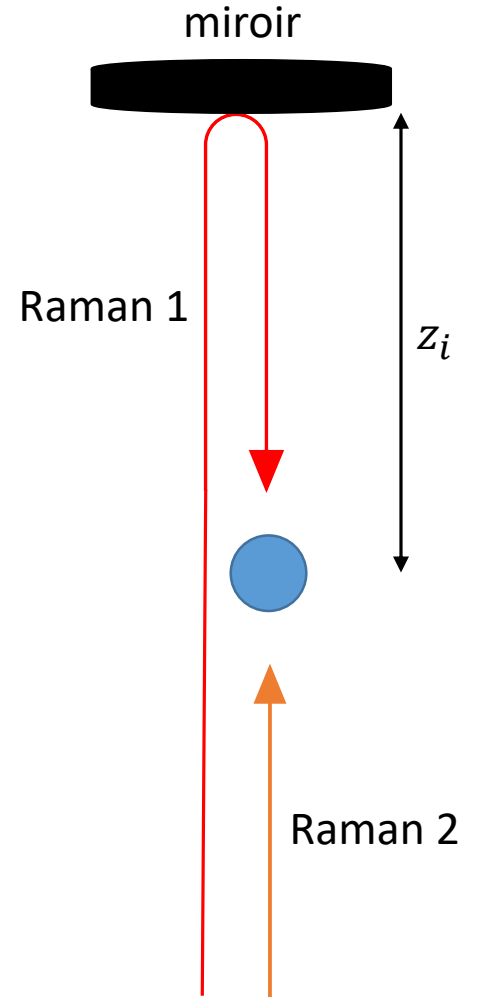
$$\Phi_i = k g_i T^2 + \frac{8\pi z_i}{c} \Delta\nu = k g_i T^2 + K_i \Delta\nu$$

Technique initialement développée pour mesurer la ligne de base L . [1]

Mais qui permet aussi de mesurer la phase différentielle. [2]

[1] G. W. Biedermann *et al.* Phys. Rev. A. (2015)

[2] A. Roura, Phys. Rev. Lett. (2017)



Mesure combinée

Rampe de fréquence + Saut de fréquence: $\Phi_i = k g_i T^2 + 2\pi a T^2 + K_i \Delta\nu$
 $\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$

Maintenant a est appliqué au deux interféromètres, en conséquence la véritable rampe est une valeur synthétique a_s obtenue par combinaison linéaire de g_1 et g_2 .

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Delta\Phi = 0 \leftrightarrow 2\pi a_s = -k \left[\frac{K_2 g_1 - K_1 g_2}{K_2 - K_1} \right] = -k g_s$$

En supposant que l'accélération locale de la gravité varie linéairement en fonction de son gradient, on pose:

