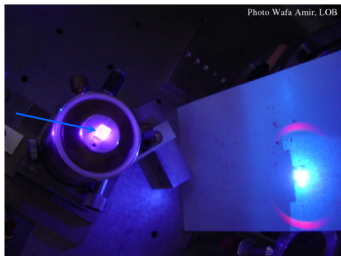


Observation de paires d'atomes corrélées au travers de la collision de deux condensats de Bose-Einstein

Aurélien Perrin

Soutenance de thèse de doctorat, 29 novembre 2007



Point de vue classique

- Interaction non-linéaire : $\chi^{(2)}\mathbf{E}^2$
- Accord de phase :

$$\omega_p = \omega_1 + \omega_2$$

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$$

Point de vue quantique

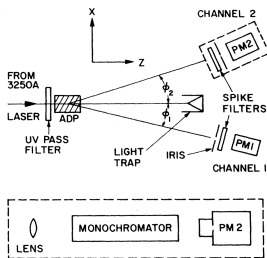
- Production de paires de photons corrélés.
- Tests fondamentaux de mécanique quantique.

Simultanéité dans la production de paires de photons

Production de paires de photons jumeaux

- Conversion paramétrique.
- Hamiltonien du système :

$$\hat{H} = \chi^{(2)} \hat{b} \hat{a}_1^\dagger \hat{a}_2^\dagger + \text{c.c.}$$



Mesure des coïncidences de détection

- Augmentation du taux de coïncidences.
- Quasi-simultanéité de la production des paires.
- Détecteur de photons uniques.

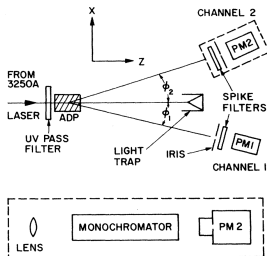
D.C. Burnham and D.L. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **25**, 84 (1970)

Simultanéité dans la production de paires de photons

Production de paires de photons jumeaux

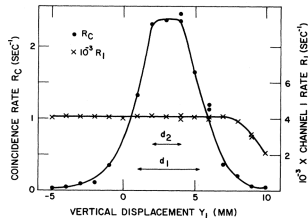
- Conversion paramétrique.
- Hamiltonien du système :

$$\hat{H} = \chi^{(2)} \hat{b} \hat{a}_1^\dagger \hat{a}_2^\dagger + \text{c.c.}$$



Mesure des coïncidences de détection

- Augmentation du taux de coïncidences.
- Quasi-simultanéité de la production des paires.
- **Détecteur de photons uniques.**



D.C. Burnham and D.L. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **25**, 84 (1970)



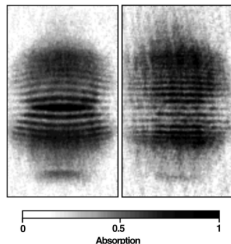
L. De Broglie

- Dualité onde - corpuscule :

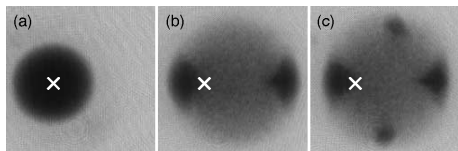
$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$$

- Lumière et matière peuvent être décrites de façon analogue dans le cadre de la mécanique quantique.

- Condensats de Bose-Einstein : source atomique cohérente.
- Interférométrie atomique, laser à atomes...
- Optique atomique non-linéaire ?



Andrews *et al.*, Science **275**, 637 (1997)



MIT (et NIST)

Point de vue “classique”

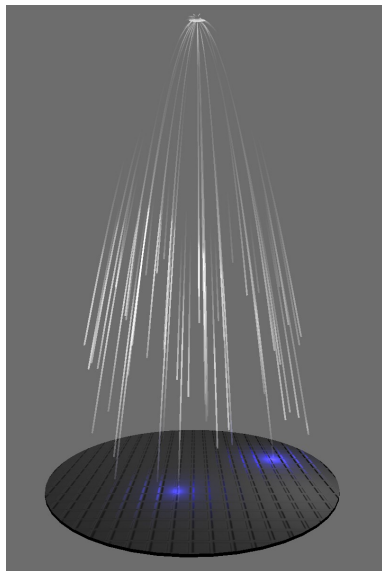
- Mélange à 4 ondes de matière ($\chi^{(3)}$).
- **Phénomène non linéaire** → interactions interatomiques.

