

# Dynamique d'un condensat de Bose-Einstein

Frédéric Chevy  
17 décembre 2001



## Sur les épaules du géant

1924: **Bose** et **Einstein**.

1938 : **London** relie superfluidité et condensation de Bose-Einstein.

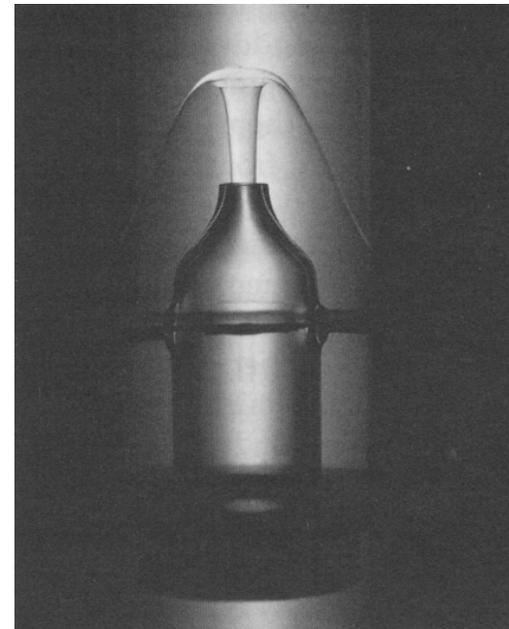
1941: théorie de **Landau**.

1947: théorie de **Bogoliubov**.

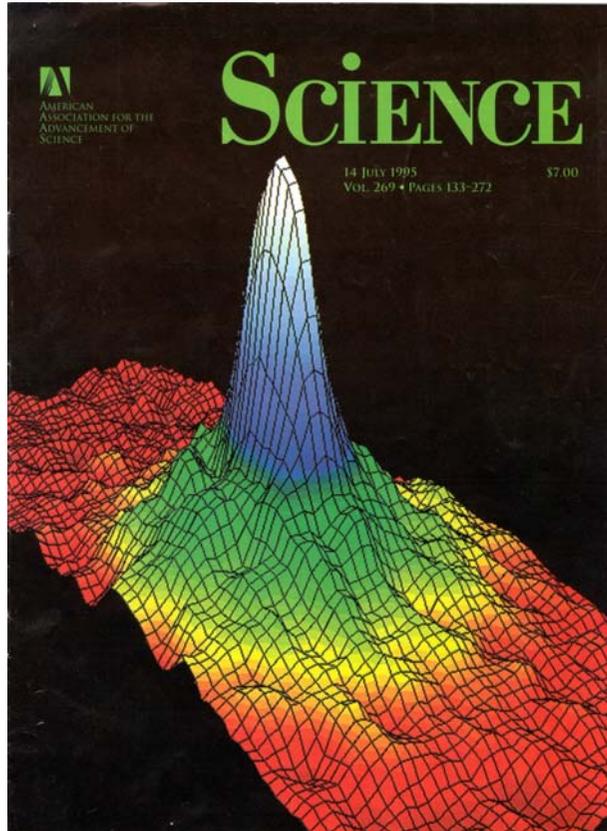
**MAIS** : fortes interactions.

1911: Liquéfaction de l'hélium par **Kammerling-Onnes**.

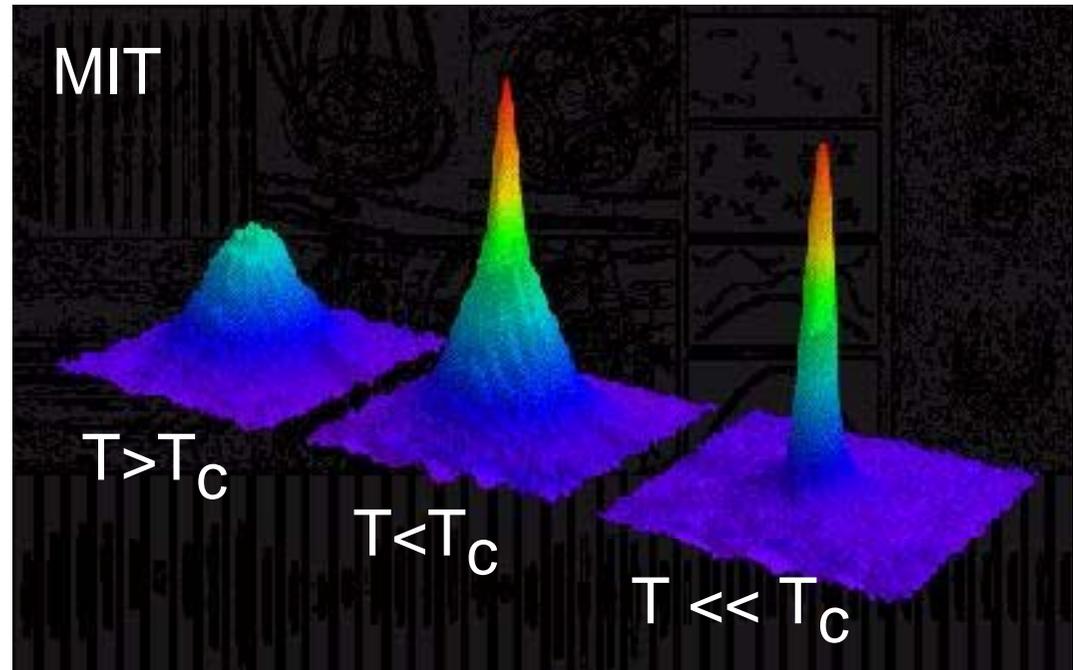
1938 : Superfluidité de l'hélium (**Kapitza**).