$$g_i = g_0 + \gamma z_i$$

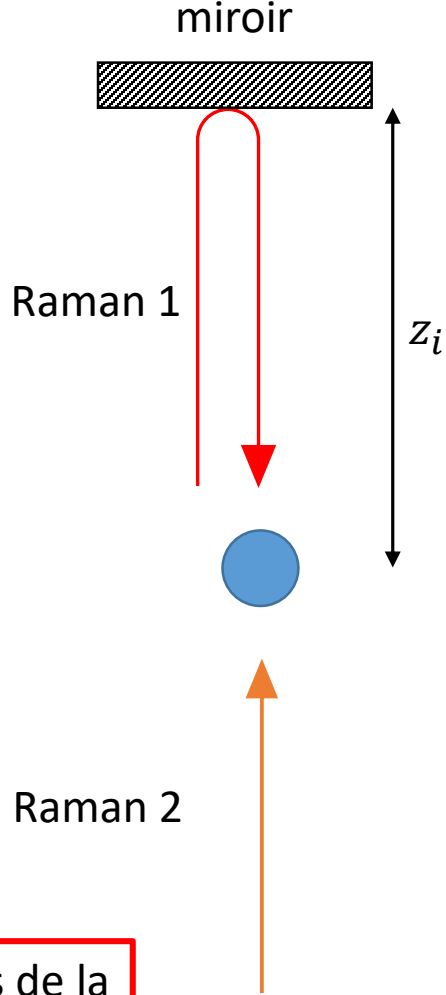
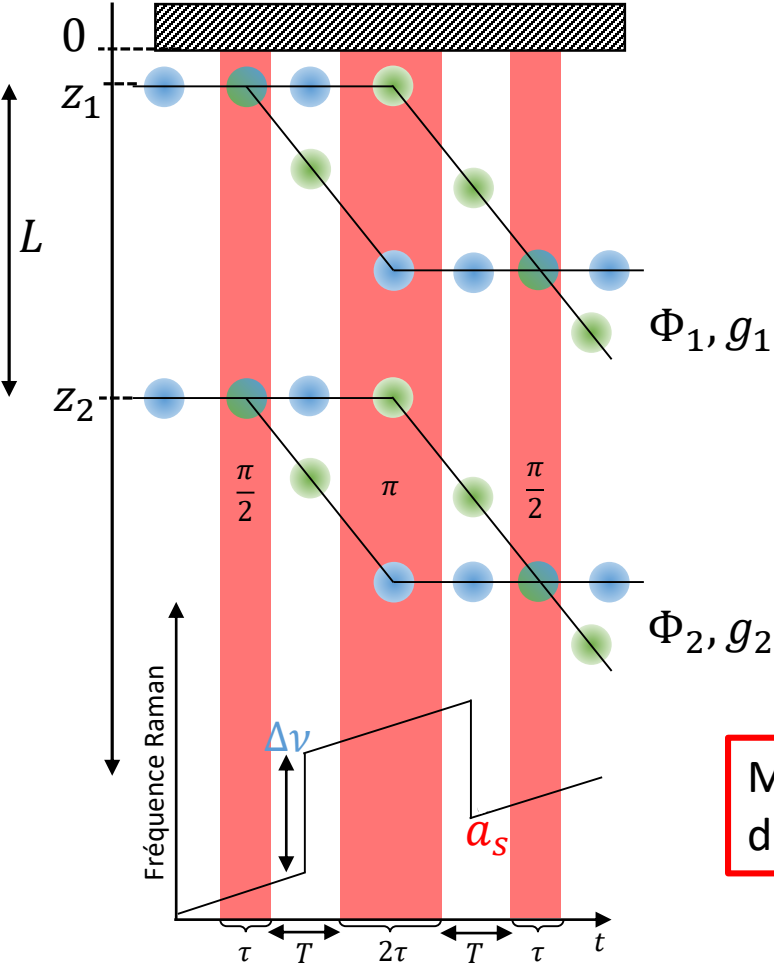
On obtient finalement les relations suivantes:

Mesure au niveau du miroir!

