

Interférences atomiques de contraste élevé avec le lithium aux énergies thermiques

LCAR/IRSAMC/FPCF
Université Paul Sabatier et CNRS UMR 5589
Toulouse

Marion Jacquey
Alain Miffre

Matthias Büchner
Gérard Tréneç
Jacques Vigué

*Caroline Champenois (96-99), Leszek Jozefowski (visitor, 98-99),
Rémi Delhuille (99-02), Carlo Rizzo et Cécile Robilliard*

DE LA LUMIERE AUX ATOMES

photon $|\mathbf{k}, \varepsilon \rangle \rightarrow$ atome $|\mathbf{k}, \mathbf{i} \rangle$
 ε : vecteur polarization \rightarrow états internes

Deux autres différences importantes:

1) La valeur de la longueur d'onde:

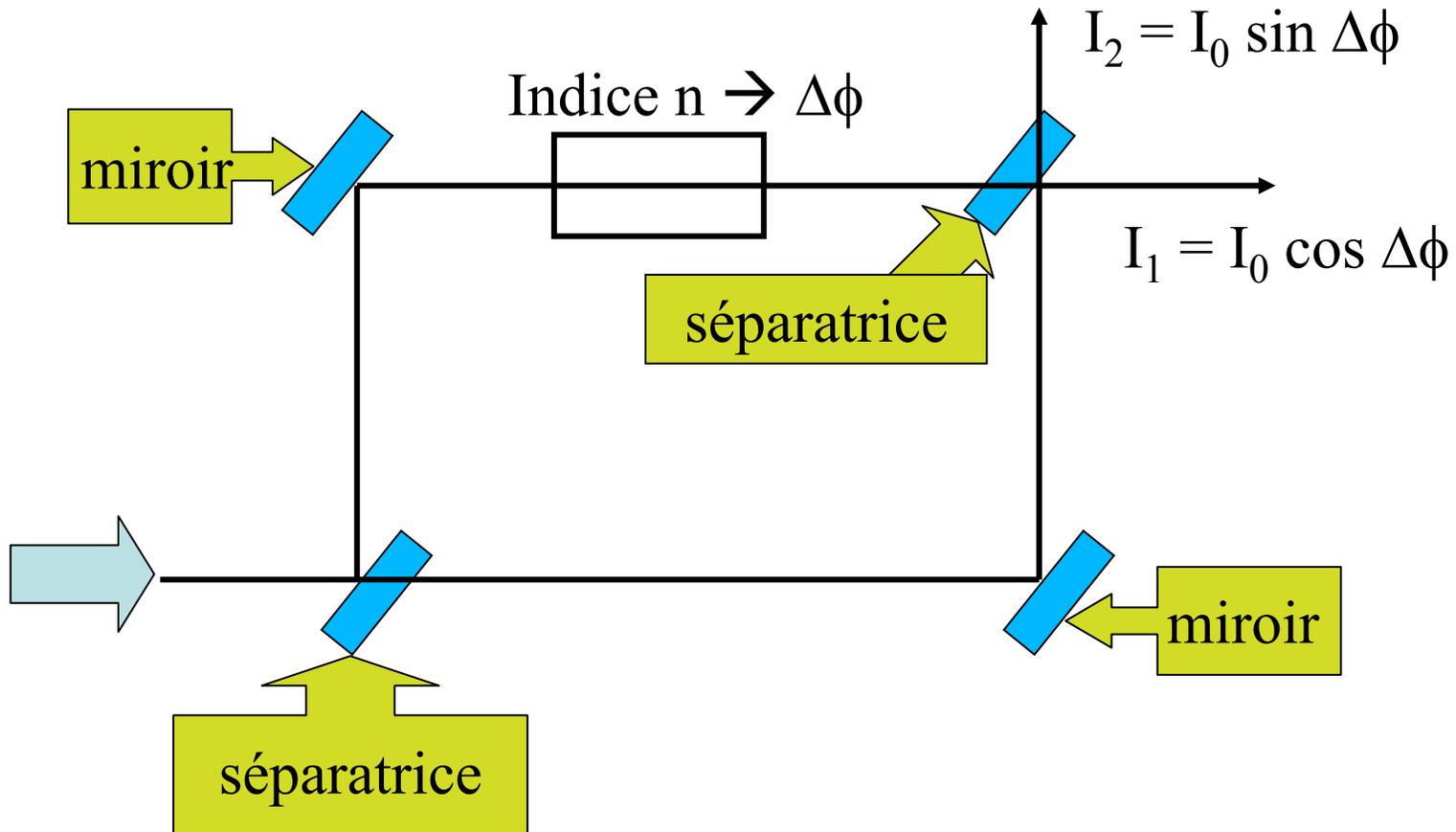
$\lambda = 400 - 800$ nm pour la lumière visible

La longueur d'onde de de Broglie : $\lambda = h / m v$

$\lambda = 0.06$ nm pour l'atome de lithium à $v = 1000$ m/s

2) Les atomes sont “lents” alors que la lumière va très vite
 \rightarrow forte sensibilité aux effets inertiels, possibilité de modifier l'interféromètre pendant le vol des atomes...

Interféromètre de Mach-Zehnder



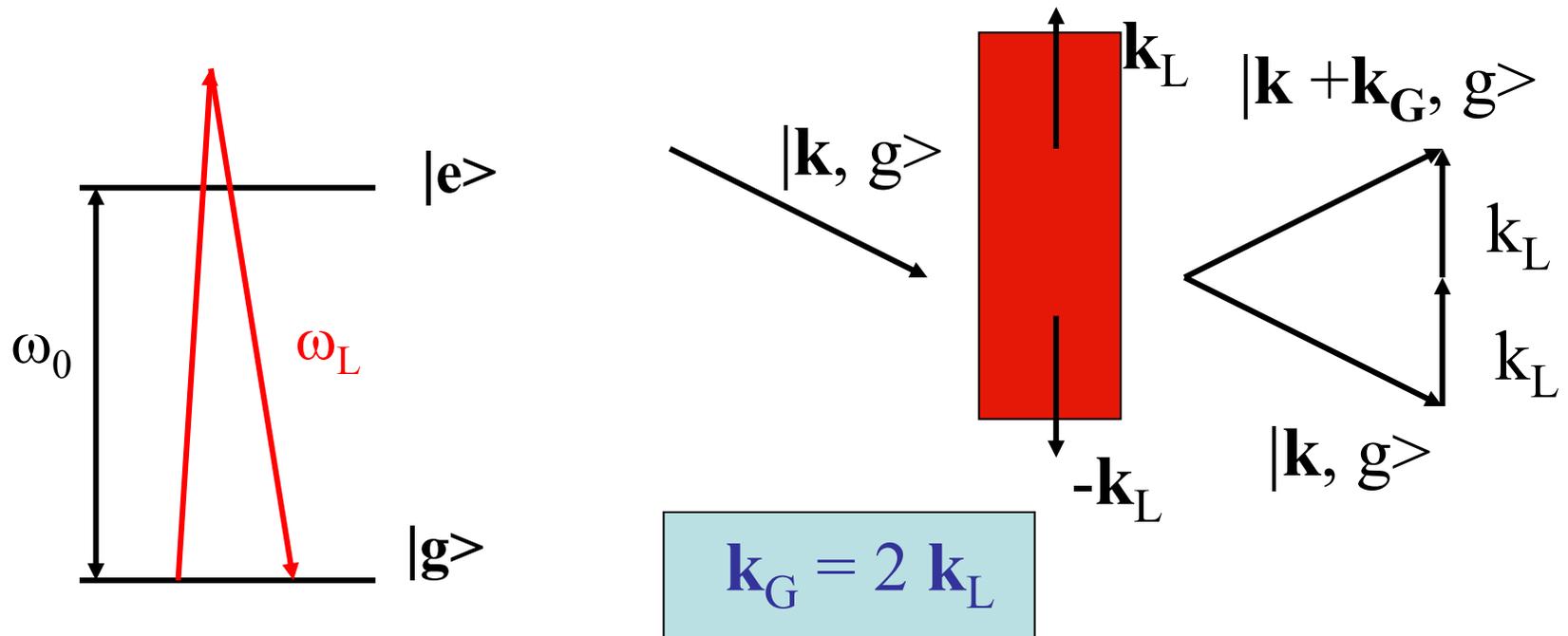
Diffraction par une onde stationnaire laser (selon une idée de Kapitza and Dirac en 1933)

Potentiel V proportionnel à l'intensité lumineuse I :