# Condensation de Bose-Einstein des alcalins



Rubidium



Sodium

+ lithium, hydrogène, hélium métastable, potassium

## Ce qui va suivre

- I - Superfluidité et tourbillons ;
- II - L'expérience du seau tournant sur un nuage d'atomes froids ;
- III - Observation des vortex ;
- IV - Interférométrie atomique : caractérisation du profil de phase du condensat ;
- V - Mesure du moment cinétique.

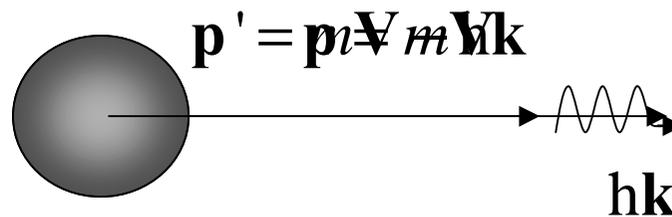
I

# Superfluidité et tourbillons

## Critère de superfluidité

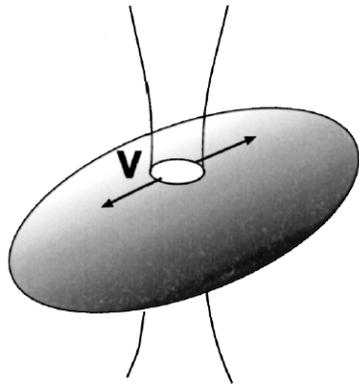
Excitations élémentaires : phonons.

$$\omega = ck$$



Conservation de l'énergie pour  $V > c$

## Mise en évidence de la vitesse critique



expérience du MIT :



Bang supersonique

## L'expérience du seau tournant

Fluide classique :

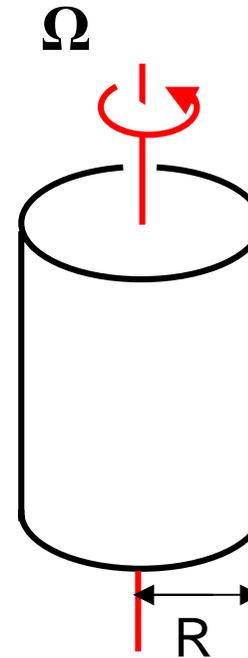
$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}$$



$$\nabla \times \mathbf{v} = 2\boldsymbol{\Omega}$$

Fluide quantique :  $\psi = \sqrt{\rho} e^{i\theta}$

$$\mathbf{v} = \frac{\hbar}{m} \nabla \theta \Rightarrow \begin{cases} \nabla \times \mathbf{v} = 0 \\ \oint \mathbf{v} d\mathbf{l} = \frac{\hbar}{m} \Delta \theta = n \frac{h}{m} \end{cases}$$



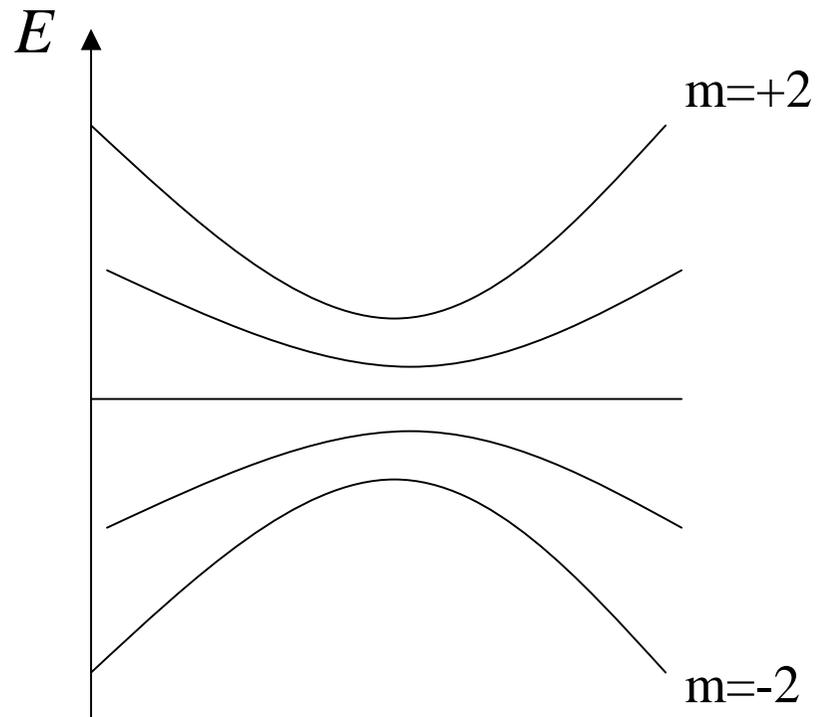
II

Une cuillère à atomes

## Dispositif expérimental

Atomes de rubidium 87 dans l'état  $F=2$ .  
Energie d'interaction avec  $\mathbf{B}$ :