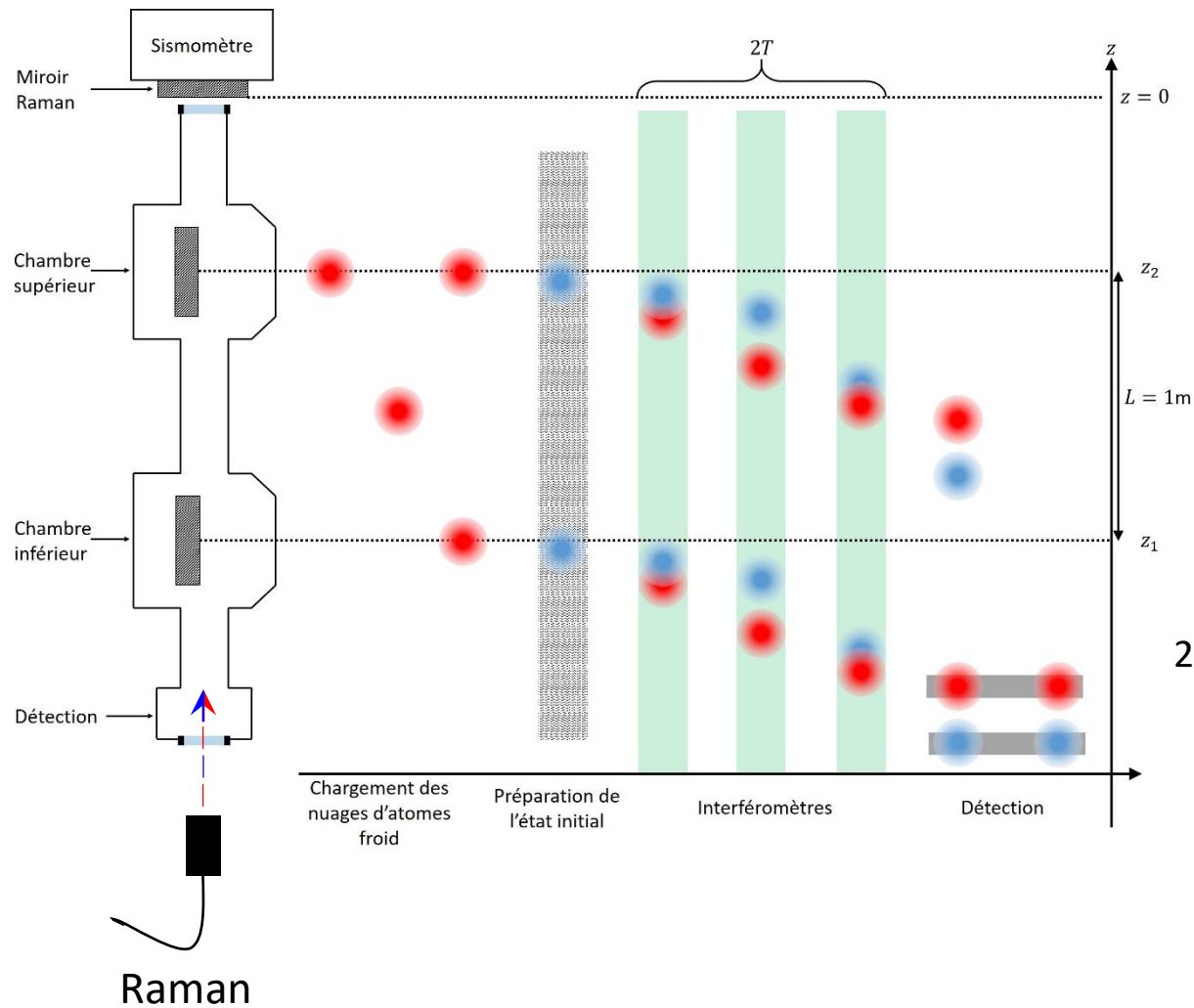
$$\Delta\nu = -\gamma \frac{kT^2 c}{8\pi}$$

