

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.

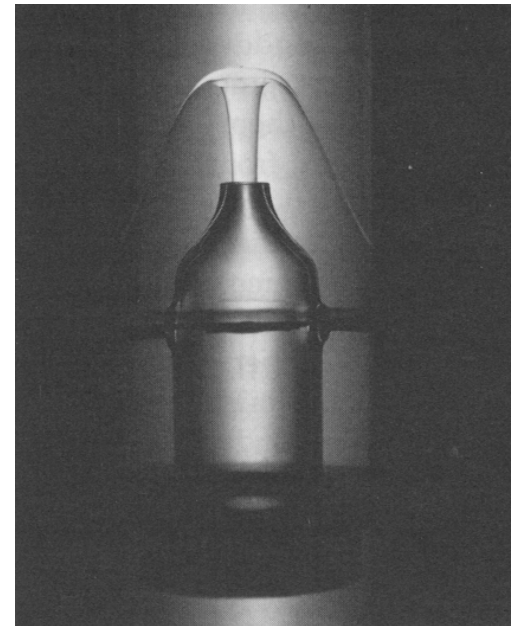
1941: théorie de **Landau**.

1947: théorie de **Bogoliubov**.

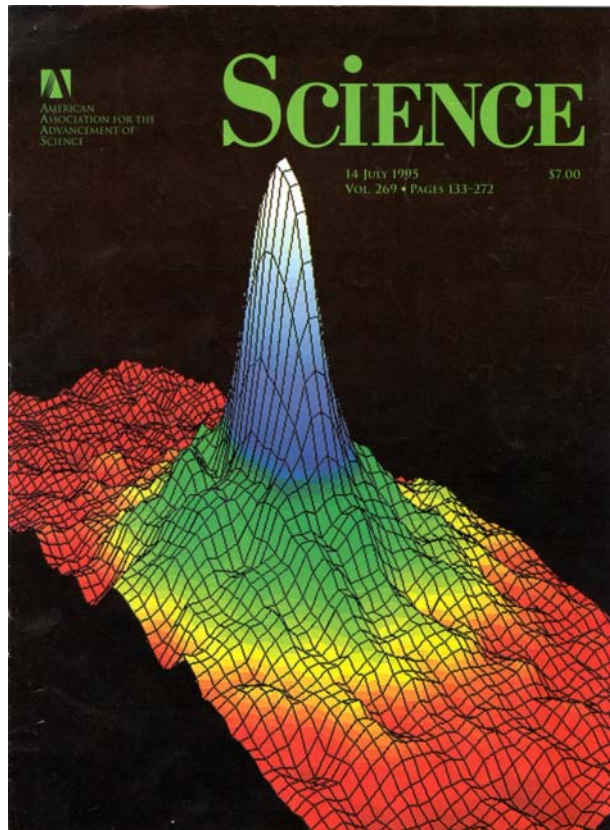
MAIS : fortes interactions.

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

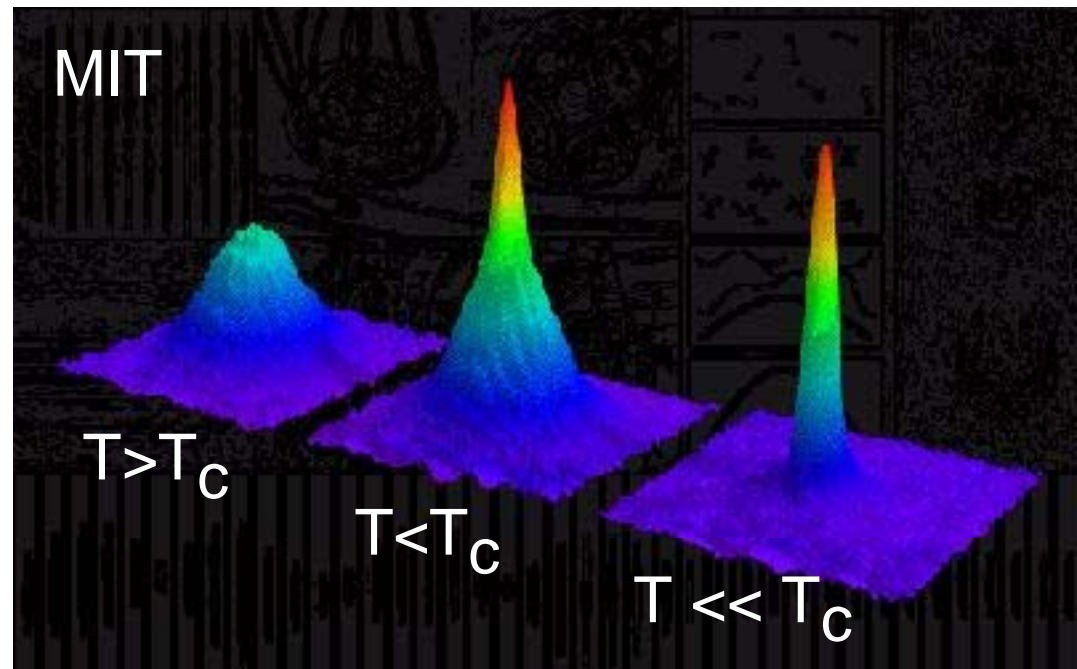
1938 : Superfluidité de l'hélium (**Kapitza**).