Point de vue quantique

- Interaction : collisions élastiques entre deux atomes.
- **Production de paires d'atomes corrélés.**
- **Decteur d'atomes uniques ?**

J. M. Vogels *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89**, 020401 (2002)

Hélium métastable - un bon candidat



Détecteur d'atomes uniques

- Grande énergie interne (20 eV).
- Galette de microcanaux (MCP).
→ Détecteur bas bruit.

Ambition

- Mise en place d'une source de paires d'atomes corrélés.
- Démonstration de l'existence des paires.
- Caractérisation de la source.

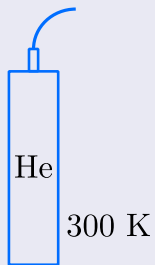
Plan de l'exposé

- 1 Production de paires d'atomes
- 2 Mise en évidence des corrélations
- 3 Simulations stochastiques de la collision de deux condensats
- 4 Conclusion et perspectives

- 1 Production de paires d'atomes
- 2 Mise en évidence des corrélations
- 3 Simulations stochastiques de la collision de deux condensats
- 4 Conclusion et perspectives

Préparation d'un condensat d' He^*

Différentes étapes de refroidissement pour amener le gaz d'hélium métastable au **seuil de condensation**.

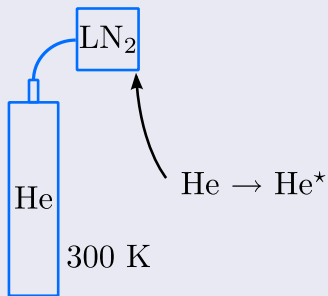


Préparation d'un condensat d'He*

Excitation des atomes d'hélium : état métastable (Durée de vie ~ 9000 s).

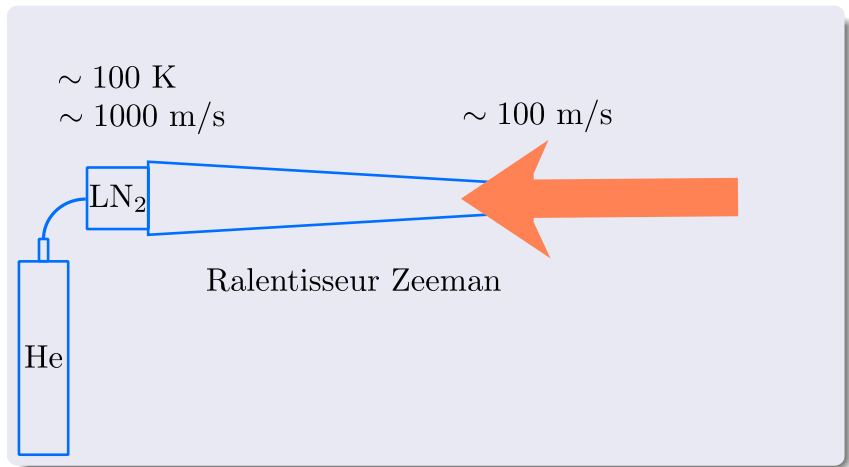
~ 100 K

~ 1000 m/s



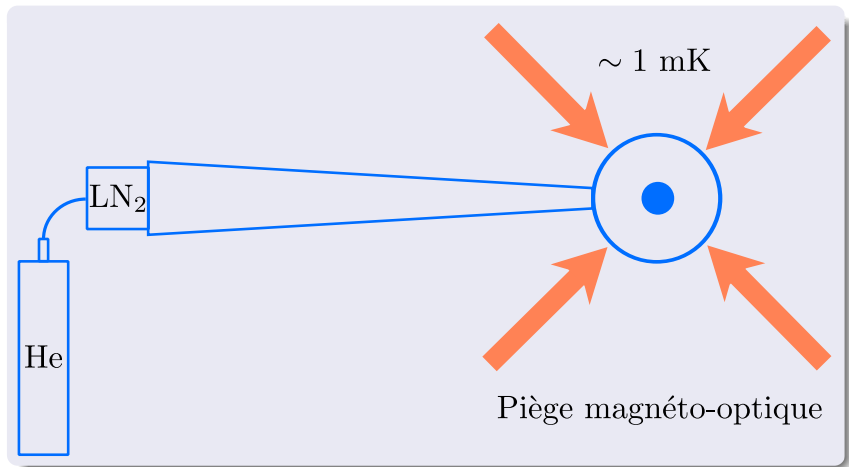
Préparation d'un condensat d'He*

Refroidissement longitudinal : diode laser (transition fermée @1083 nm).



