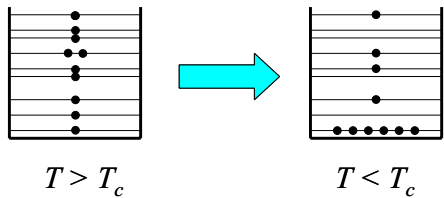


La condensation de Bose-Einstein

1924, Einstein : Gaz de bosons sans interaction



*"C'est une belle théorie,
mais contient-elle une vérité ?"*

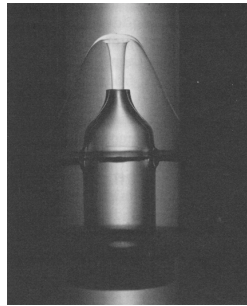
1938, Kapitza : superfluidité de ^4He liquide

London relie les deux problèmes

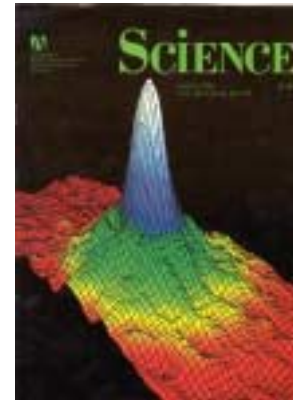
mais, même pour $T=0$, $N_0/N < 10\%$

1956, Penrose & Onsager : ordre à longue portée dans un fluide en interaction

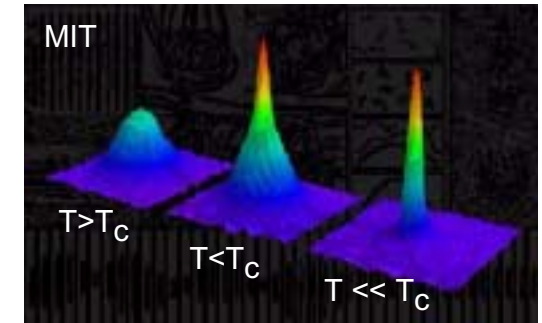
$$\lim_{x \rightarrow \infty} \langle \hat{\Psi}^\dagger(x) \hat{\Psi}(0) \rangle \neq 0$$



1995 : observation de la CBE en phase gazeuse



Rubidium



Sodium

+ lithium, hydrogène, hélium métastable, potassium

Ces systèmes sont-ils cohérents et superfluides ?

Cohérence vs. superfluidité

Cohérence: description du système en terme d'une fonction d'onde macroscopique $\Psi(\mathbf{r}, t)$

Analogie à la description du champ électromagnétique d'un laser

Ce qui est prédit :

- un gaz de Bose 3D (parfait ou réel) devrait être cohérent,
- un gaz de Bose 2D (parfait ou réel) ne devrait pas être cohérent.

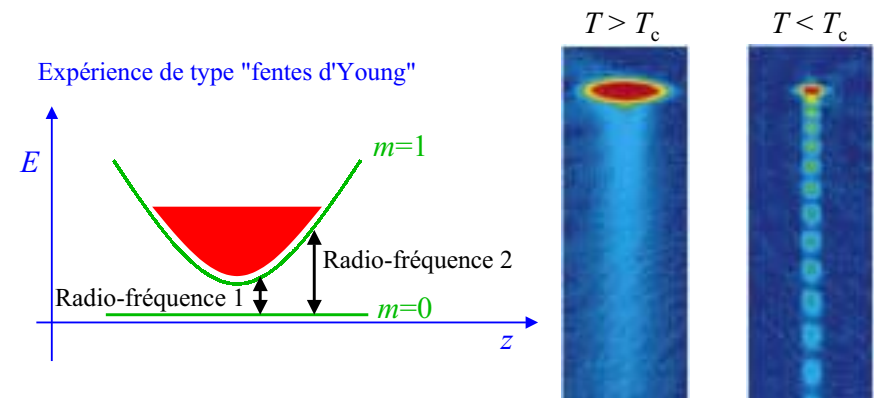
Superfluidité: pas de friction lors d'un mouvement lent relativement à un objet fixe.