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.

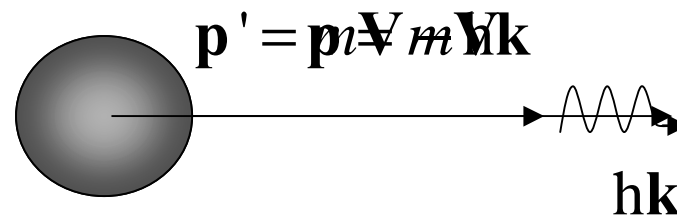
I

Superfluidité et tourbillons

Critère de superfluidité

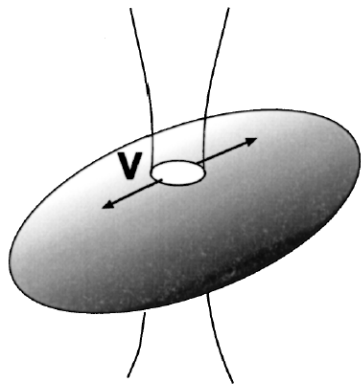
Excitations élémentaires : phonons.

$$\omega = ck$$



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 :

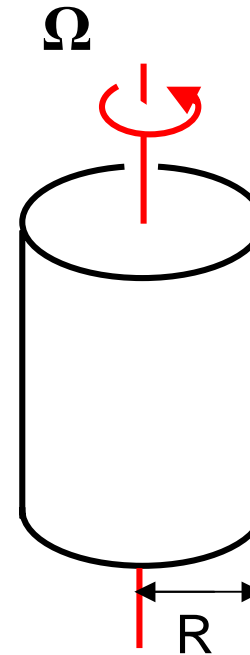
$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}$$



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

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

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



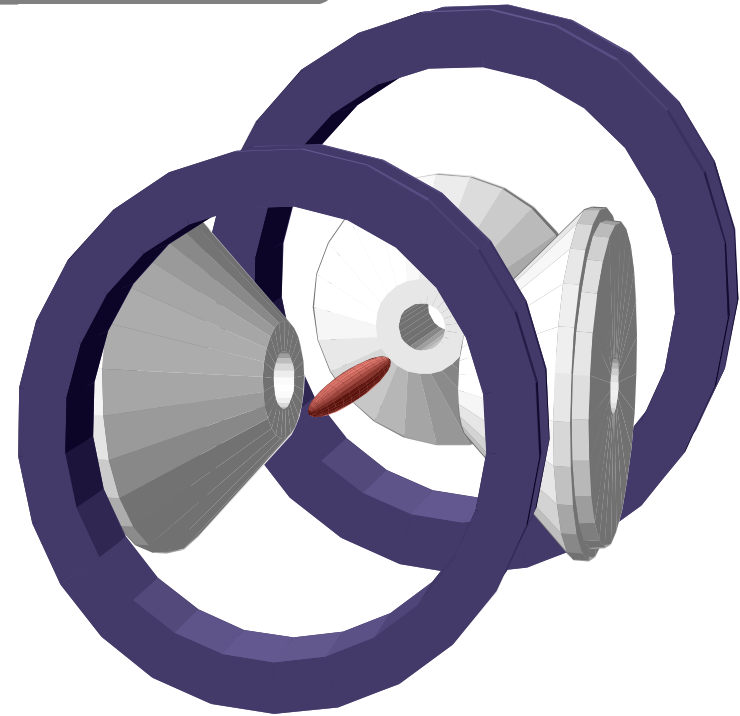
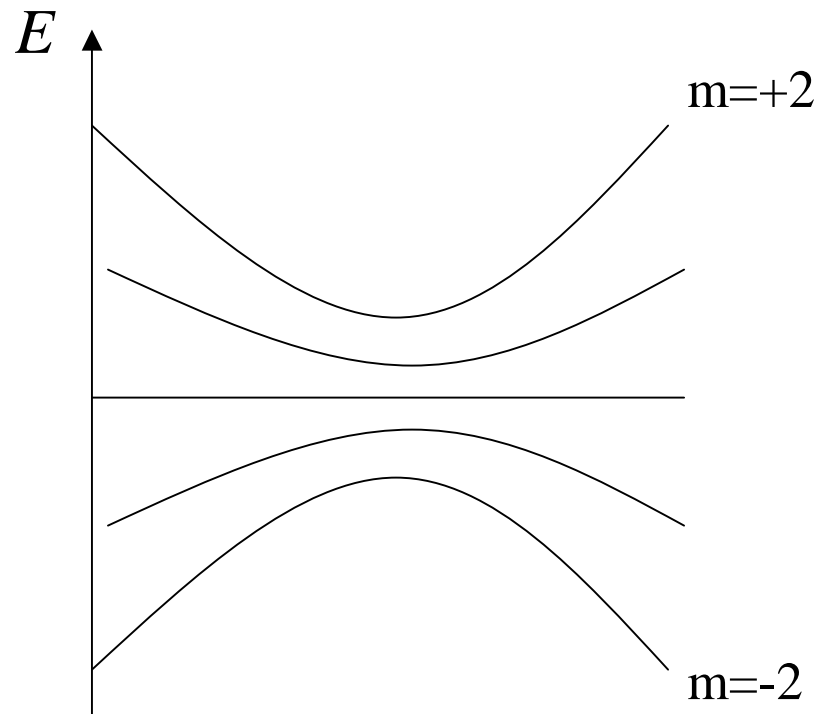
II