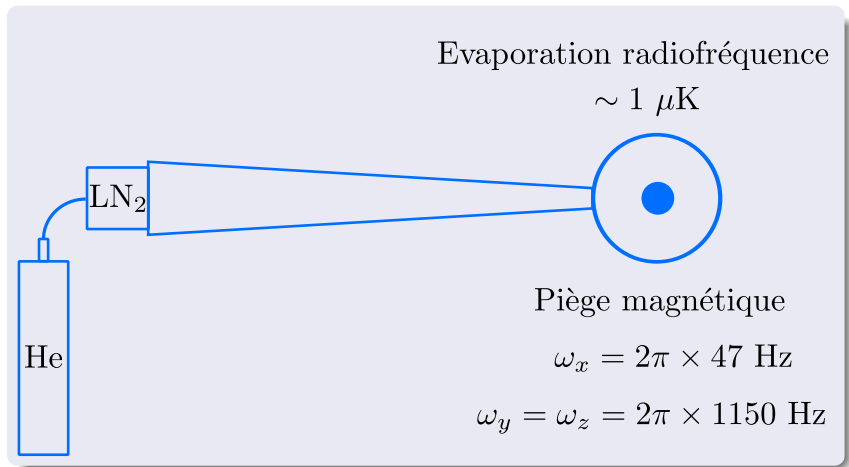
Préparation d'un condensat d'He*

Piège : $\sim 10^8$ atomes.



Préparation d'un condensat d'He*

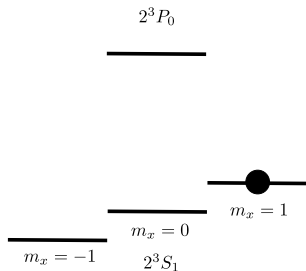
Condensat de Bose-Einstein pur en 45 s : $10^4 - 10^5$ atomes.



Extraction du condensat par transfert Raman

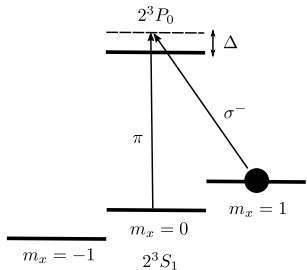
Transfert Raman

Les atomes sont initialement piégés dans le sous niveau Zeeman $m_x = 1$.



Extraction du condensat par transfert Raman

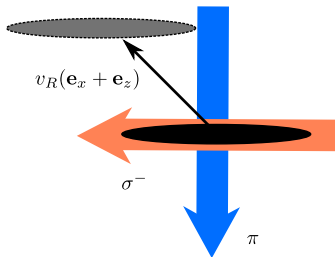
Transfert Raman



- Désaccord : $\Delta = 400$ MHz.
- Impulsions lumineuses d'environ 500 ns.
- Plus de 80% d'efficacité de transfert.

Transfert d'impulsion

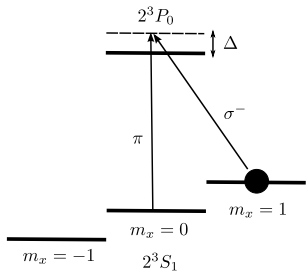
$$v_R = \hbar k_R / m = 9.2 \text{ cm/s.}$$



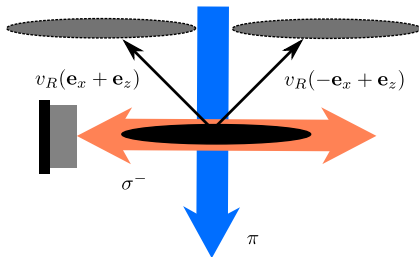
Collision de deux condensats

Transfert Raman

Le condensat est séparé en deux parties d'impulsions différentes



Rétro réflexion du faisceau polarisé σ^-





Collisions élastiques

- $v_R > \sqrt{\mu/m} \rightarrow$ particules libres.
- Longueur de diffusion : $a_{00} = 5.3$ nm.
- Nombre atomes diffusés $\propto n^2$.
- Conservation énergie-impulsion \rightarrow sphère.
- Basse énergie : onde s.

Deux échelles de temps

- Séparation spatiale des condensats : ~ 1 ms.
- Expansion spatiale due aux interactions : ~ 150 μ s.



Collisions élastiques

- $v_R > \sqrt{\mu/m} \rightarrow$ particules libres.
- Longueur de diffusion : $a_{00} = 5.3$ nm.
- Nombre atomes diffusés $\propto n^2$.
- Conservation énergie-impulsion \rightarrow sphère.
- Basse énergie : onde s.

Deux échelles de temps

- Séparation spatiale des condensats : ~ 1 ms.
- Expansion spatiale due aux interactions : ~ 150 μ s.