$$E = -\mu g \mathbf{B}$$



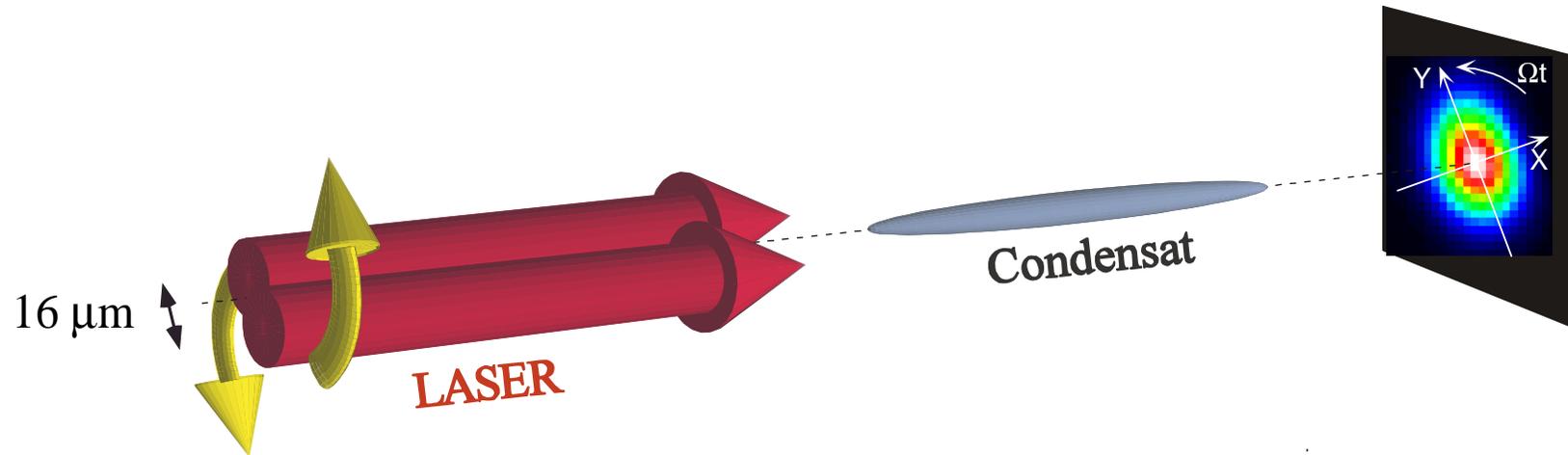
$$\omega_p = 2\pi \times 12 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{\perp} : 2\pi \times 150 \text{ rad/s}$$

$N : 10^5$  atomes à  $T < 100$  nK

Taille =  $6\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$

## Une cuillère à atomes



Potentiel dans le référentiel tournant :

$$V(X, Y) = \frac{m\omega^2}{2} (\varepsilon_X X^2 + \varepsilon_Y Y^2)$$

$$\varepsilon_X = 0,09 \quad \varepsilon_Y = 0,03$$

# Visibilité des vortex

Taille du cœur :

*In situ*

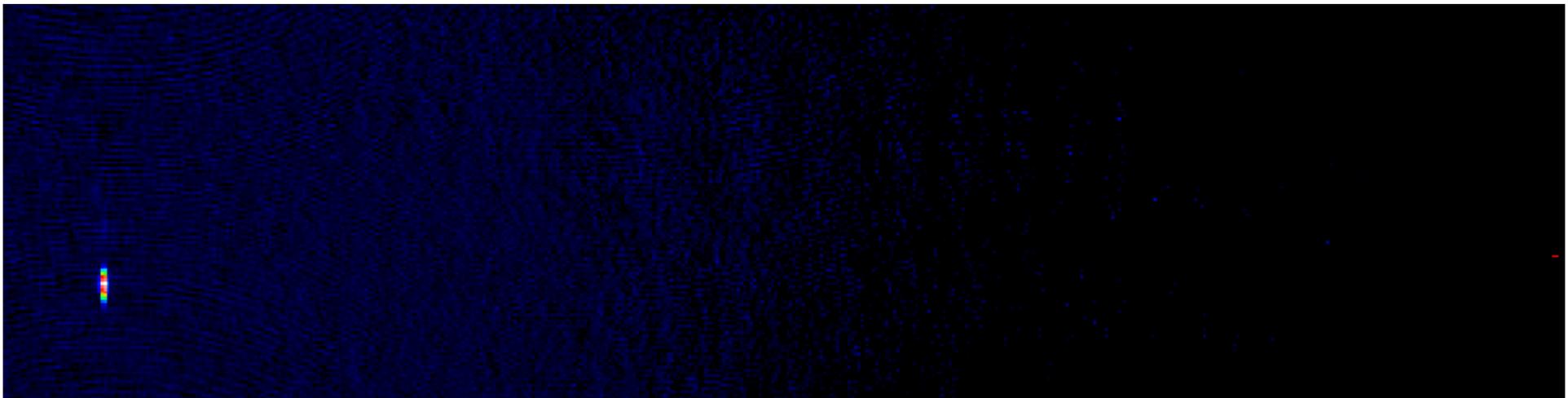
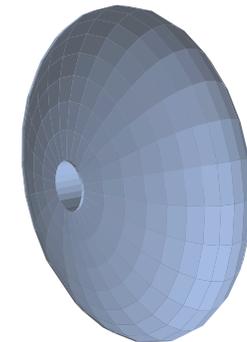
$$\xi = 1 / \sqrt{8\pi\rho a} : 0,2\mu\text{m}$$