Une cuillère à atomes

Dispositif expérimental

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

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



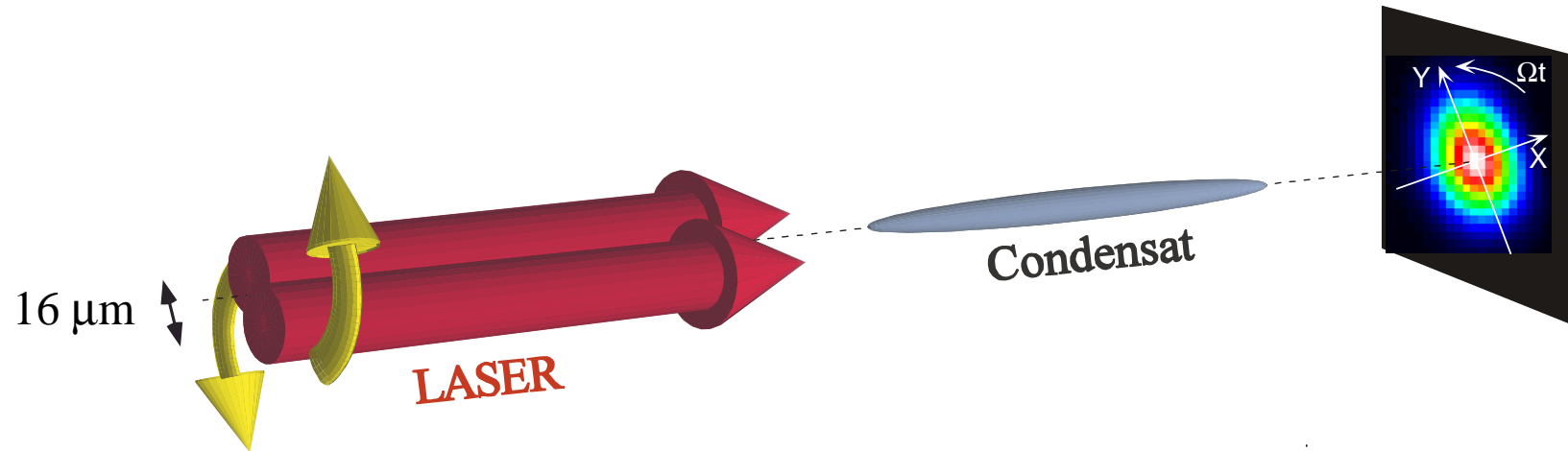
$$\omega_p = 2\pi \times 12 \text{ rad/s}$$

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

$N : 10^5$ 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 :

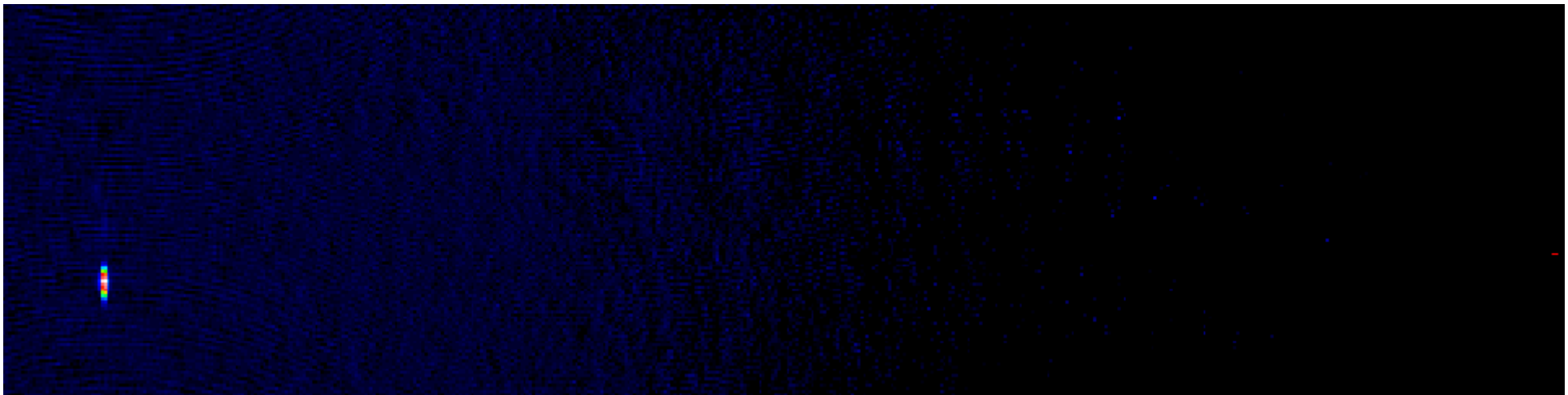
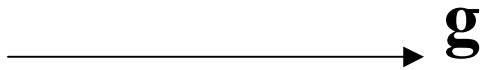
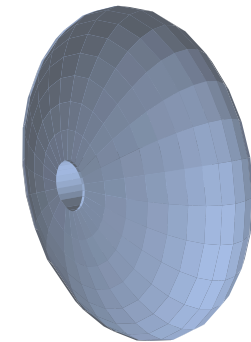
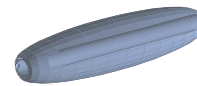
In situ $\xi = 1/\sqrt{8\pi\rho a} : 0,2\mu\text{m}$