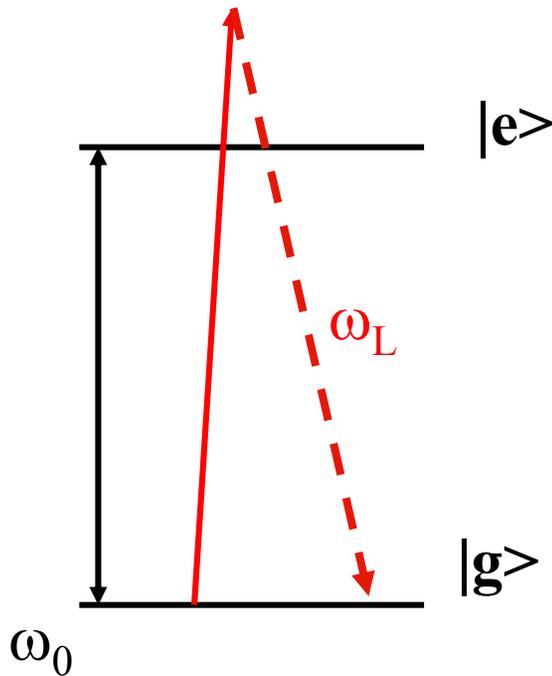
$$V \sim I / (\omega_L - \omega_0) = V_0 \cos^2(k_L x) \rightarrow \text{réseau de phase}$$

conservation de l'énergie

et de l'impulsion



Perte de cohérence atomique



L'absorption d'un photon suivie d'une **émission spontanée** peut induire une perte de cohérence. La probabilité est proportionnelle à $1/(\omega_L - \omega_0)^2$ tandis que le potentiel V varie comme $1/(\omega_L - \omega_0)$.

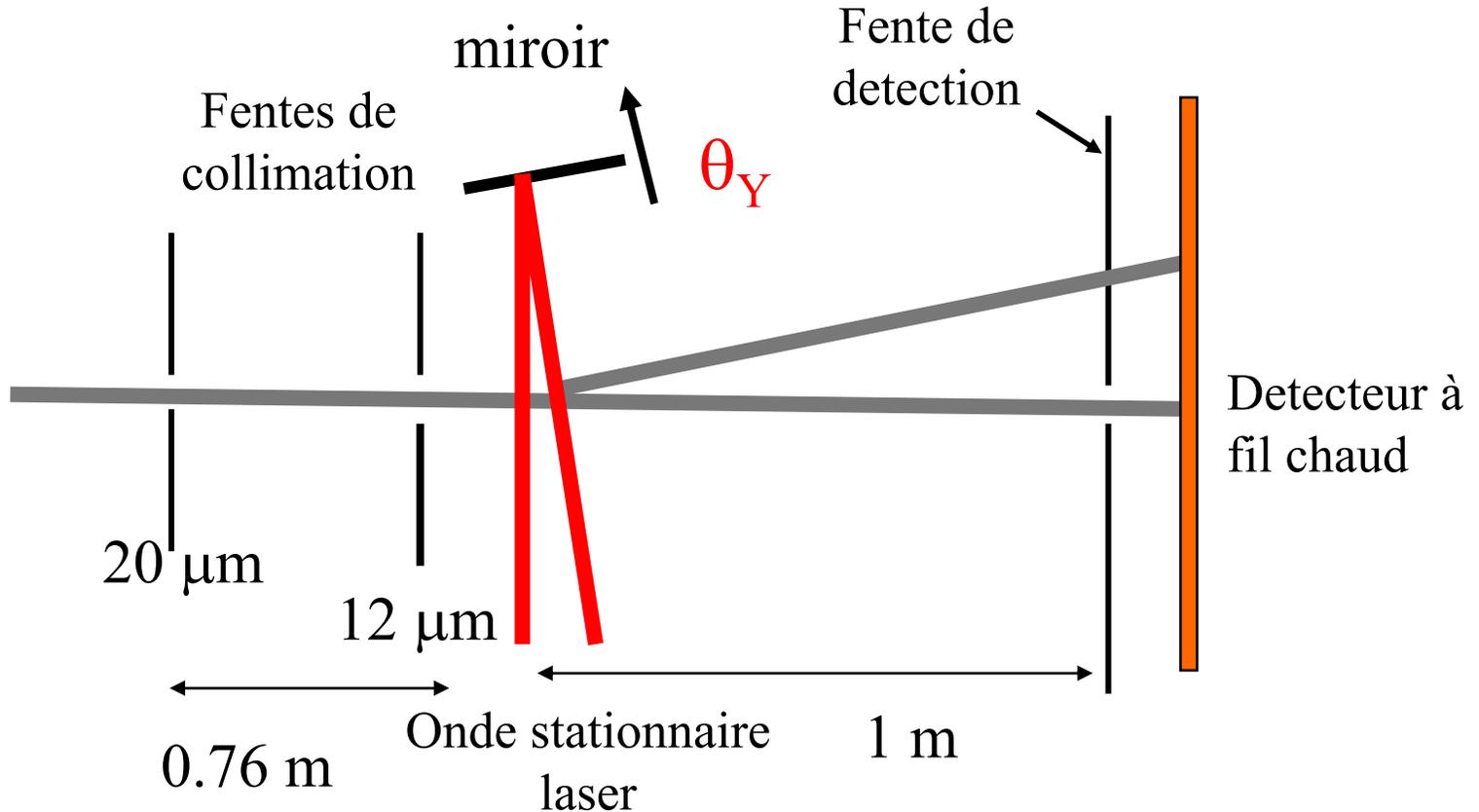
Si on choisit un écart $(\omega_L - \omega_0)$ suffisamment grand, la perte de cohérence peut être très petite.

Diffraction de Bragg avec ${}^7\text{Li}$

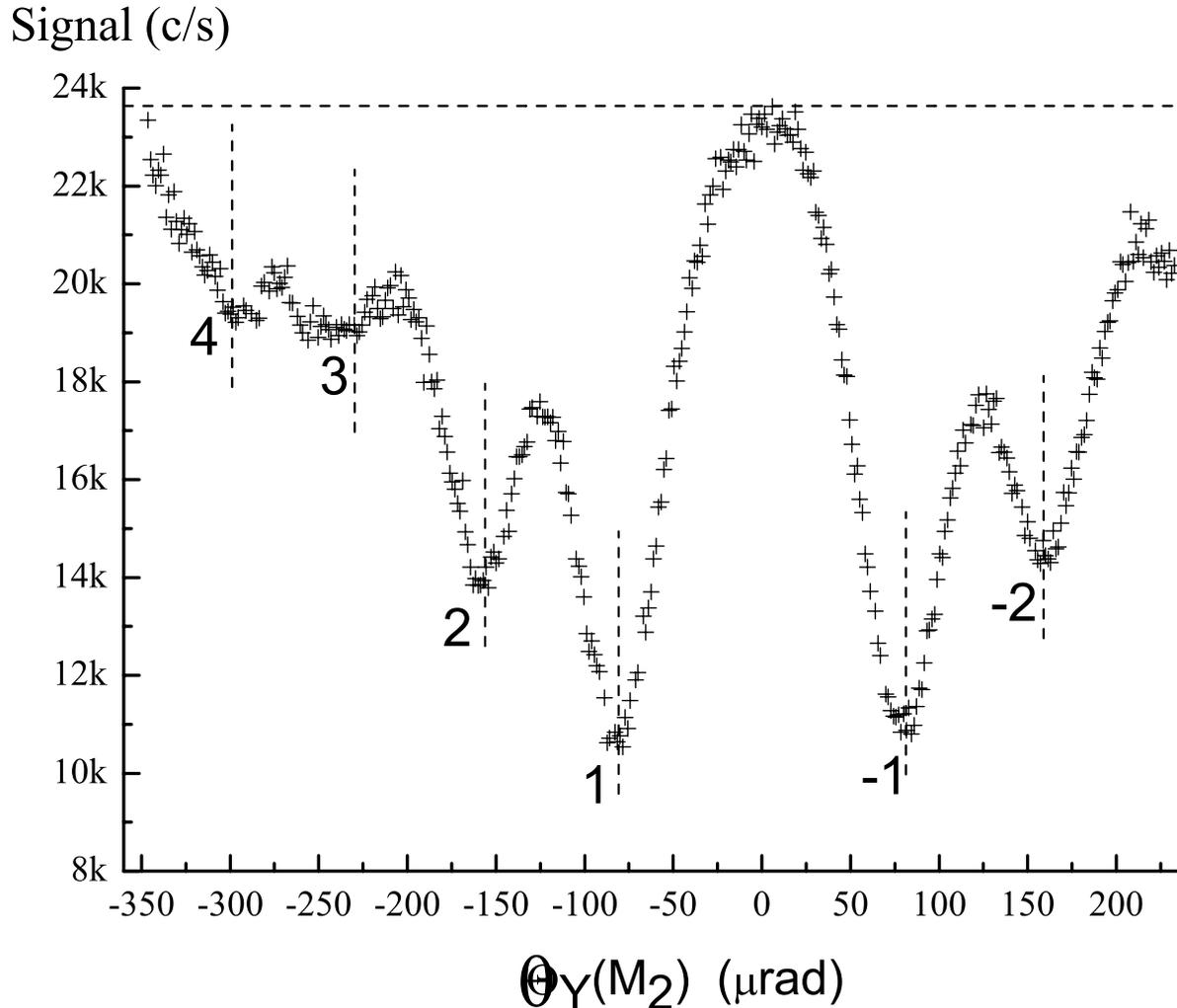
Laser proche de la raie de resonance à 671 nm ($\delta/2\pi = 1.2$ GHz)