Landau : superfluidité pour un spectre d'excitation linéaire $E(p)=cp$

Ce qui est prédit :

- un gaz de Bose parfait ne devrait pas être superfluide,
- un gaz de Bose réel (2D or 3D) devrait être superfluide.

Cohérence d'un condensat de Bose-Einstein : l'expérience de Munich



Le contraste élevé des interférences obtenues pour un condensat prouve l'occupation macroscopique d'un seul état quantique

Description en terme d'une fonction d'onde macroscopique

Les condensats gazeux sont-ils superfluides ?

Force de friction sur un objet en mouvement

MIT



Observation de modes d'oscillation particuliers

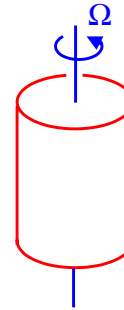
Mode ciseaux

Guéry-Odelin & Stringari
exp. à Oxford

Nucléation de vortex quantifiés

L'expérience du baquet tournant

L'expérience du baquet tournant



Pour un condensat $\psi(\vec{r}) = \sqrt{\rho(\vec{r})} e^{iS(\vec{r})}$

la vitesse $\vec{v} = \frac{\hbar}{m} \vec{\nabla} S$ est telle que $\oint \vec{v} \cdot d\vec{r} = \frac{nh}{m}$

Expériences avec l'hélium superfluide

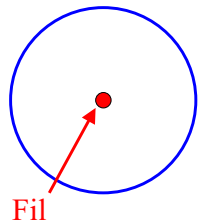
En dessous d'une fréquence de rotation Ω_c , aucun mouvement.

Au dessus de Ω_c , apparition de lignes singulières sur lesquelles la densité est nulle et autour desquelles la circulation de la vitesse est quantifiée.

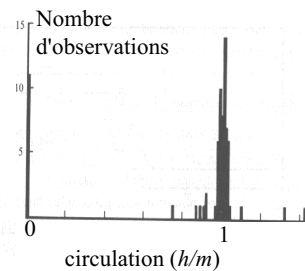
Feynman - Onsager

Expériences avec l'hélium liquide superfluide

Vinen (1961): *quantification de la circulation*



Si le fluide tourne, levée de dégénérescence des deux modes fondamentaux de vibration du fil



Packard-Williams (1982): *observation des vortex*

Electrons au cœur du vortex, puis accélérés vers un écran au phosphore



Comment faire tourner un condensat ?

La méthode quantique : impression directe de la phase $e^{i\theta}$

Boulder : un vortex dans un condensat à deux composantes

La méthode classique : appliquer une anisotropie tournante sur un piège symétrique

ENS, MIT, Boulder, Oxford

V. Bretin, F. Chevy, K. Madison, P. Rosenbuch, J. Dalibard

→ Y. Castin, G. Shlyapnikov & collaborateurs

Préparation d'un condensat avec vortex (I)

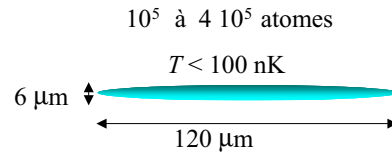
1. Préparation d'un condensat quasi-pur (20 secondes)

Refroidissement laser+évaporation de ^{87}Rb dans un piège magnétique

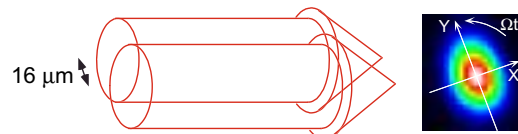
$$\frac{1}{2}m\omega_{\perp}^2(x^2 + y^2) + \frac{1}{2}m\omega_z^2z^2$$

$$\omega_{\perp} / 2\pi = 200 \text{ Hz}$$

$$\omega_z / 2\pi = 10 \text{ Hz}$$



2. Mise en rotation grâce à un faisceau laser (0.5 secondes)



$$\delta U(\vec{r}) = \frac{1}{2}m\omega_{\perp}^2(\epsilon_x X^2 + \epsilon_y Y^2)$$

contrôlé avec des modulateurs acousto-optiques

$$\epsilon_x=0.03, \epsilon_y=0.09$$

Préparation d'un condensat avec vortex (II)