$\times 40$

$8\mu\text{m}$

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

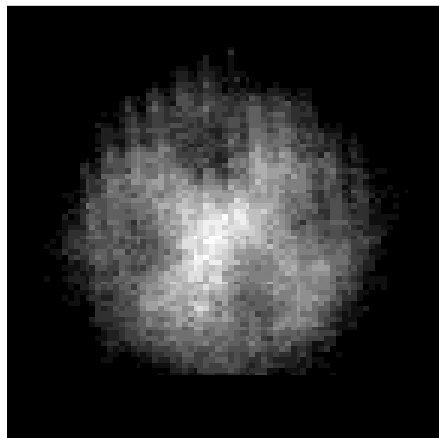
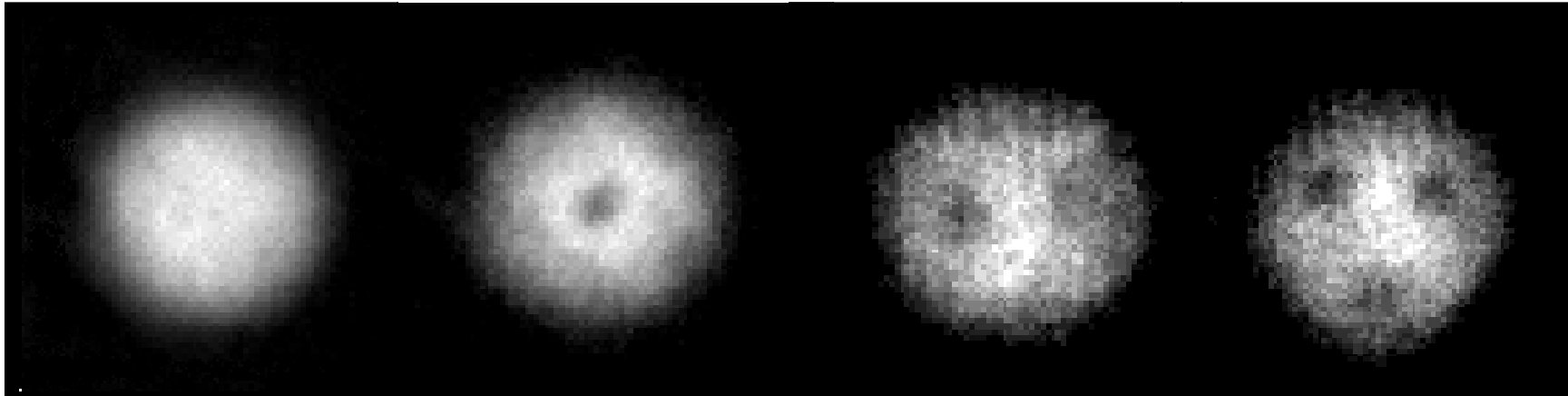
$$a = 5.5 \text{ nm}$$