×40

8μm

$$\rho = 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

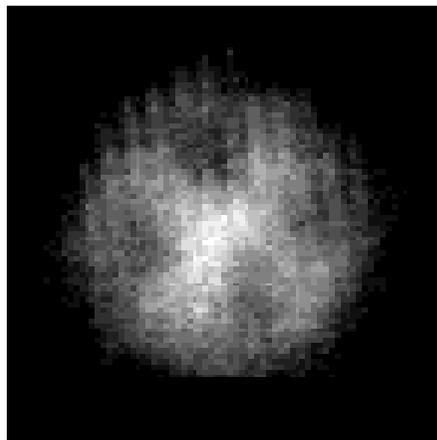
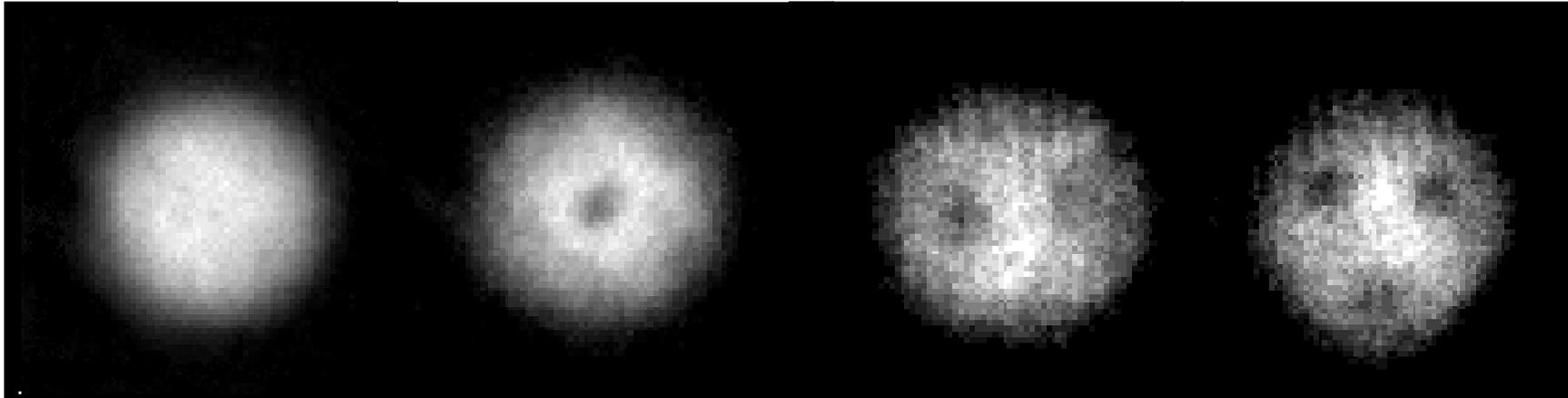
$$a = 5.5 \text{ nm}$$



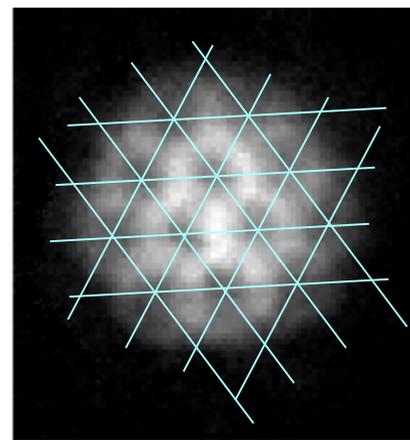
### III

## Vortex dans un condensat de Bose-Einstein

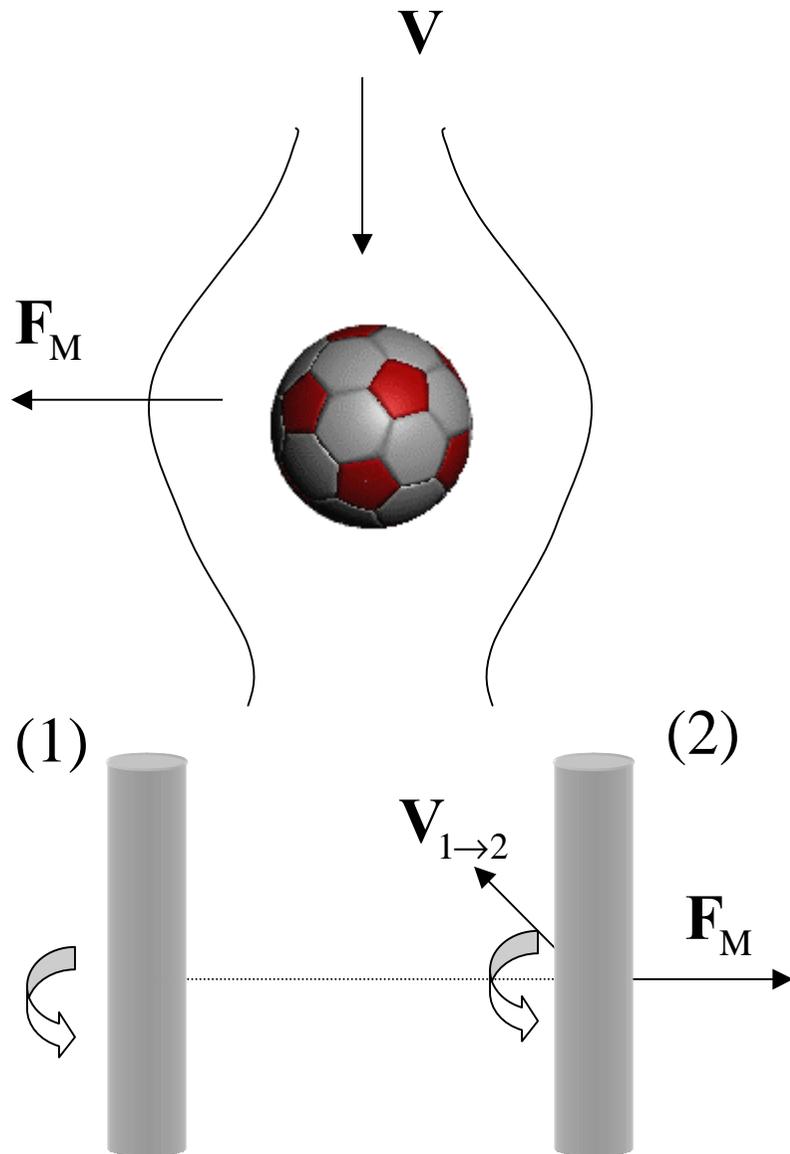
# Vortex dans un condensat de Bose-Einstein