$$a_s = -k g_0$$

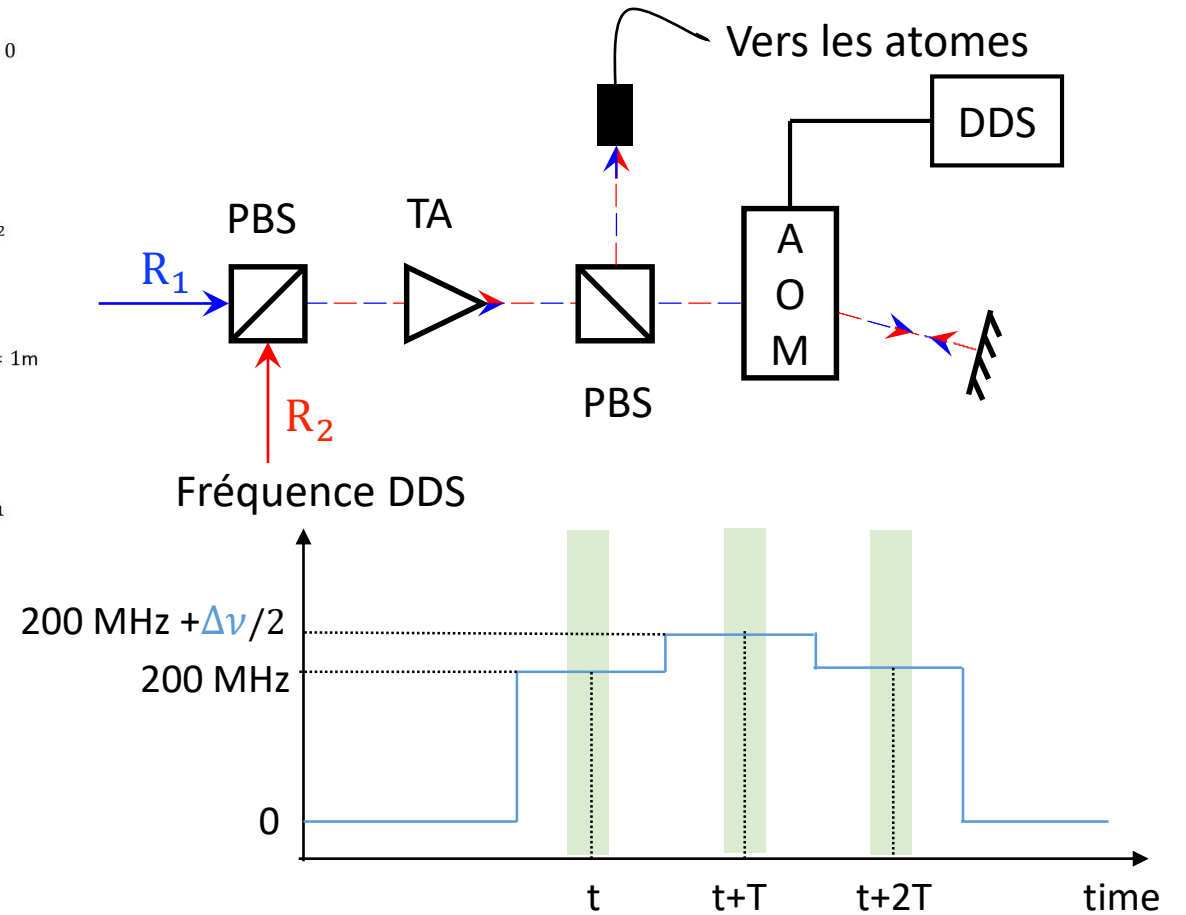
Ne dépend pas de la ligne de base L !