Faisceau de diamètre ~ 6 mm et de puissance ~ 240 milliwatts

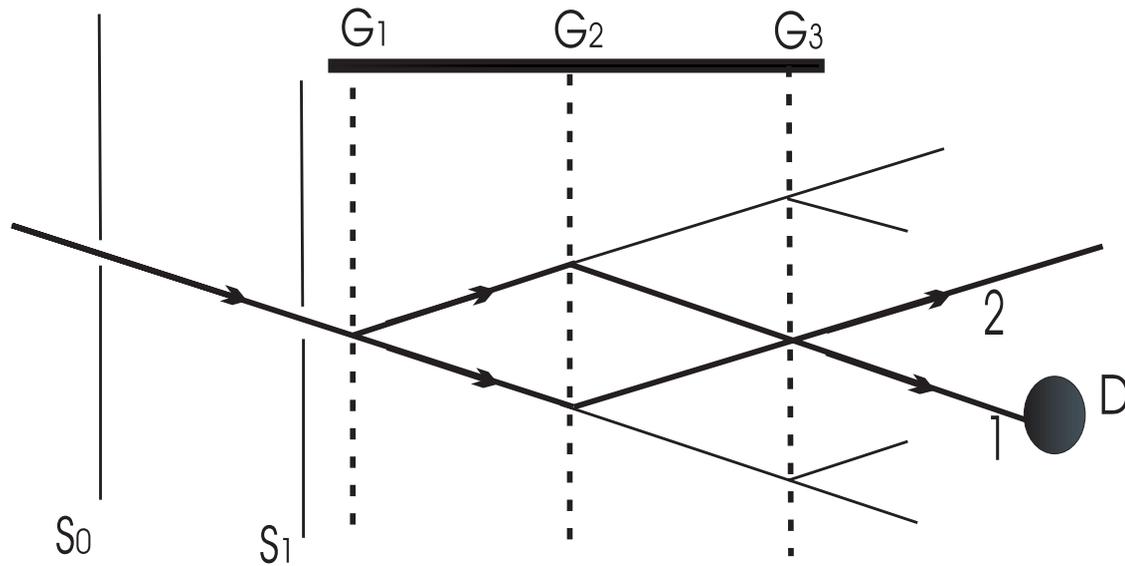
Réseau de période $a = 335$ nm; angle de diffraction $\theta = \lambda_{\text{dB}}/a = 160 \mu\text{rad}$



En fonction de l'orientation du miroir formant l'onde stationnaire laser, on observe les divers ordres de la diffraction de Bragg



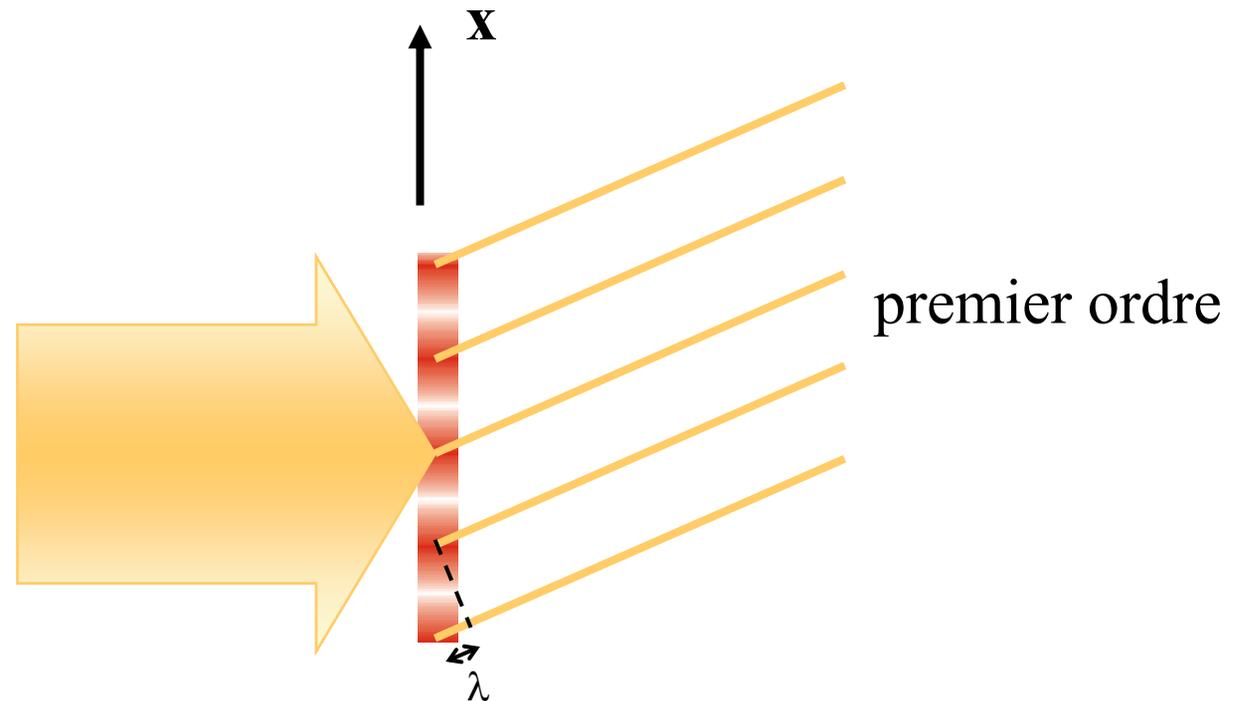
Interféromètres atomiques de Mach-Zehnder



- Points communs:**
- a) préparation de l'onde atomique
 - b) trois "réseaux" de diffraction à la place des séparatrices et des miroirs
 - c) deux faisceaux de sortie transportant des signaux d'interférences complémentaires
 - d) détecteur très sensible

Types variés: énergie de l'atome; interféromètres spatiaux/temporels; processus de diffraction; diffraction en champ proche (effet Talbot) ou lointain

Comment observer des franges d'interférence ?