3. Observation du condensat avec un vortex

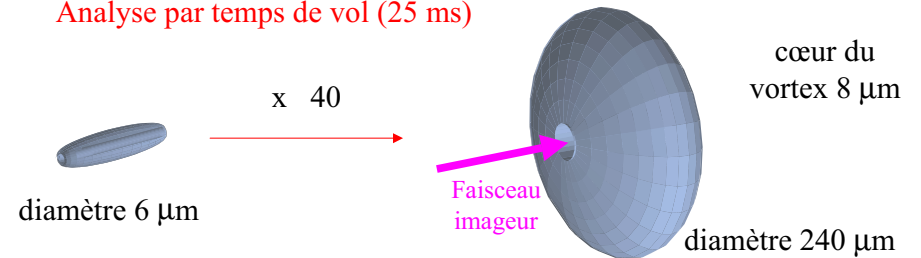
Un vortex n'est pas visible *in situ*

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{8\pi\rho a}} = 0.2 \mu\text{m}$$

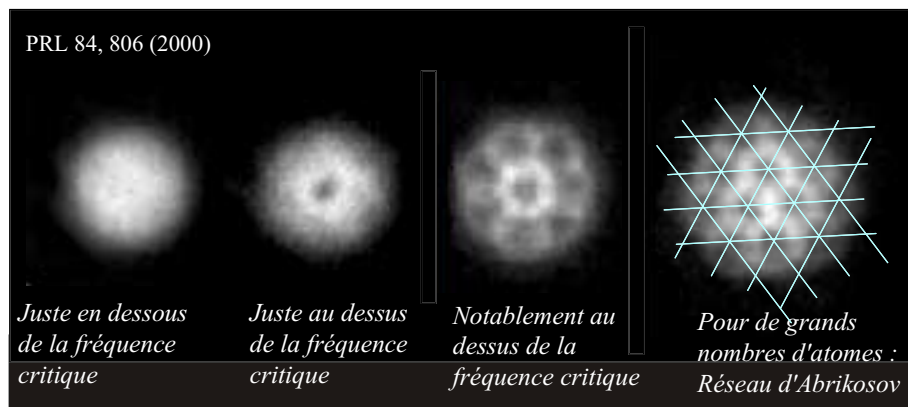
$$\rho = 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

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

Analyse par temps de vol (25 ms)



Images de vortex

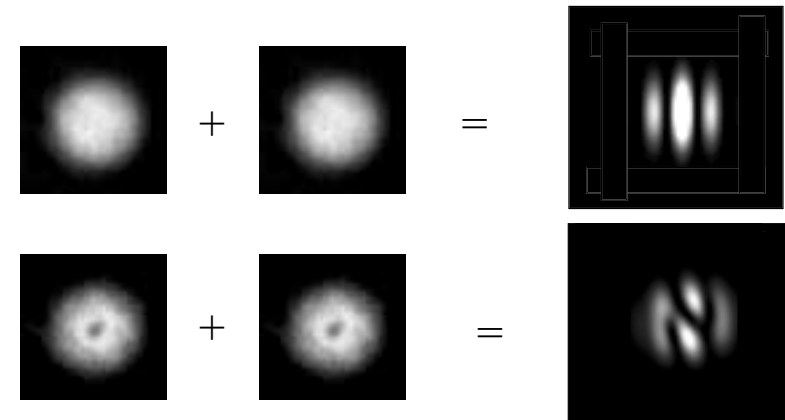


- Est-ce bien un vortex quantifié? phase $e^{i\theta}$, moment cinétique \hbar
- Quelle est la fréquence critique Ω_c ?
- Quelle est la limite du nombre de vortex dans le réseau ?