Séquence expérimental

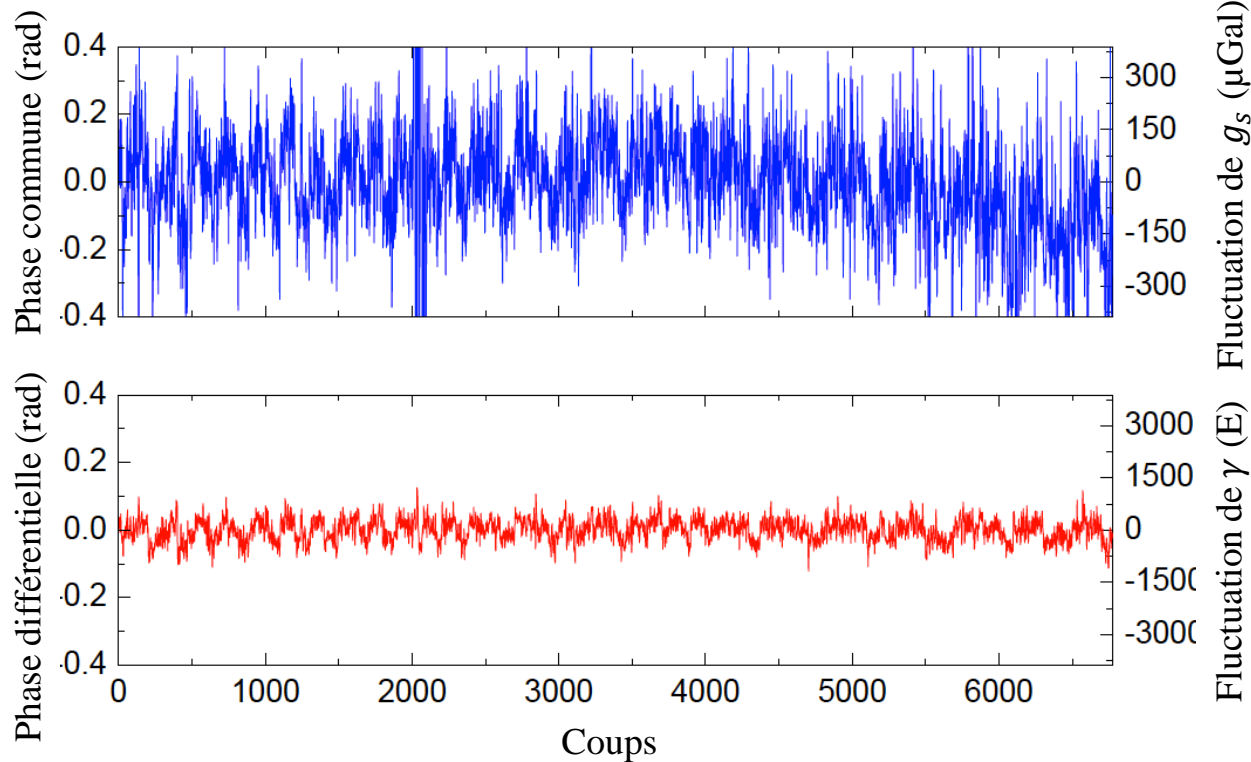


Réalisation du saut de fréquence



Résultats de la mesure

Nous utilisons nos deux bras de levier pour réaliser une double boucle d'asservissement.



Les valeurs données sont des moyennes sur plusieurs séries de mesures et les erreurs statistiques sont obtenues à partir des écarts-types d'Allan.

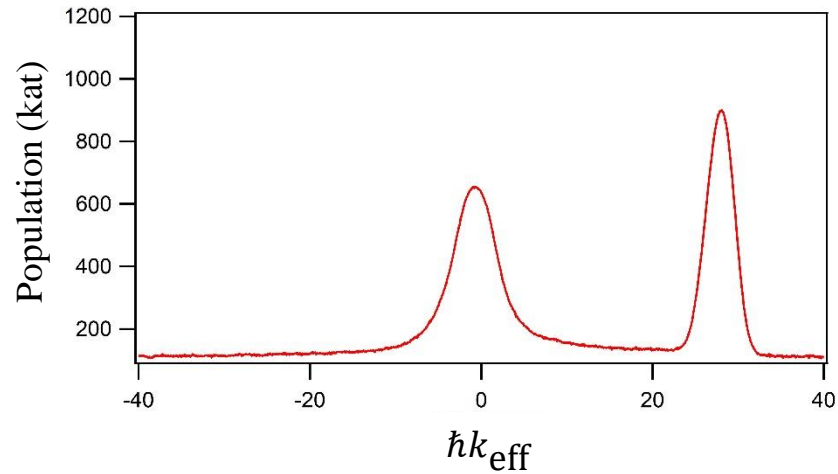
Pour simplifier les analyses, nous prenons $g_1 = 0$ comme valeur de référence.