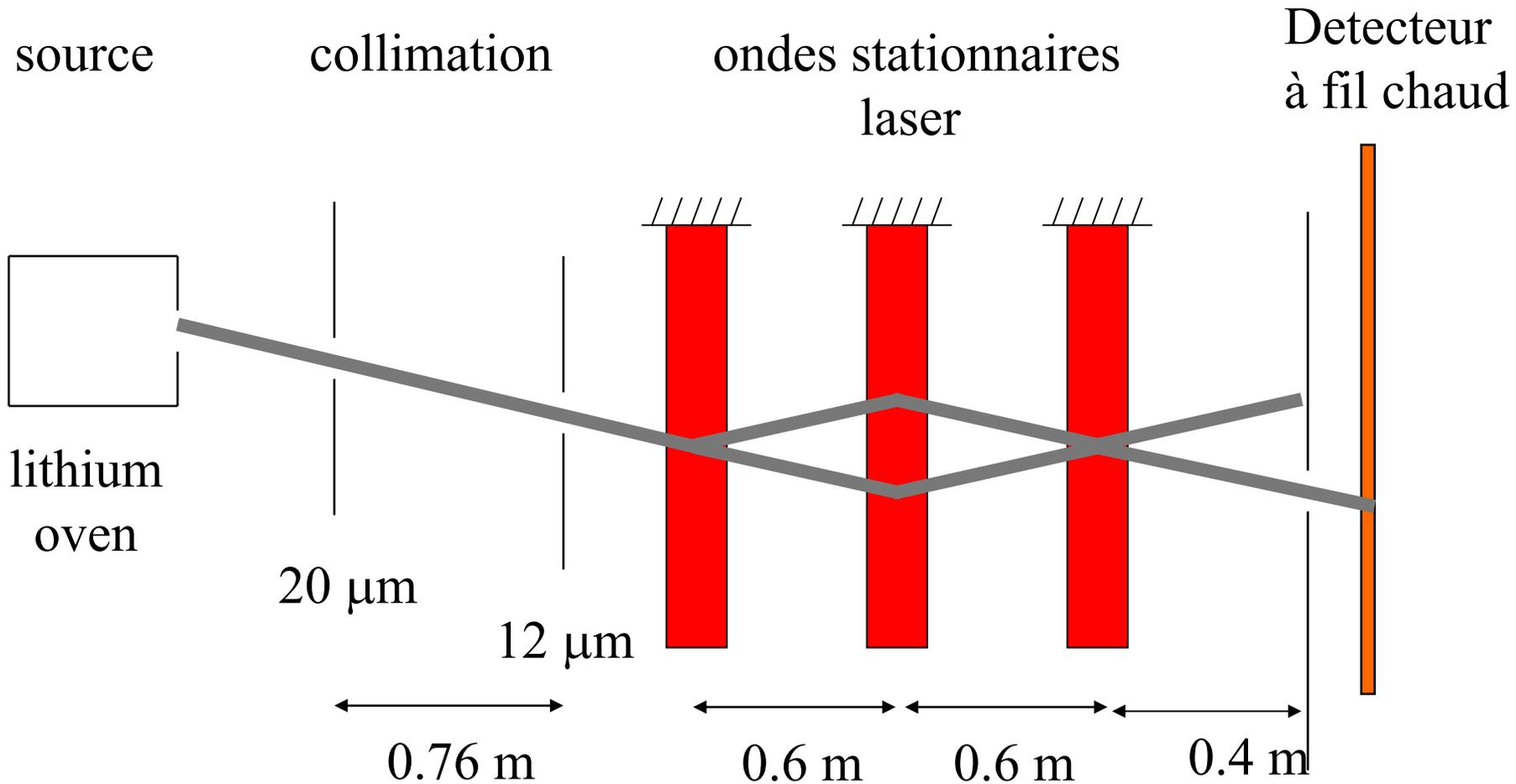


$$\phi = p k_G (x_1 + x_3 - 2x_2)$$

Avantage important: phase non dispersive

Inconvénient: les positions des réseaux doivent être stables

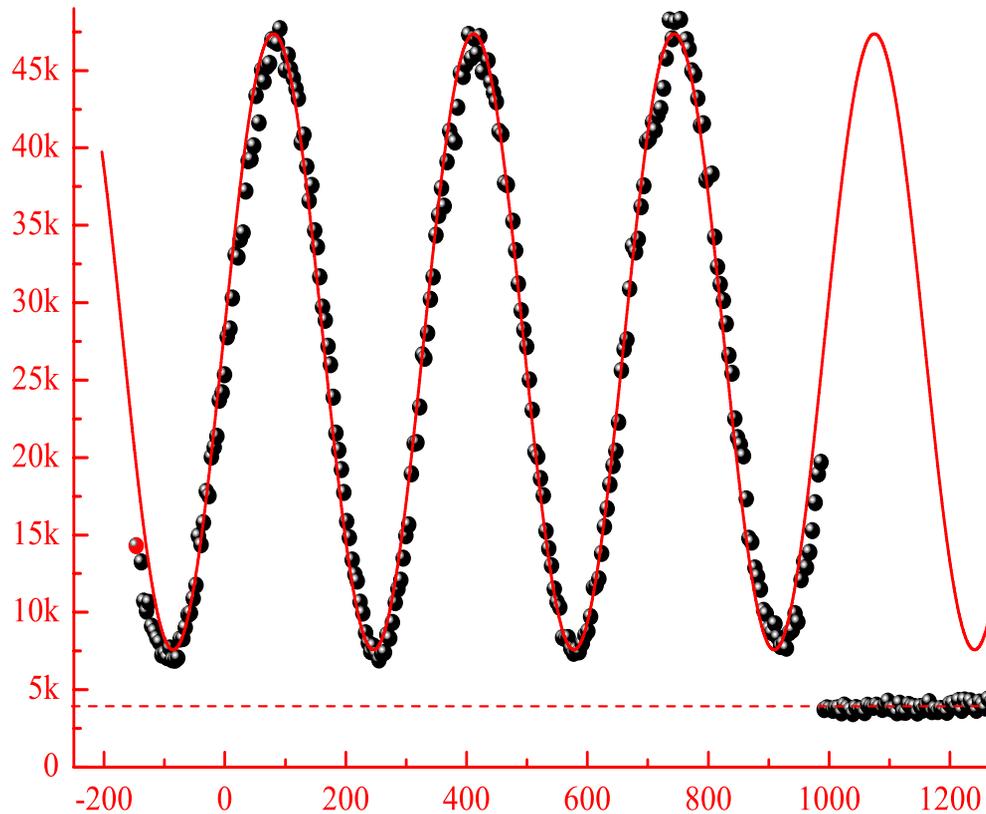
Notre interféromètre de Mach-Zehnder avec le lithium



Signaux observés : diffraction d'ordre 1

Signal (c/s)

Part a



Visibilité
ou contraste :

$$V = 84.5 \pm 1\%$$

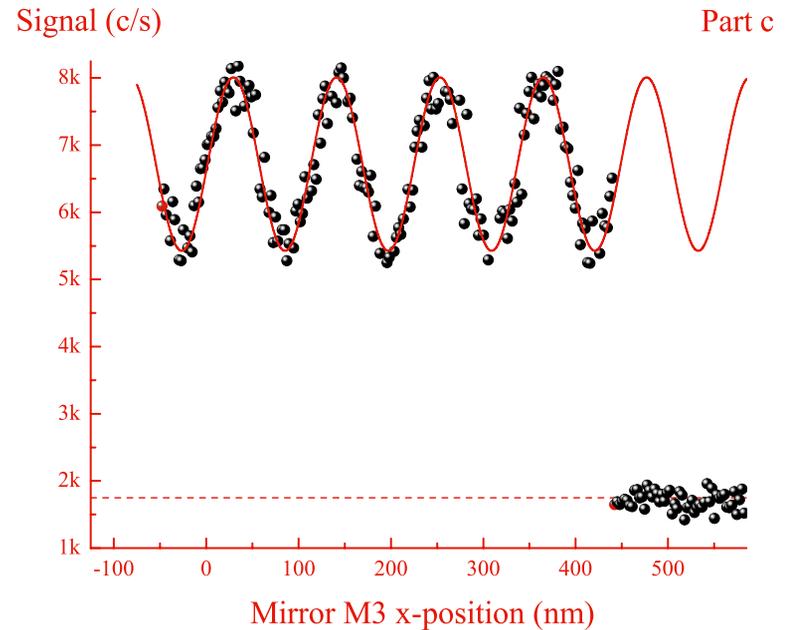
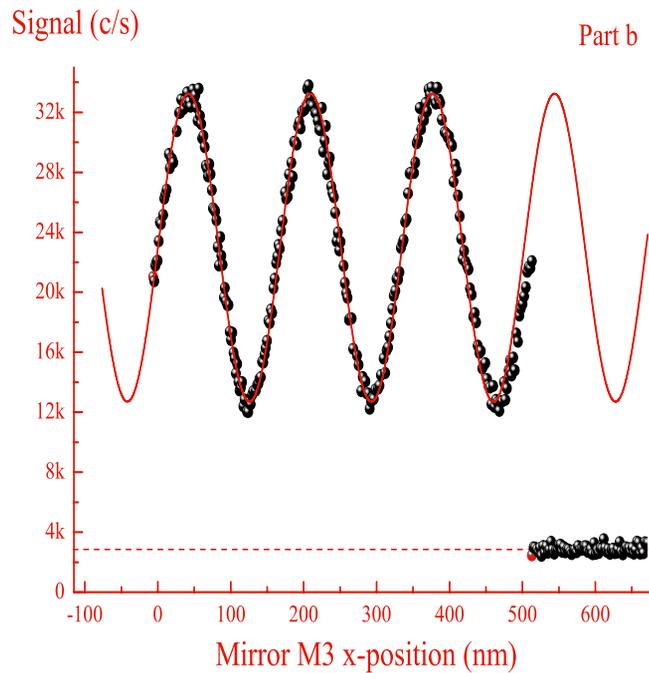
0.1 s par point
de mesure

Mirror M3 x-position (nm)