...



# Force de Magnus



Instabilité des vortex  
de charge  $> 1$ .

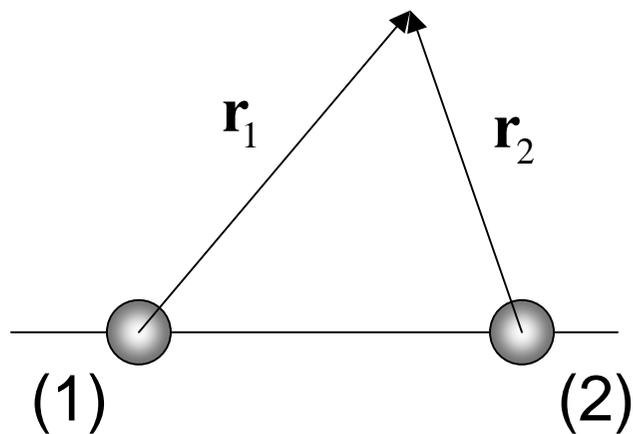
Réseau d'Abrikosov.

IV

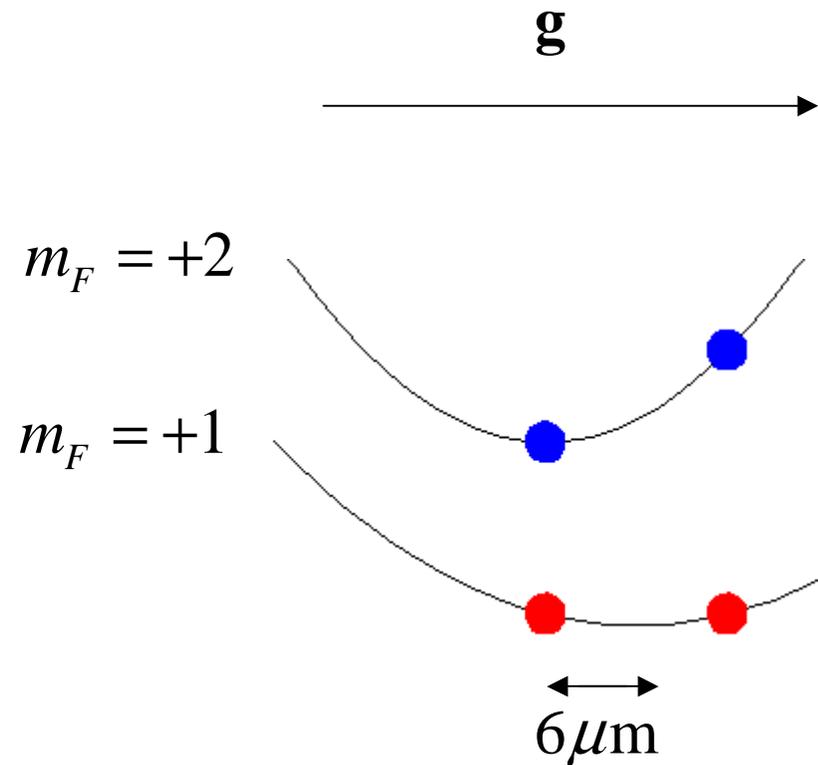
Phase des vortex

# Principe d'un interféromètre atomique

Principe d'une expérience d'interférences atomiques à division d'amplitude.