Gravi-Gradiomètre	
g_s (μGal)	γ ($\mu\text{Gal}/\text{m}$)
-524(4)	-273(10)

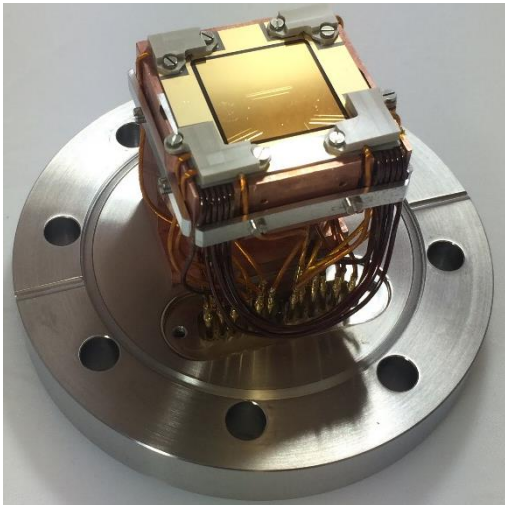
$$\sigma_{g_s} = \begin{cases} 190 \text{ mrad}/\sqrt{\text{Hz}} \\ 180 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}} \end{cases}$$
$$\sigma_{\gamma} = \begin{cases} 91 \text{ mrad}/\sqrt{\text{Hz}} \\ 890 \text{ E}/\sqrt{\text{Hz}} \end{cases}$$

R. Caldani, K. Weng, S Merlet, F. Pereira Dos Santos, Phys. Rev. A. (2019)

Perspectives



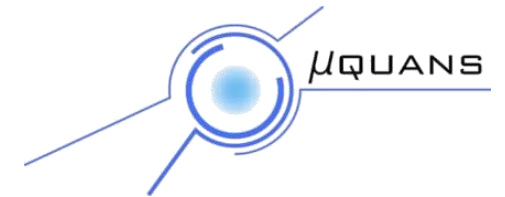
Utilisation de séparatrices multi-photoniques