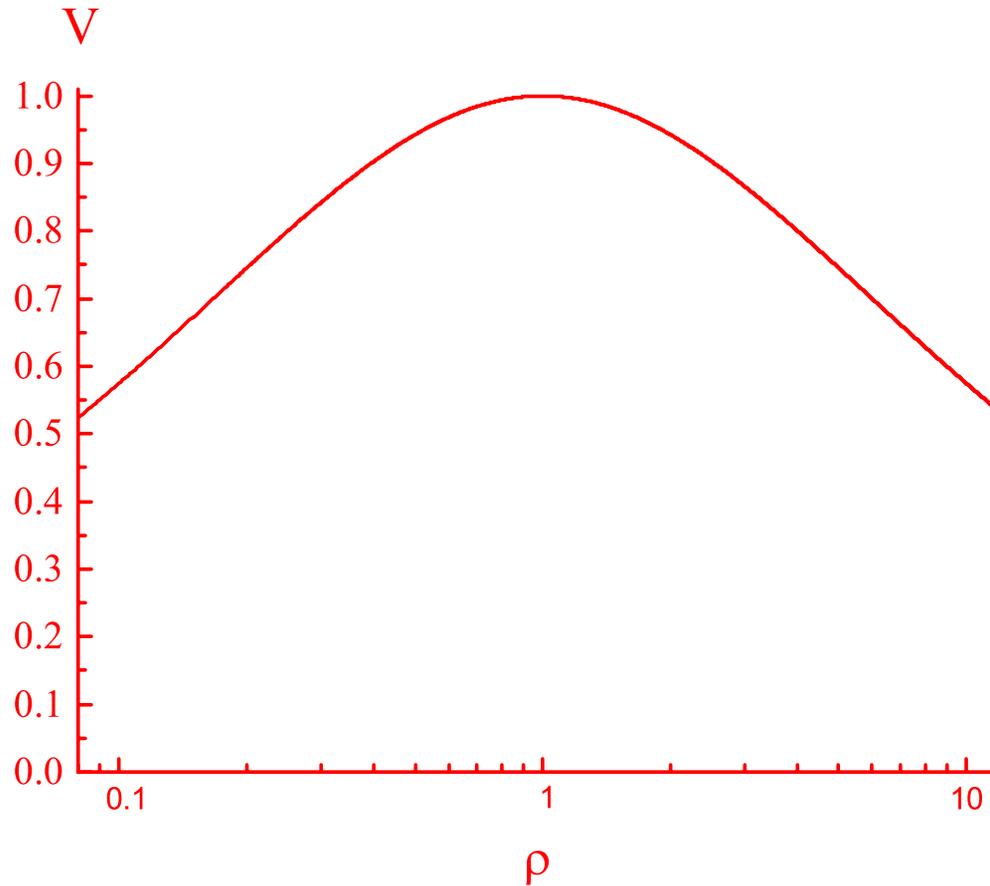
Signaux d'interférence avec les ordres 2 et 3

ordre $p = 2$
 $V = 51 \%$

ordre $p = 3$
 $V = 26 \%$



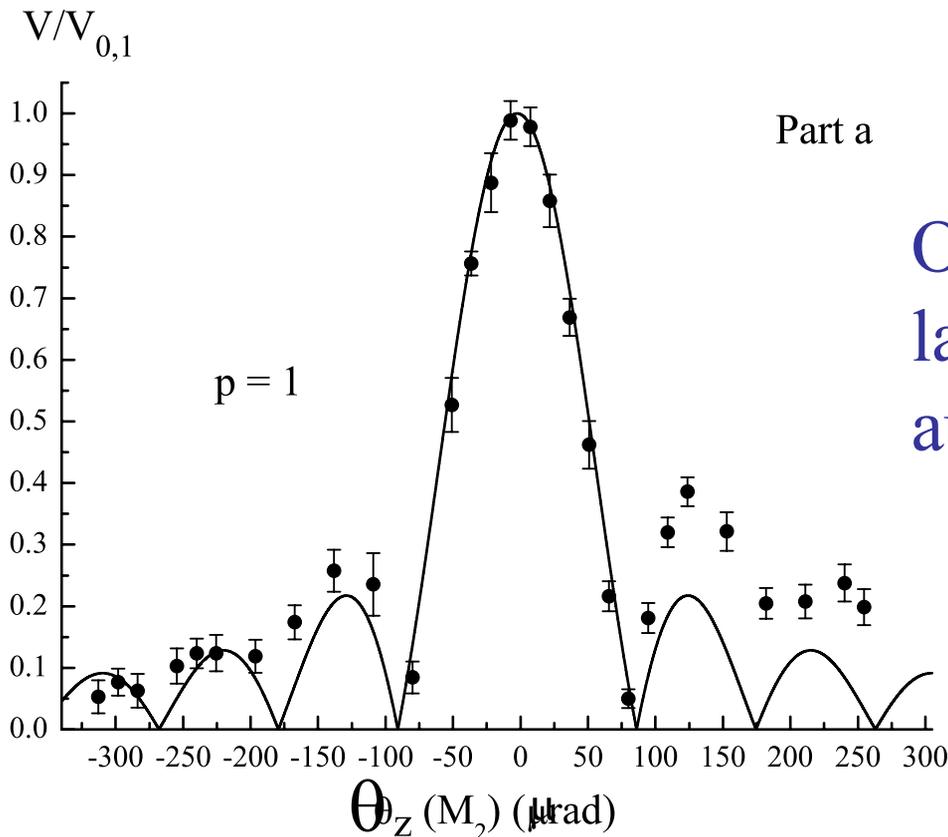
Visibilité des franges en fonction du rapport d'intensité des faisceaux qui interfèrent.



rapport $\rho = I_1/I_2$

Analyse des défauts de l'interféromètre: visibilité des franges en fonction de

$$\Delta \mathbf{k} = \mathbf{k}_{G1} + \mathbf{k}_{G3} - 2 \mathbf{k}_{G2}$$

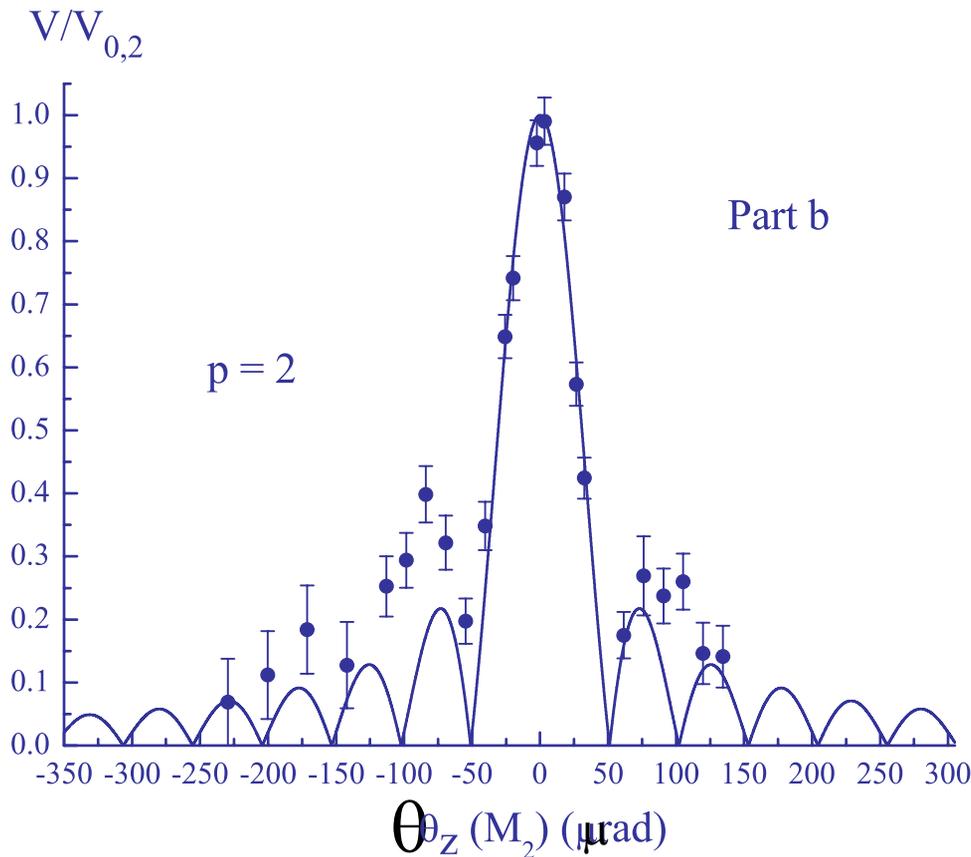


On tourne le miroir de
la 2ème onde stationnaire
autour de l'axe z.