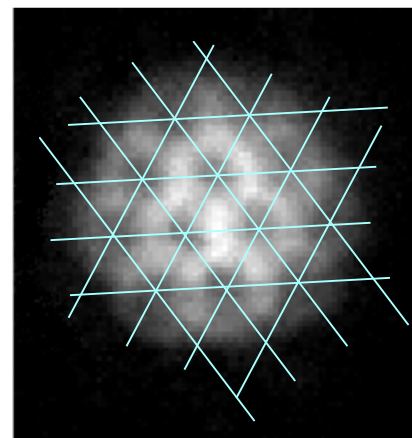
III

Vortex dans un condensat
de Bose-Einstein

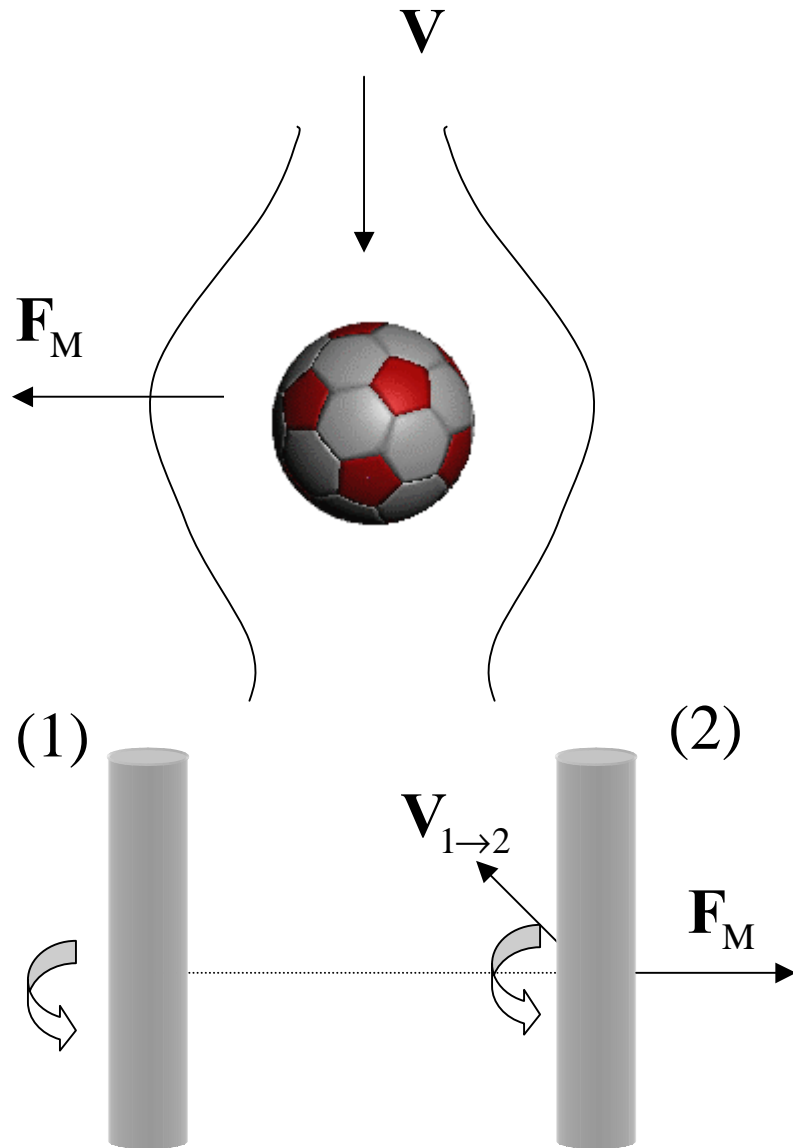
Vortex dans un condensat de Bose-Einstein



...



Force de Magnus



Instabilité des vortex
de charge > 1 .

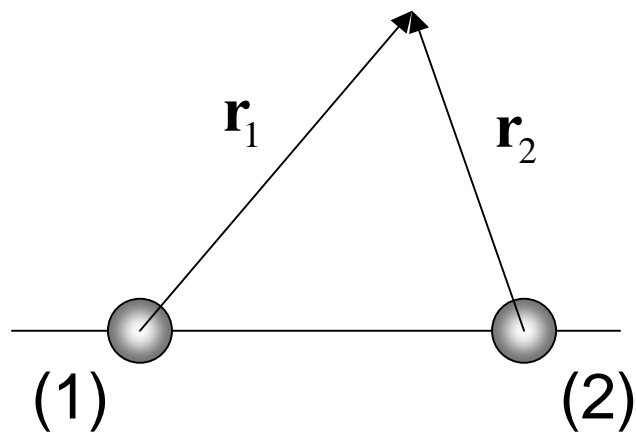
Réseau d'Abrikosov.