La phase d'un vortex

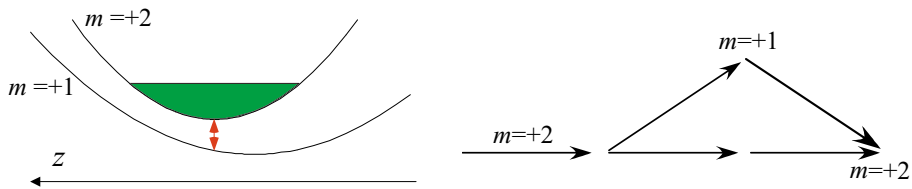
Boulder : observation de la phase relative entre les deux composantes

Pour un condensat à une composante, expérience d'interférence :

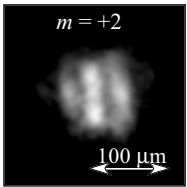


La phase d'un vortex (2)

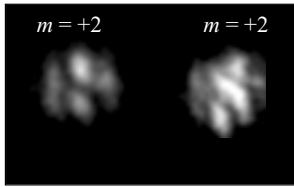
Utilisation du coupleur r.f.



Sans vortex:



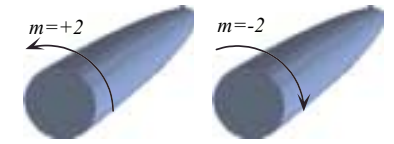
Avec un vortex:



Résultats similaires au MIT

Moment cinétique d'un condensat tournant

Cf. expérience de Vinen



En absence de vortex, les deux modes de surface $m = \pm 2$ sont dégénérés

oscillation quadrupolaire avec axes fixes



$$\dot{\theta} = 0$$

$$\omega_+ = \omega_- = \sqrt{2} \omega_{\perp}$$

En présence d'un vortex, la dégénérescence est levée:



Pendule de Foucault

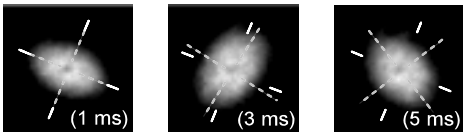
Stringari-Zambelli

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

et $\omega_+^2 + \omega_-^2 = 4\omega_{\perp}^2$

Moment cinétique d'un condensat en rotation

Avec un seul vortex:



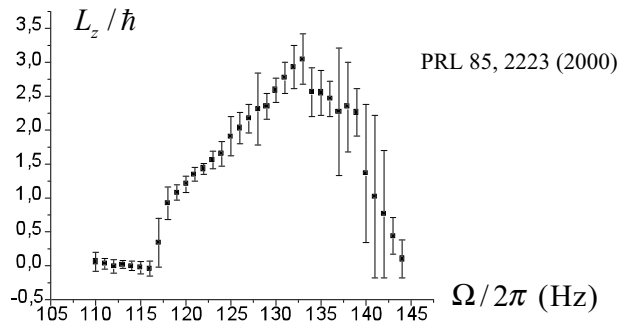
$$\dot{\theta} = 5.9^{\circ} / \text{ms}$$

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

$$\Rightarrow \langle L_z \rangle = 1.2 (\pm 0.1) \hbar$$

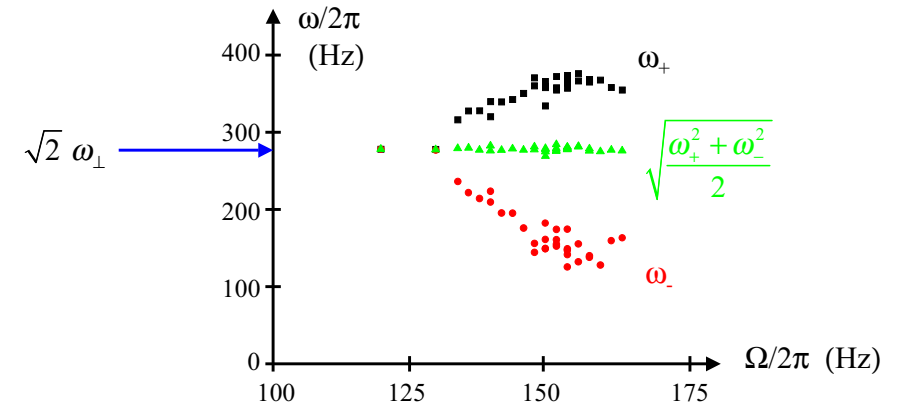
(cf. Boulder)

Plus généralement :



Test de l'approche "règle de somme"

A partir des données expérimentales, on déduit ω_+ et ω_- .