Diffraction d'ordre 1

Analyse des défauts de l'interféromètre: visibilité des franges en fonction de

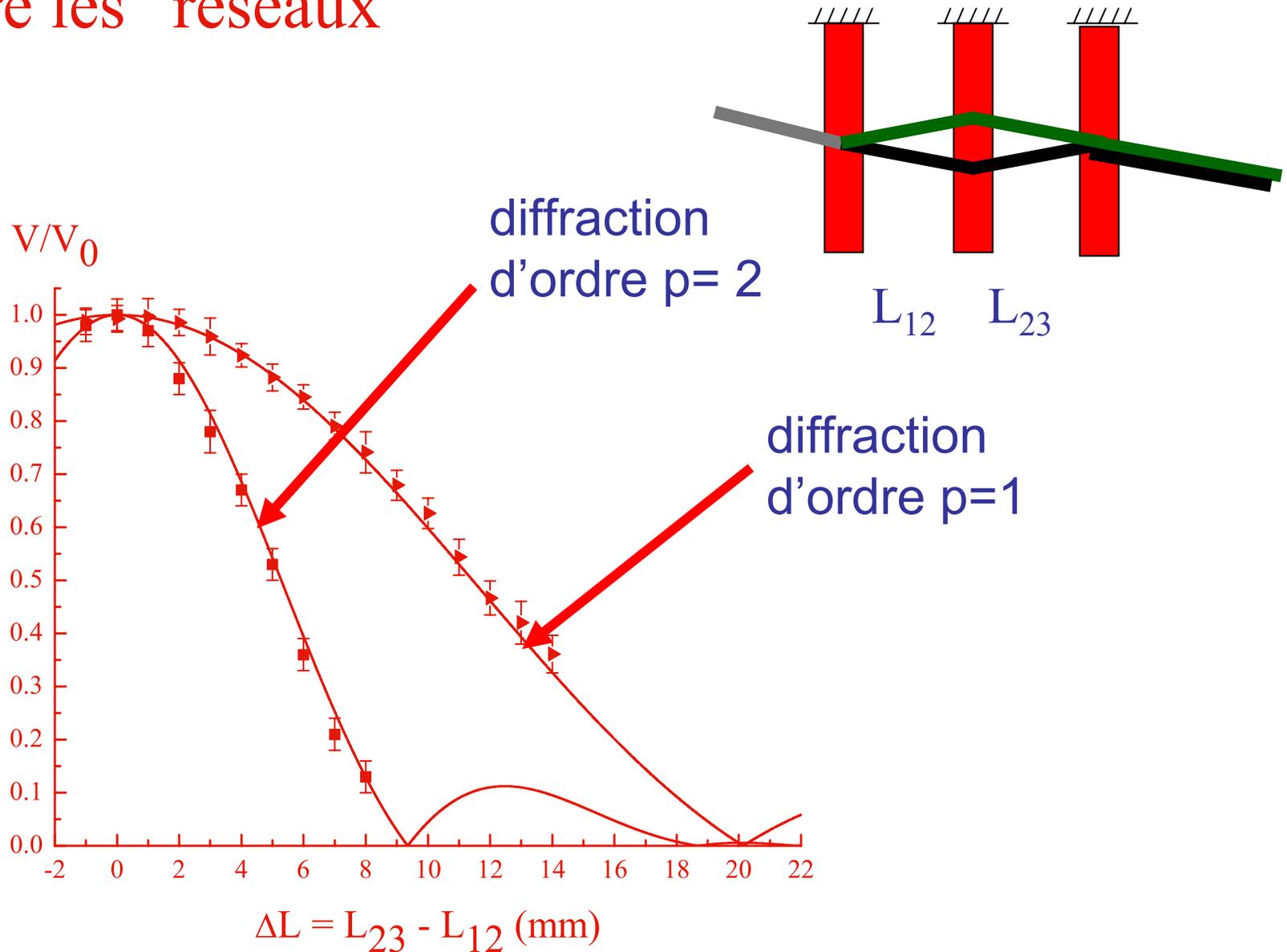
$$\Delta \mathbf{k} = \mathbf{k}_{G1} + \mathbf{k}_{G3} - 2 \mathbf{k}_{G2}$$



On tourne le miroir de
la 2ème onde stationnaire
autour de l'axe z.

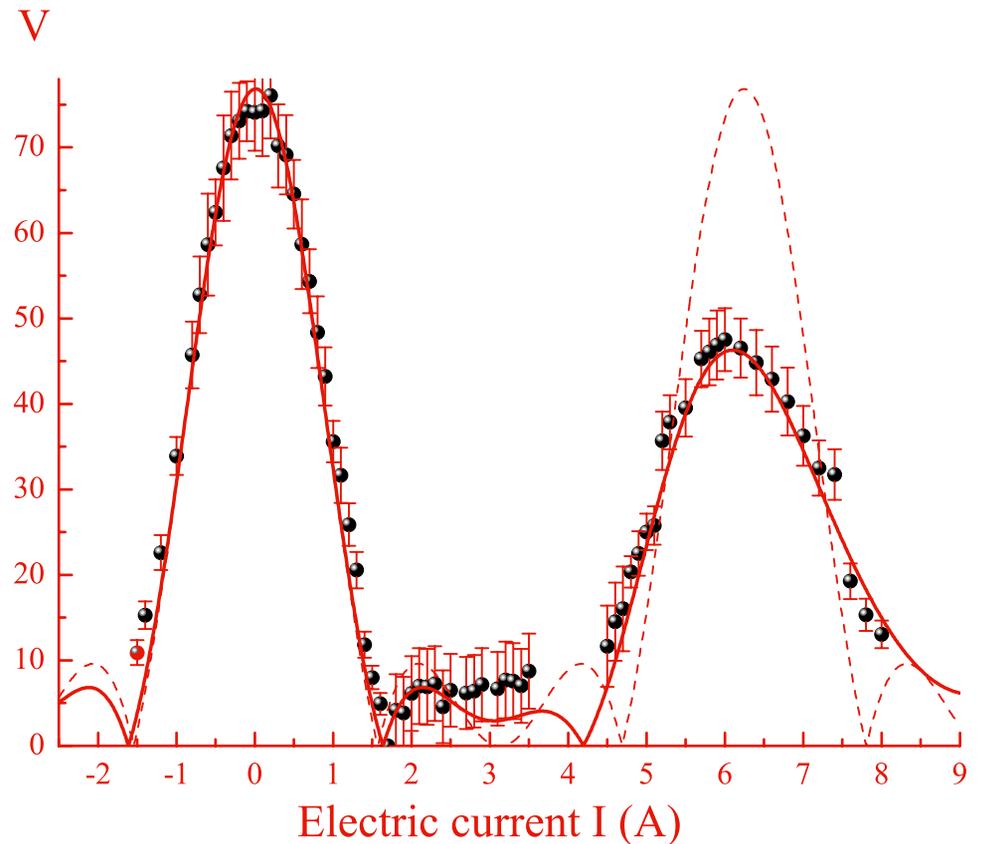
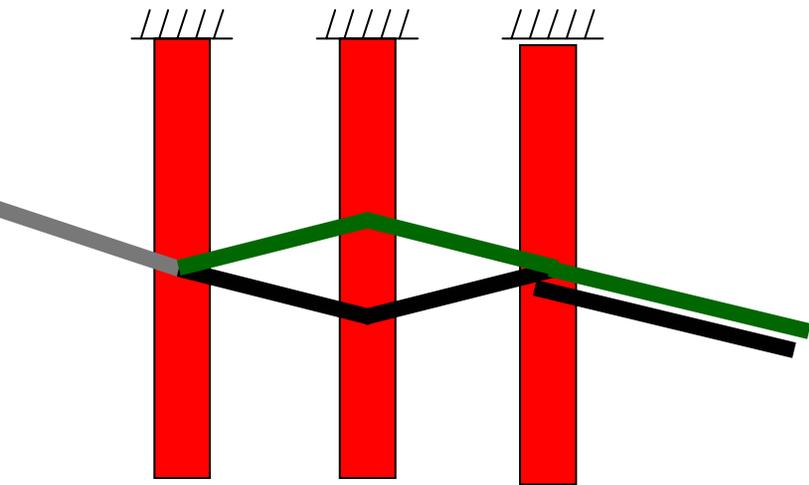
Diffraction d'ordre 2

Visibilité des franges en fonction des distances entre les “réseaux”