IV

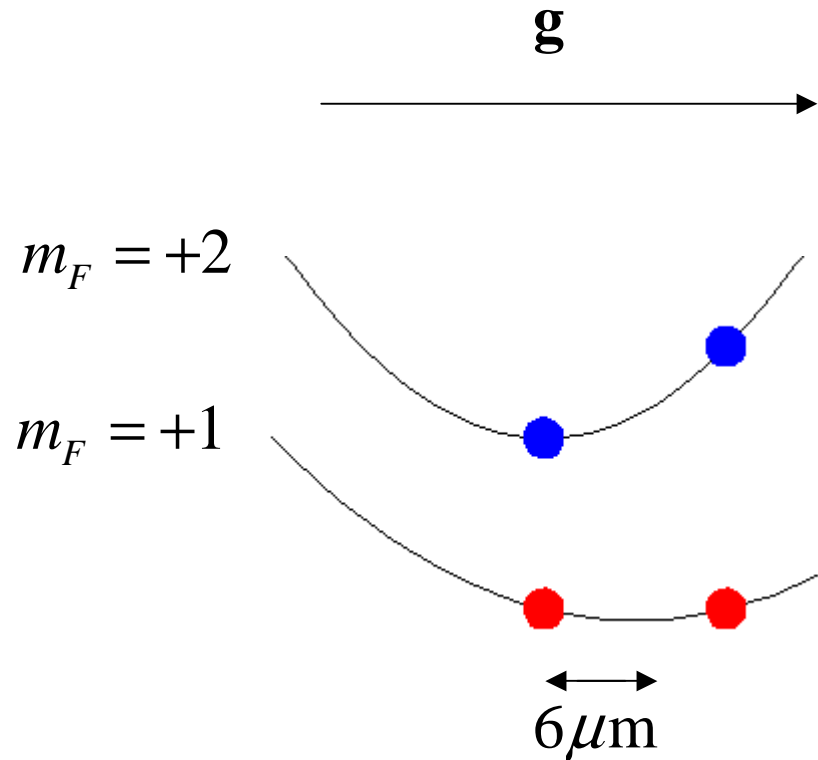
Phase des vortex

Principe d'un interféromètre atomique

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

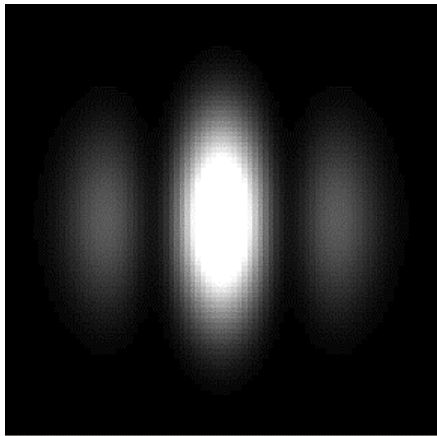


$$\delta\phi_i = E_i t / \hbar = m r_i^2 / 2 \hbar t$$

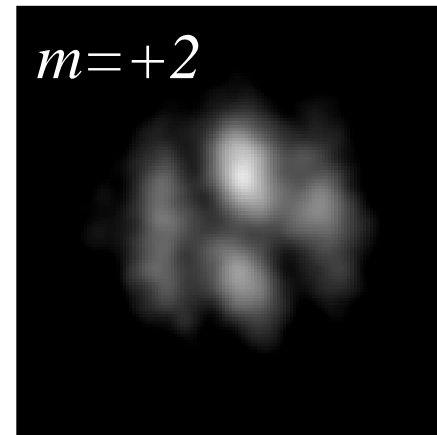
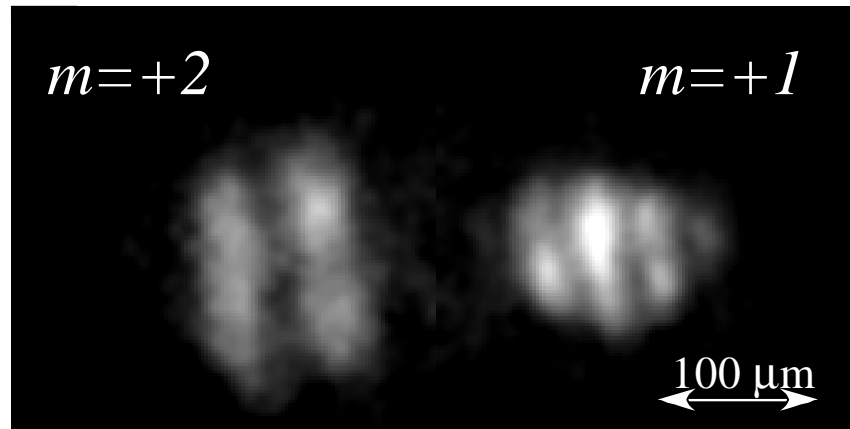
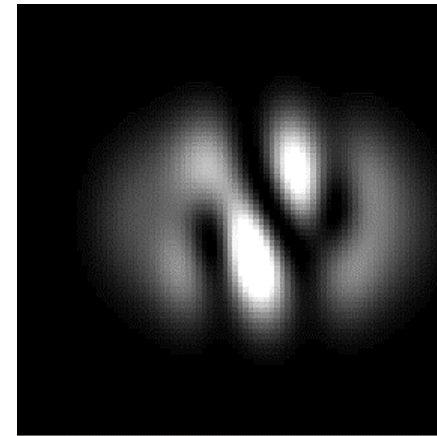


Phase d'un vortex

Pas de vortex



Un vortex



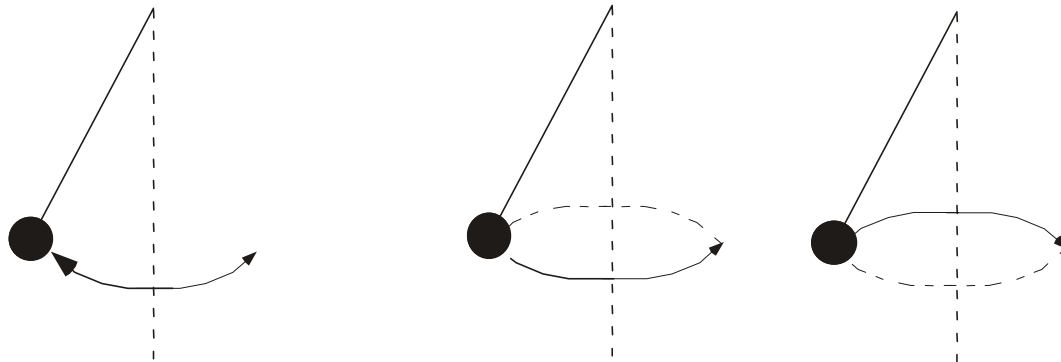
V

Pendule de Foucault

Mise en évidence de la rotation d'un condensat



Méthode analogue au **pendule de Foucault**.



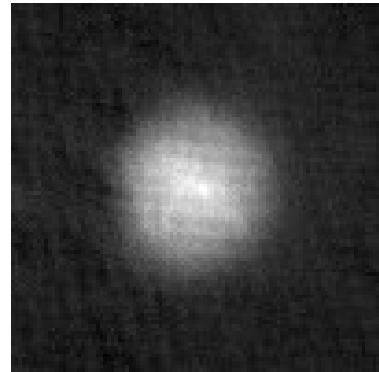
Dans un référentiel
non galiléen :