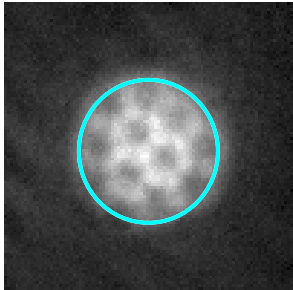
Pas de paramètre ajustable...

(aussi à Boulder)

Paramètres du réseau

Dans la limite des grands nombres quantiques, on s'attend à retrouver un comportement classique

→ Rotation d'un corps rigide



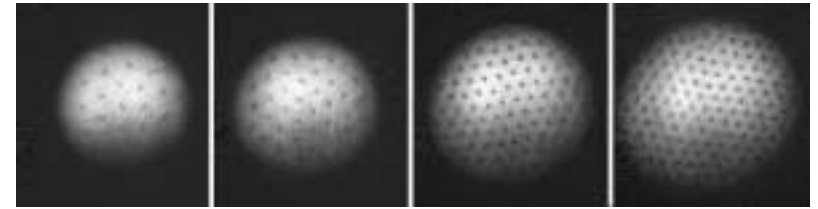
Dans un cercle de rayon 80 μm après expansion, i.e. 5 μm avant, on trouve 12 vortex pour $\Omega/2\pi = 77$ Hz.

$$2\pi v_{\text{quant}} r = 12 \frac{h}{m} \quad \longrightarrow \quad \frac{v_{\text{quant}}}{v_{\text{class}}} = \frac{12 \hbar}{m \Omega r^2} \approx 0.7$$

$$v_{\text{class}} = \Omega r$$

Le réseau de vortex du MIT

Condensat de sodium, 50 millions d'atomes



150 vortex

Décroissance de ce réseau de vortex : Fedichev, Shlyapnikov

Analogie avec une étoile à neutrons ("glitches" dans le signal pulsar)

La fréquence critique de nucléation

Ω_c est beaucoup plus grand que la prédiction thermodynamique :

$$\Omega_c^{\text{thermo}} = \frac{\hbar}{mR_{\perp}^2} \ln(R_{\perp}/\xi)$$

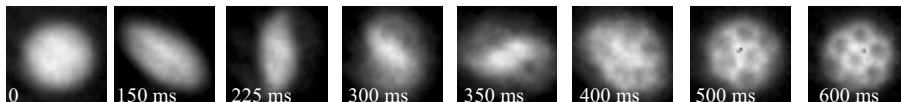
Avec une "cuillère laser" faible, on ne peut nucléer des vortex que dans une fenêtre étroite centrée sur $\Omega = \omega_{\perp} / \sqrt{2}$

La nucléation se produit *via* :

- la formation d'un état tournant elliptique, formé de manière résonnante si $2\Omega = \omega_{\text{quad}} = \sqrt{2}\omega_{\perp}$

PRL 86, 4443 (2001)

- une instabilité dynamique de cet état tournant



Recatti, Zambelli, Stringari

Castin, Sinha

Conclusions et questions ouvertes

Caractère universel de ces vortex en tant qu'excitations d'objets quantiques macroscopiques

Superfluides, supraconducteurs, étoiles à neutrons, noyaux en rotation.

Dans un condensat gazeux, leur nucléation semble bien comprise

Groupe du NIST, Svindzinski & Fetter, Garcia-Ripoll & Perez-Garcia, Machida *et al.*, Tsubota *et al.*, Castin & Sinha, Griffin *et al.*, Graham & Guillemas

Propriétés dynamiques du condensat en rotation

Cristallisation et décroissance du réseau de vortex
Oscillations du cœur du vortex ("Kelvons")

Shlyapnikov
Fedichev

Propriétés intéressantes du gaz dans la région $\Omega \approx \omega_{\perp}$

Petrov & Shlyapnikov, Ho, Mottelson, Zoller *et al.*