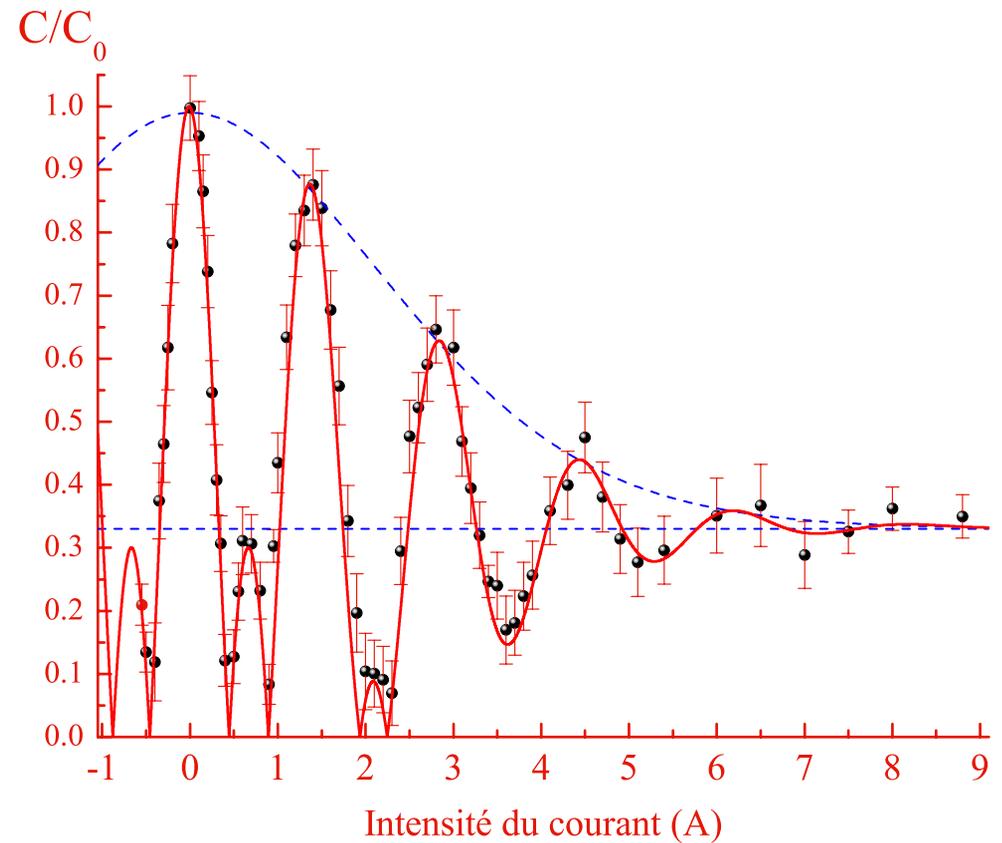
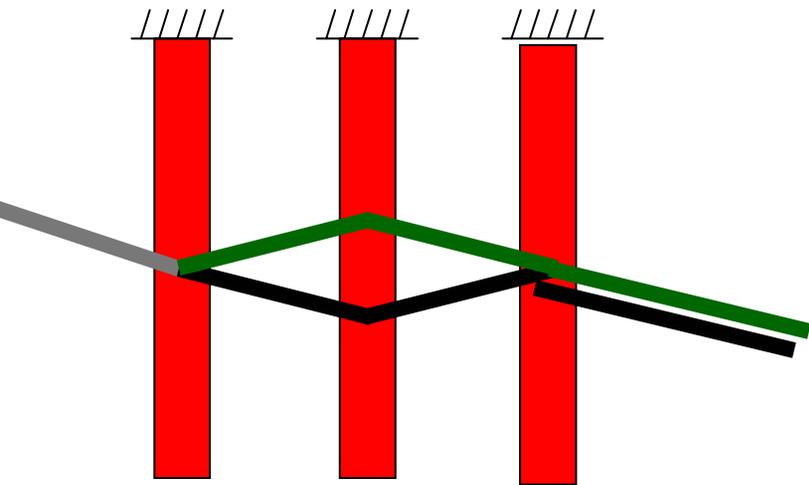
Visibilité des franges en fonction d'un gradient de champ magnétique transverse

(expérience avec le premier ordre de diffraction)



Visibilité des franges en fonction d'un gradient de champ magnétique transverse

(expérience avec le deuxième ordre de diffraction)



Visibilité des franges en fonction d'un gradient de champ magnétique transverse (théorie):

8 sous-niveaux F, M_F pour ${}^7\text{Li}$

$$\phi(M_F) = \frac{g_F \mu_B M_F}{\hbar \nu} \int B(s) ds$$

$$\Delta\phi(F, M_F) = \varphi M_F$$

$$\varphi = \frac{g_F \mu_B}{\hbar \nu} \int \frac{dB(s)}{dx} \Delta x(s) ds$$

$$\mathcal{V} = \mathcal{V}_0 \frac{2 + 4 \cos \varphi + 2 \cos 2\varphi}{8}$$

$$P(v)dv \propto \exp[-(v - u)^2/\alpha^2]$$

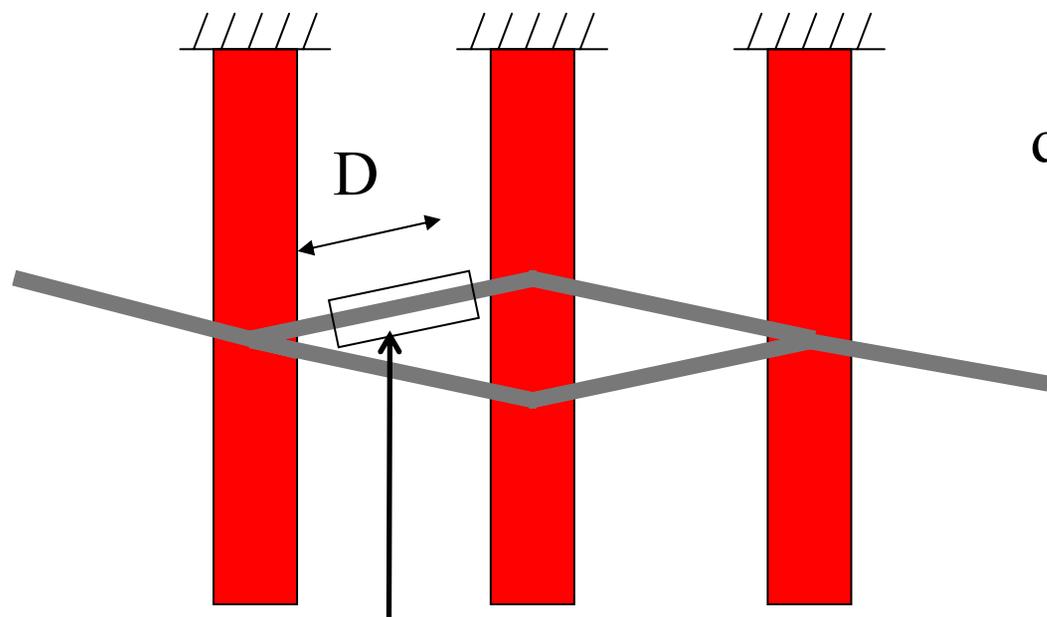
φ is proportional to v^{-2}

$$P(\varphi)d\varphi \propto \exp[-(\varphi - \varphi_m)^2/\beta^2]$$

In V one must replace $\cos(k\phi)$ by its average $\langle \cos(k\phi) \rangle$

$$\langle \cos(k\varphi) \rangle = \cos(k\varphi_m) \exp[-k^2\beta^2/4]$$

Une application de l'interférométrie atomique: la mesure de précision de faibles perturbations



perturbation U appliquée
sur un seul des deux chemins

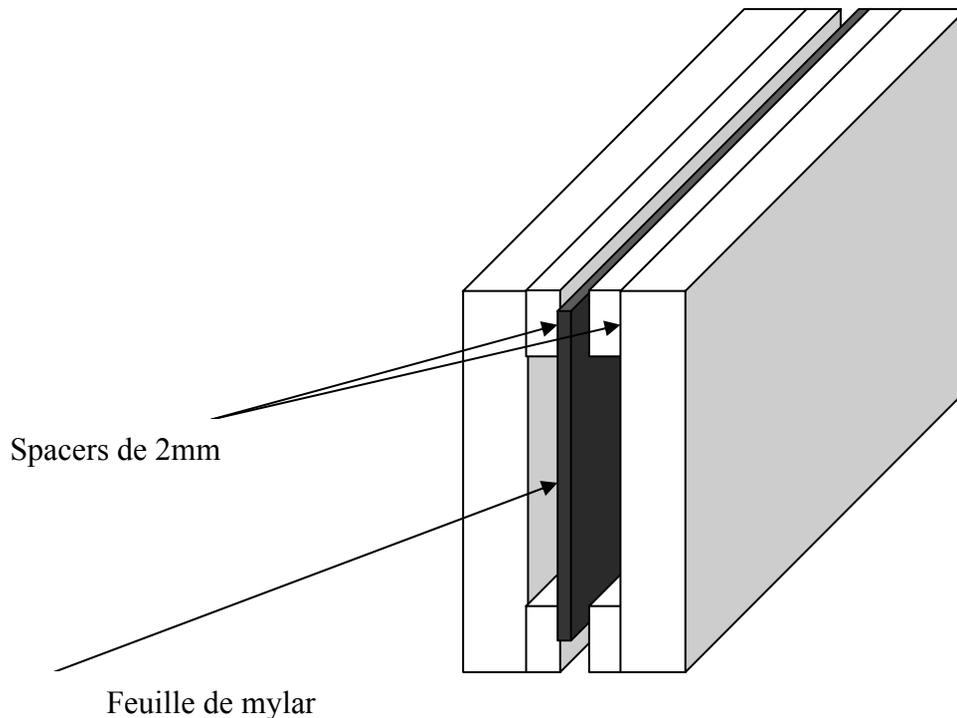
la distance typique entre les
deux chemins atomiques vaut
 $100 \mu\text{m}$