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

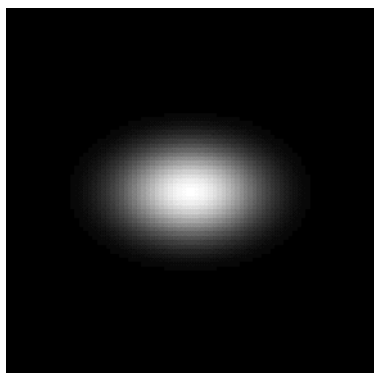
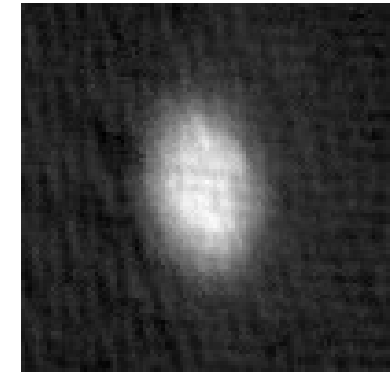
Mode quadrupolaire

Mode d'oscillation de l'ellipticité

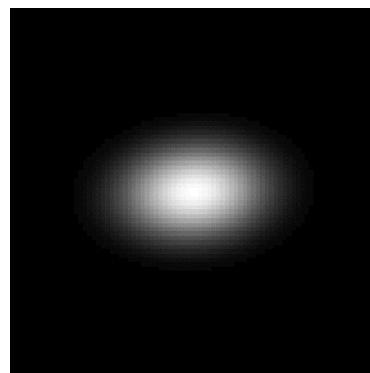
$$\omega_{\text{exp}} = 1,42\omega_{\perp} : \sqrt{2}\omega_{\perp}$$



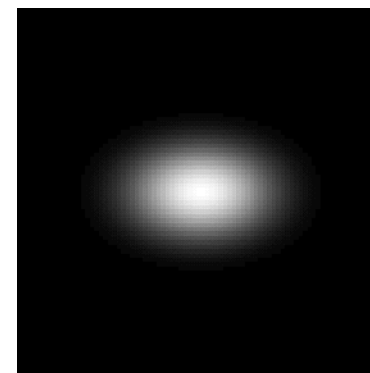
excitation



=



+



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

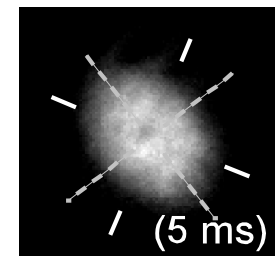
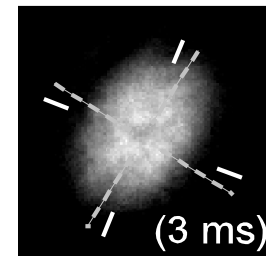
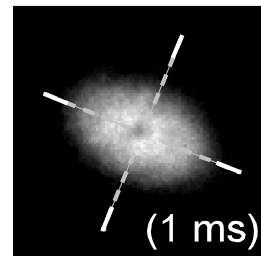
Mode quadrupolaire en présence de vortex