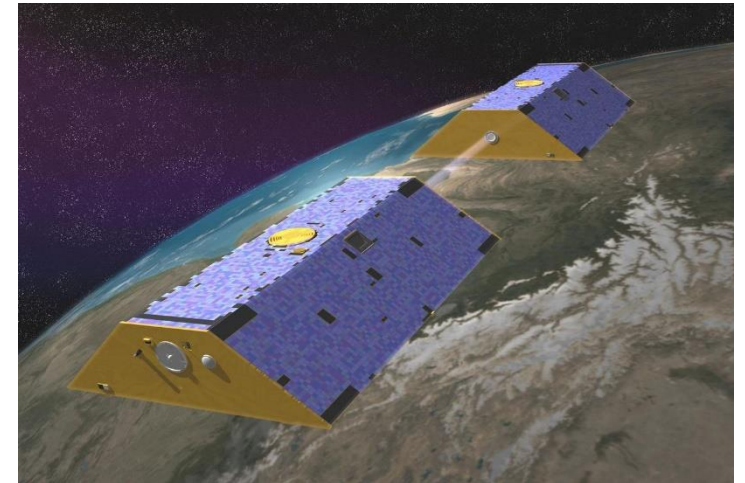
Refroidissement évaporatif
sur sur puce

Collaboration avec μ Quans

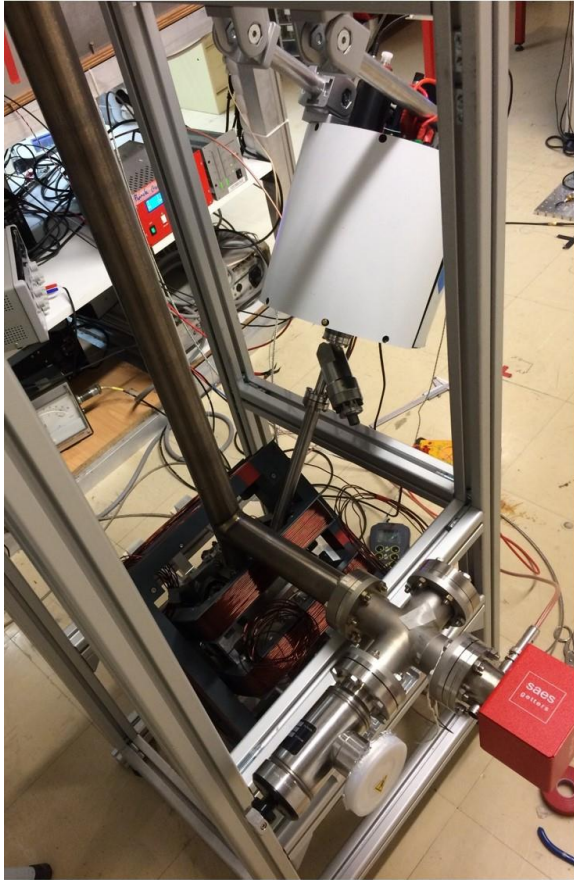
- Transfert vers l'industrie
- Développement de nouveaux outils



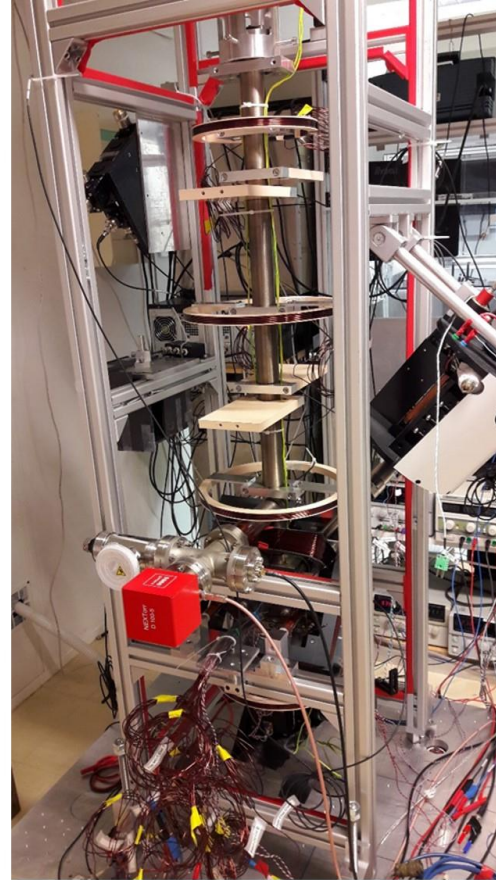
Etude de missions
spatiale



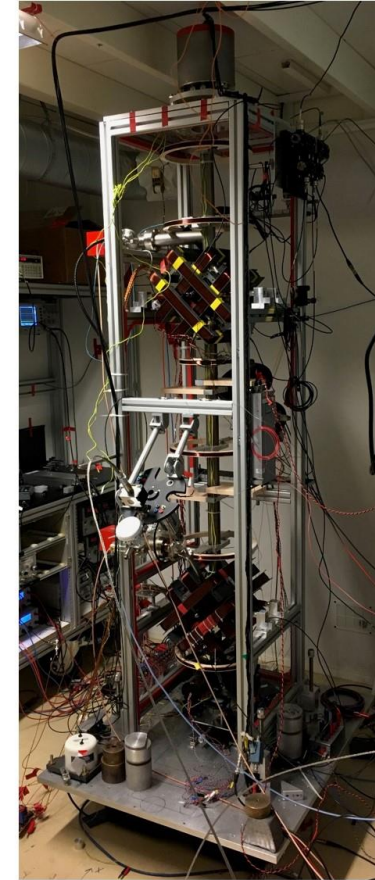
Merci pour votre attention



2016



2017



2018