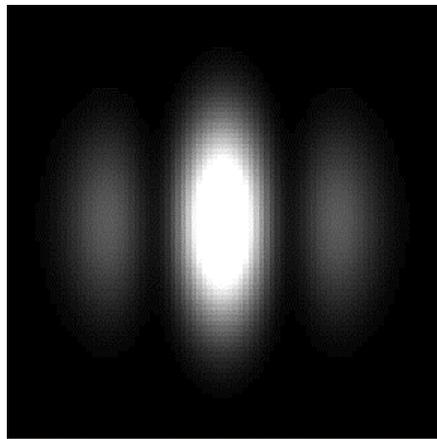


$$\delta\phi_i = E_i t / \hbar = m r_i^2 / 2 \hbar t$$

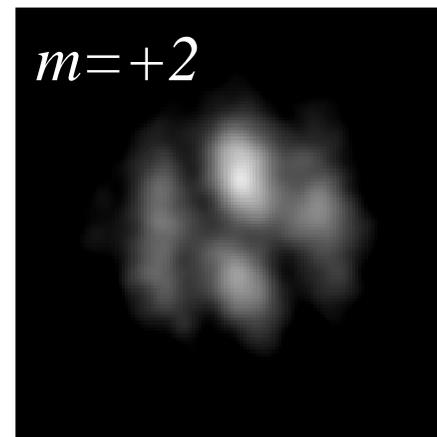
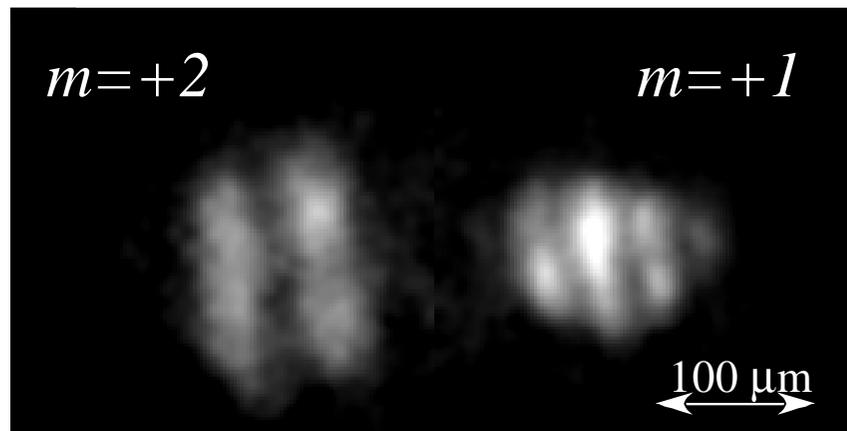
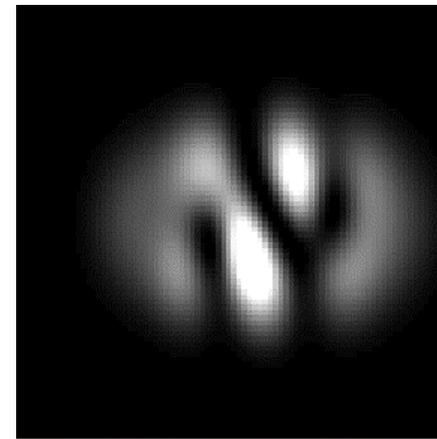


# Phase d'un vortex

Pas de vortex



Un vortex



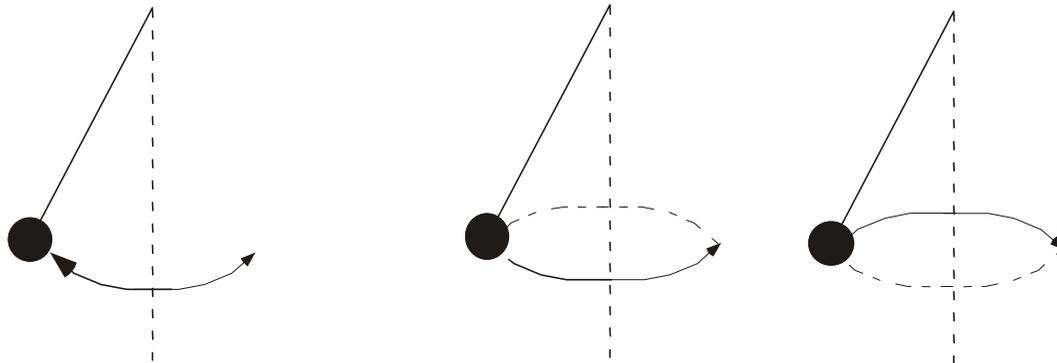
V

Pendule de Foucault

## Mise en évidence de la rotation d'un condensat



Méthode analogue au **pendule de Foucault**.



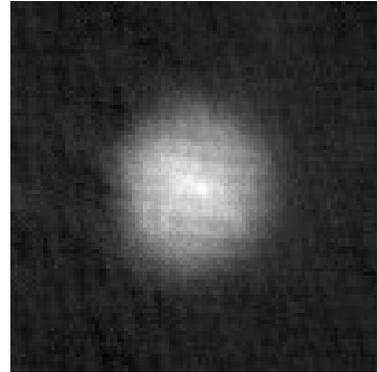
Dans un référentiel  
non galiléen :

$$\omega_+ \neq \omega_-$$

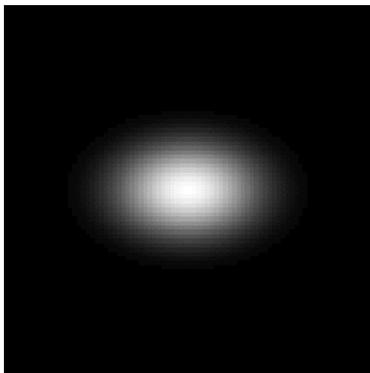
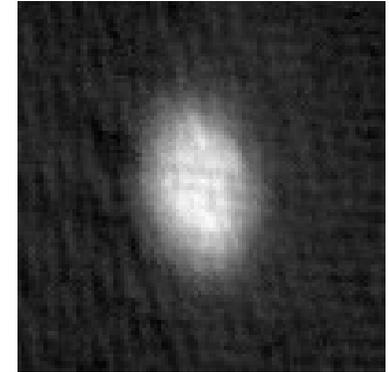
## Mode quadrupolaire

Mode d'oscillation de l'ellipticité

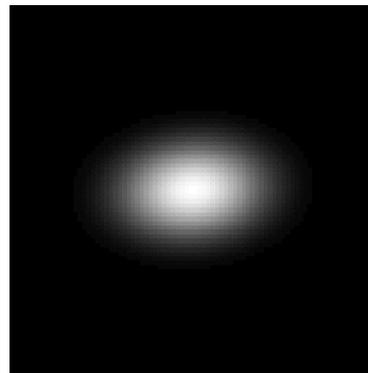
$$\omega_{\text{exp}} = 1,42\omega_{\perp} : \sqrt{2}\omega_{\perp}$$