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



Précession des axes du nuage

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

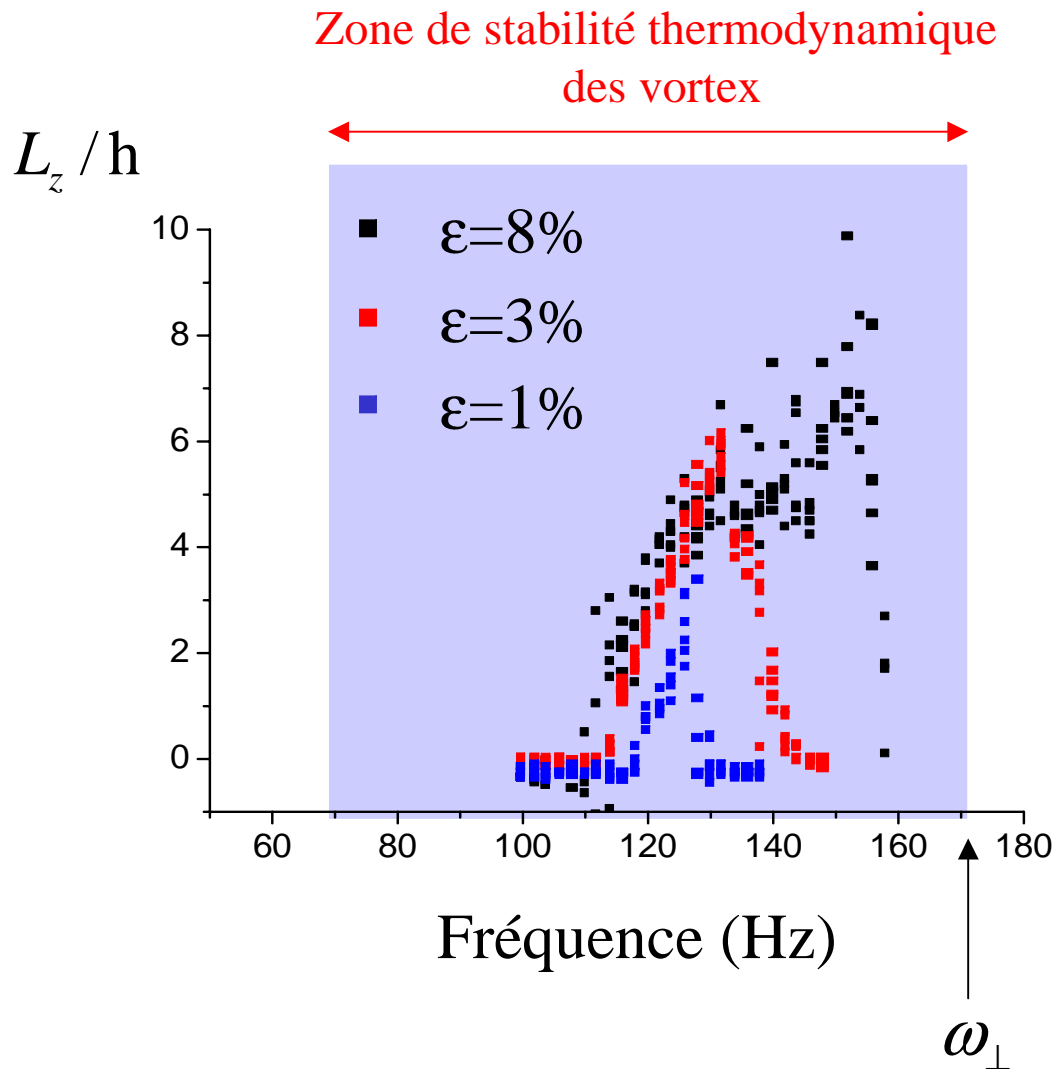


$$\dot{\phi} = 5.9^\circ / \text{ms}$$

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

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

Mesure du moment cinétique



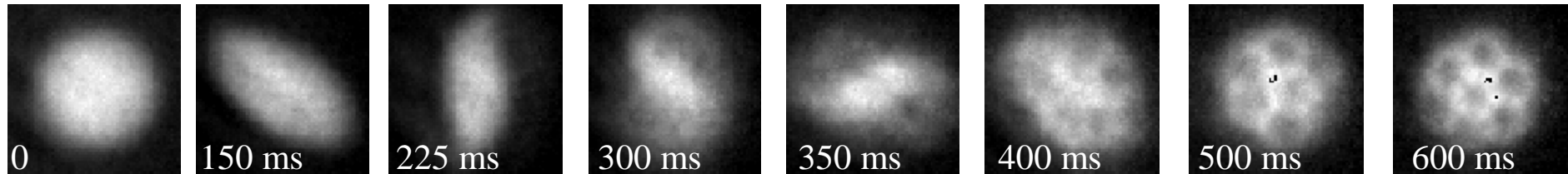
Quantification de L_z
au seuil de nucléation.

Croissance continue
au delà.

Seuil différent de la
prédiction thermo-
dynamique.

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

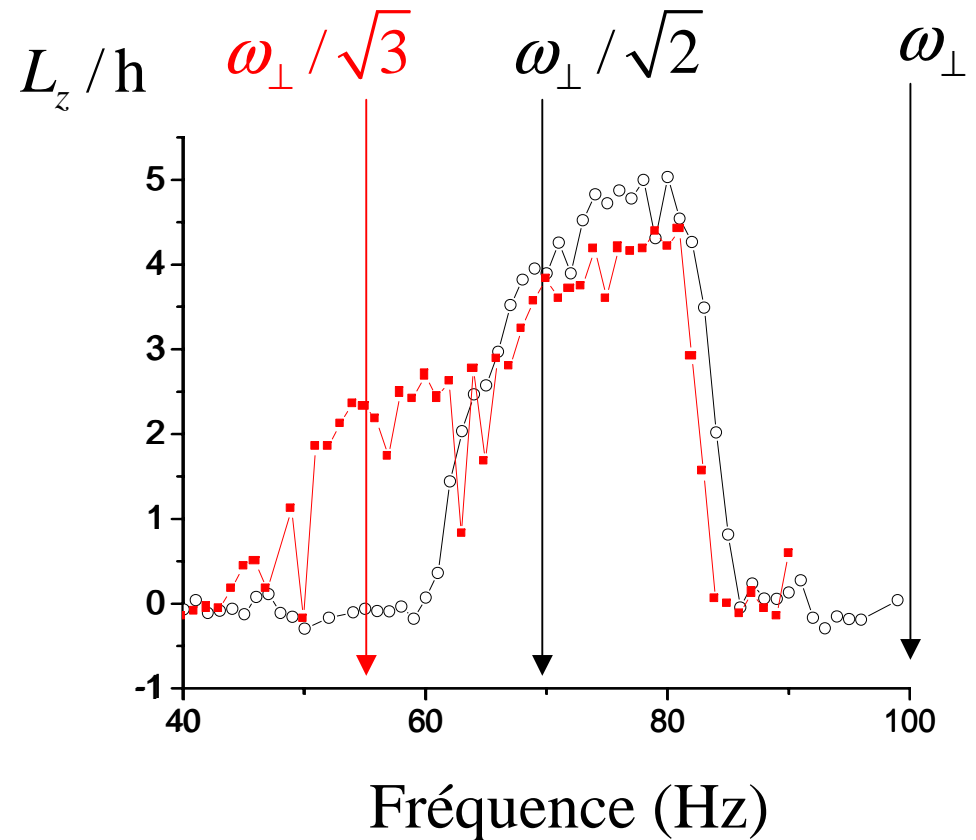
Mécanisme de nucléation



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!