Déphasage
 $\Delta\Phi = U t / \hbar$
avec $D=0.1 \text{ m}$
 $t = D / v = 10^{-4} \text{ s}$

$\Delta\Phi = 1 \text{ milliradians} \leftrightarrow \text{perturbation } U = 6 \times 10^{-15} \text{ eV}$

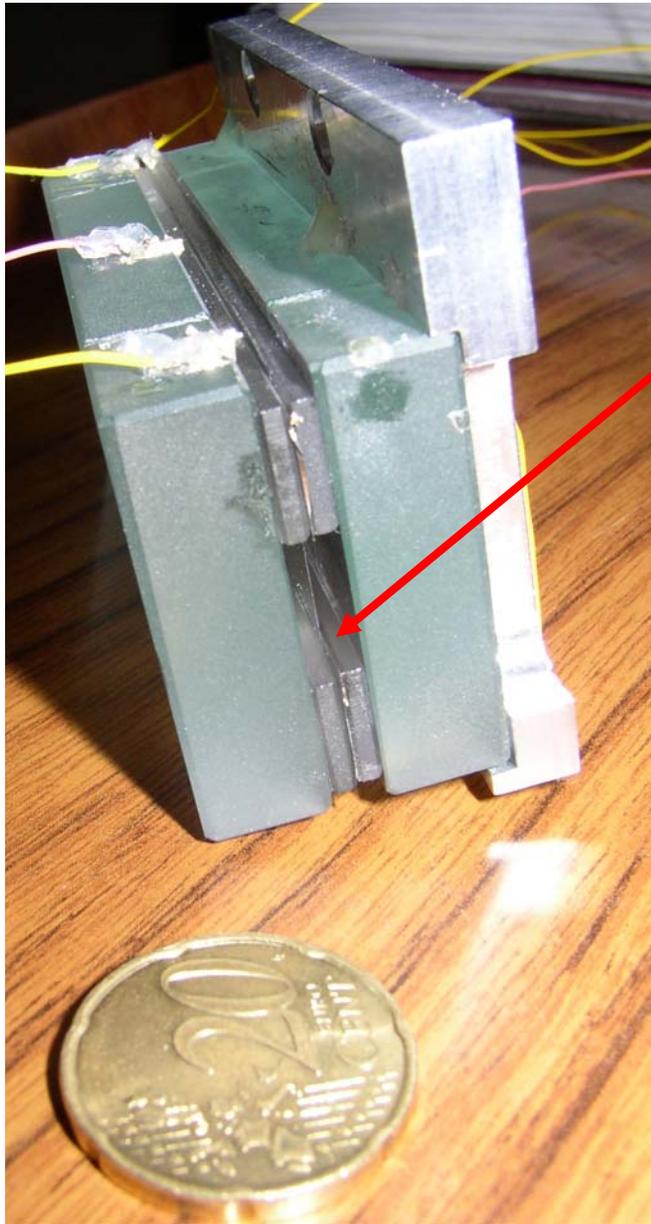
Mesure de la polarisabilité électrique α de l'atome de lithium

Condensateur avec “septum” = une électrode centrale mince (une feuille de mylar métallisée de 6 micromètres d'épaisseur) et avec des électrodes de garde



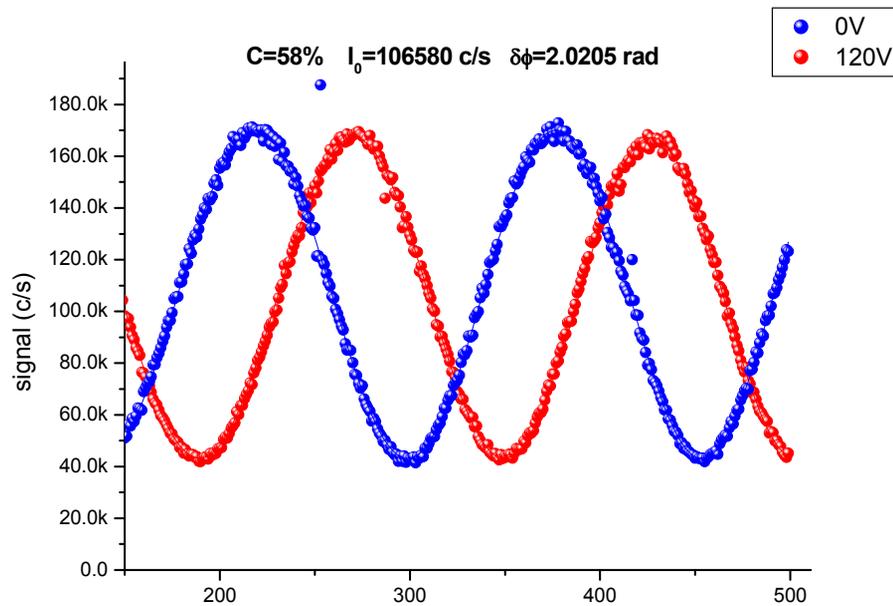
On peut ainsi appliquer
un champ électrique
sur un seul des chemins
atomiques

$$U \propto \alpha E^2$$



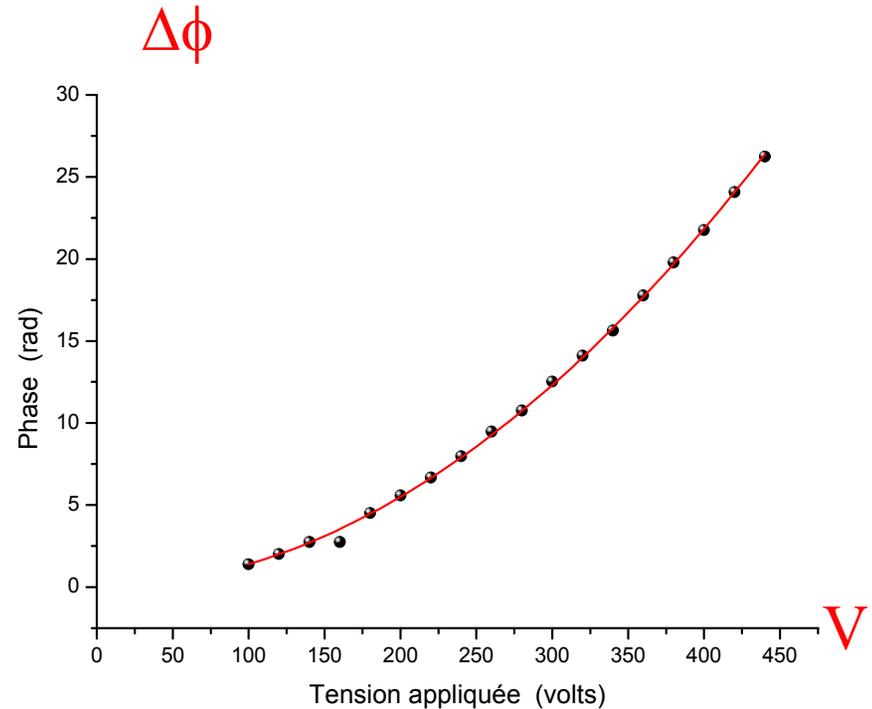
Condensateur avec
“septum” en mylar
aluminisé sur les deux
faces

Durant l’expérience,
les deux chemins
atomiques passent de part
et d’autre du septum



Signaux expérimentaux
(0.1 s par points)

Déphasage mesuré en fonction
 de la tension appliquée
 $\Delta\phi \propto V^2$



Conclusion

- Construction d'un interféromètre atomique de Mach-Zehnder utilisant la diffraction de Bragg
- Observation de franges avec une visibilité élevée $V = 84.5 \pm 1 \%$ en utilisant le premier ordre de diffraction
- Fonctionnement aux ordres de diffraction $p = 1, 2$ et 3
- Premières mesures d'interférométrie atomique avec des déphasages induits par un gradient de champ magnétique ou l'application d'un champ électrique sur un seul des deux chemins atomiques.
- Bonne sensibilité en phase de l'ordre de 20 milliradians pour un temps de mesure de 1 s.
- Nombreuses applications possibles incluant les gyros, si la stabilité de phase est suffisante.
- Preprint disponible sur : <http://hal.ccsd.cnrs.fr/ccsd-00003124>.