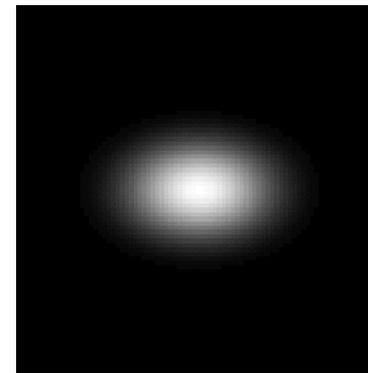
excitation



=



+



NB : Vitesse de rotation :  $\sqrt{2}\omega_{\perp}/2 : 0,7\omega_{\perp}$

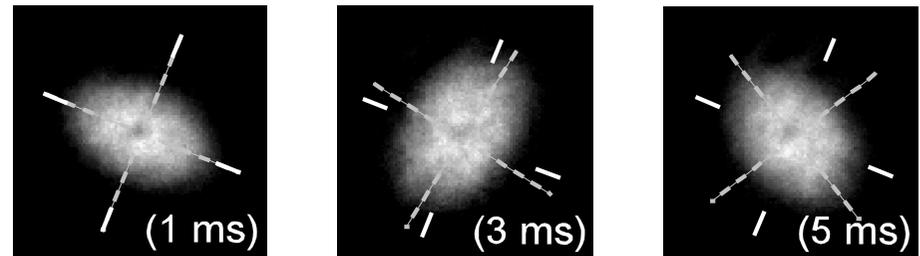
## Mode quadrupolaire en présence de vortex

La présence du vortex **lève**  
**la dégénérescence** entre les  
modes  $m=\pm 2$ .



**Précession** des axes du nuage

$$\dot{\phi} = \frac{\omega_+ - \omega_-}{4} = \frac{\langle L_z \rangle}{2m \langle r_{\perp}^2 \rangle}$$

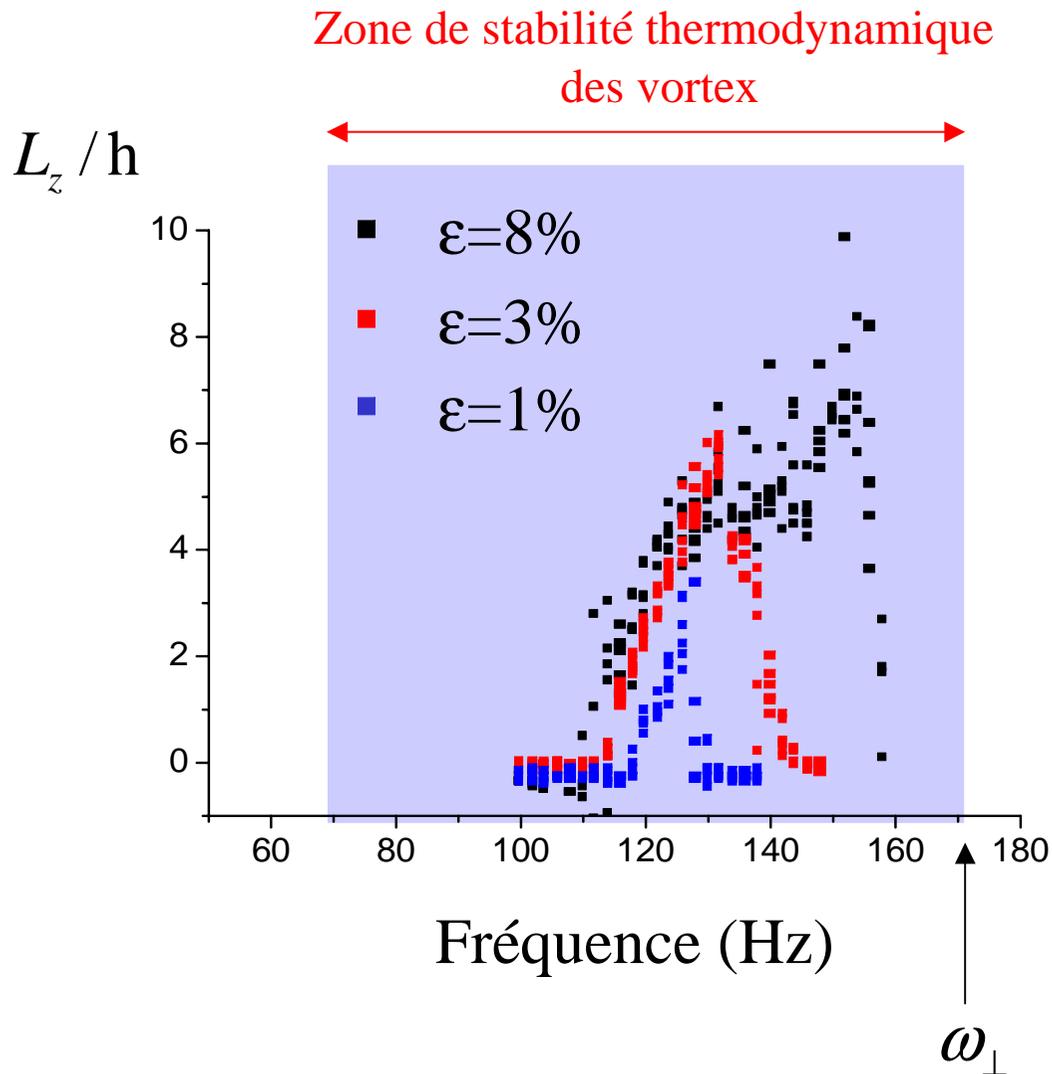


$$\dot{\phi} = 5.9^\circ / \text{ms}$$

$$\sqrt{\langle r_{\perp}^2 \rangle} = 2.0 \mu\text{m}$$

$$\rightarrow \langle L_z \rangle = 1.2 (\pm 0.1) h$$

# Mesure du moment cinétique



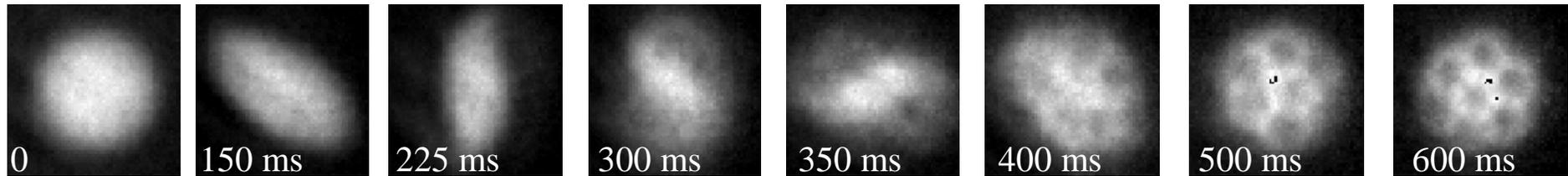
Quantification de  $L_z$   
au seuil de nucléation.

Croissance continue  
au delà.

Seuil différent de la  
prédiction thermo-  
dynamique.

Zone de nucléation  
centrée sur  $0,7 \omega_{\perp}$

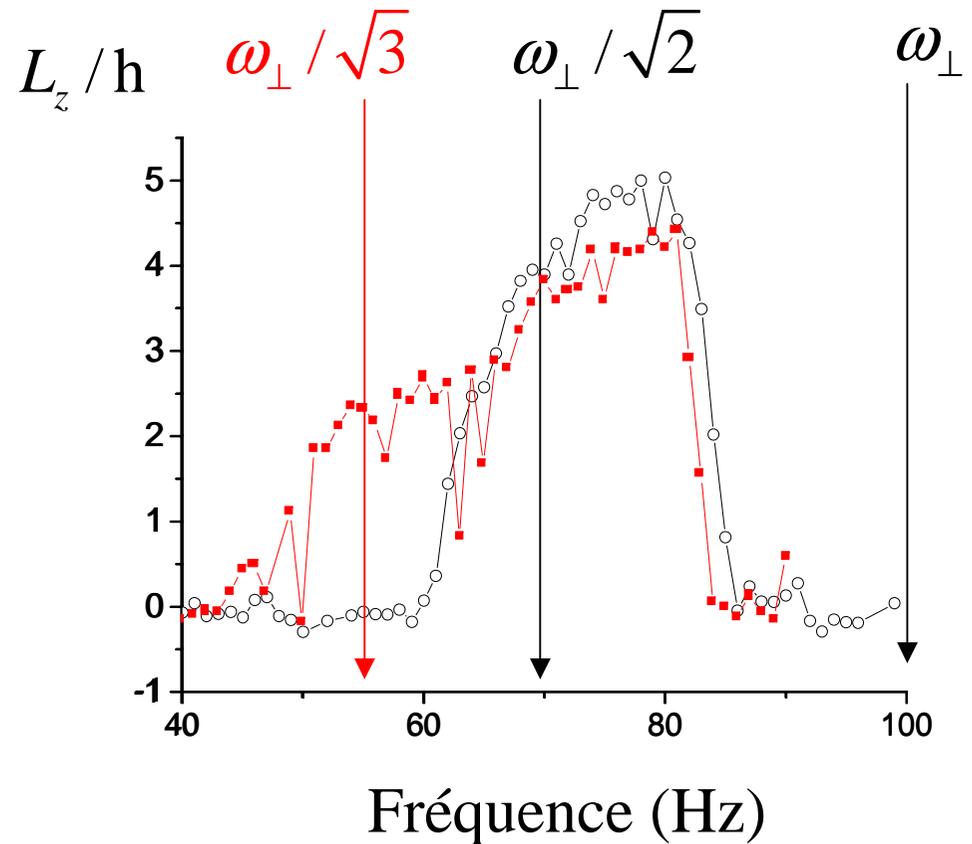
# Mécanisme de nucléation



Instabilité dynamique  
du mode quadrupolaire.



Test : instabilité par des  
modes d'ordre supérieur  
(octopôle).



Conclusion

## Conclusion

Transposition de l'expérience du seau tournant à un gaz d'atomes froids.

⇒ Nucléation de vortex quantifiés.

Caractérisation des vortex (phase, moment cinétique).

Elucidation du mécanisme de nucléation : instabilité dynamique des modes de surface.

Questions ouvertes :

Forme et dynamique de la ligne de vorticité.

Mécanisme de disparition des vortex.

## Remerciements

Jean Dalibard  
Kirk Madison

Vincent Bretin  
Peter Rosenbusch

Pierre Desbiolles  
David Guéry-Odelin  
Johannes Söding

Wendel Wolheben  
Christophe Deroulers...



That's all Folks!