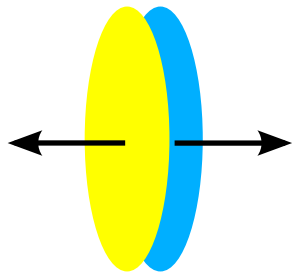


Collisions élastiques

- $v_R > \sqrt{\mu/m} \rightarrow$ particules libres.
- Longueur de diffusion : $a_{00} = 5.3$ nm.
- Nombre atomes diffusés $\propto n^2$.
- Conservation énergie-impulsion \rightarrow sphère.
- Basse énergie : onde s.

Deux échelles de temps

- Séparation spatiale des condensats : ~ 1 ms.
- Expansion spatiale due aux interactions : ~ 150 μ s.

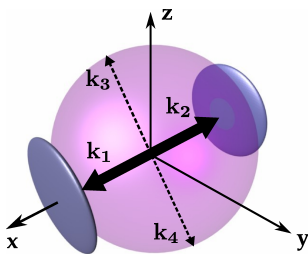


Collisions élastiques

- $v_R > \sqrt{\mu/m} \rightarrow$ particules libres.
- Longueur de diffusion : $a_{00} = 5.3$ nm.
- Nombre atomes diffusés $\propto n^2$.
- Conservation énergie-impulsion \rightarrow sphère.
- Basse énergie : onde s.

Deux échelles de temps

- Séparation spatiale des condensats : ~ 1 ms.
- Expansion spatiale due aux interactions : ~ 150 μ s.



Collisions élastiques

- $v_R > \sqrt{\mu/m} \rightarrow$ particules libres.
- Longueur de diffusion : $a_{00} = 5.3$ nm.
- Nombre atomes diffusés $\propto n^2$.
- Conservation énergie-impulsion \rightarrow sphère.
- Basse énergie : onde s.

Deux échelles de temps

- Séparation spatiale des condensats : ~ 1 ms.
- Expansion spatiale due aux interactions : ~ 150 μ s.

Détecteur d'atomes uniques

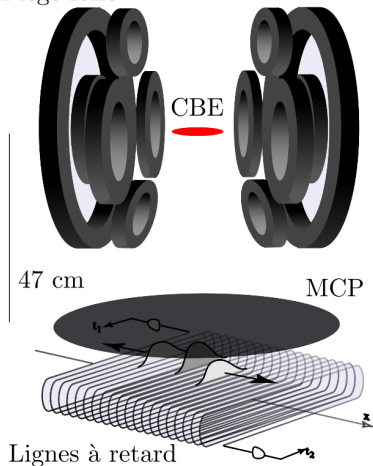
Hélium métastable : He^*

- Temps de vol : **320 ms**.
- Etat métastable \rightarrow **Energie interne de 20 eV**.
- Capable d'extraire un électron d'une surface.

MCP

- \varnothing **8 cm**.
- 1 He^* donne **10^7** electrons en ~ 1 ns.
- Efficacité de détection : \sim **10 %**.

Piège Ioffe

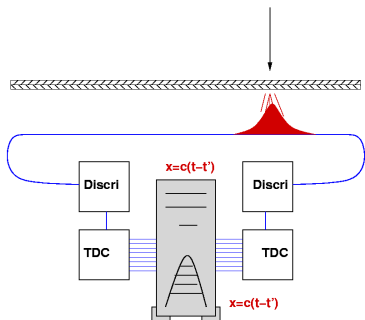


Un détecteur résolu en temps et en position

Temps d'arrivée des atomes sur la galette

- TDC : $\Delta t = 400$ ps.
- Flux ~ 400 kat/s.

Position des atomes sur le détecteur



Lignes à retard

- $x \rightarrow n\Delta t$, n entier.
- Taille d'un pixel spatial = $200 \mu\text{m}$ ($\sim 10^5$ pixels)
- Résolution: $300 \mu\text{m}$ et 1 ns RMS

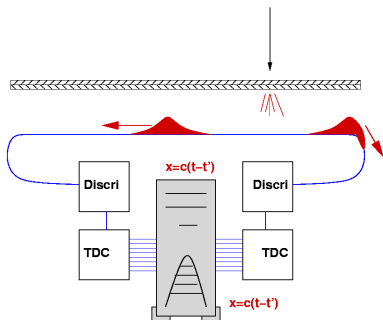
Long temps de vol : $(x, y, t) \longleftrightarrow (v_x, v_y, v_z)$

Un détecteur résolu en temps et en position

Temps d'arrivée des atomes sur la galette

- TDC : $\Delta t = 400$ ps.
- Flux ~ 400 kat/s.

Position des atomes sur le détecteur

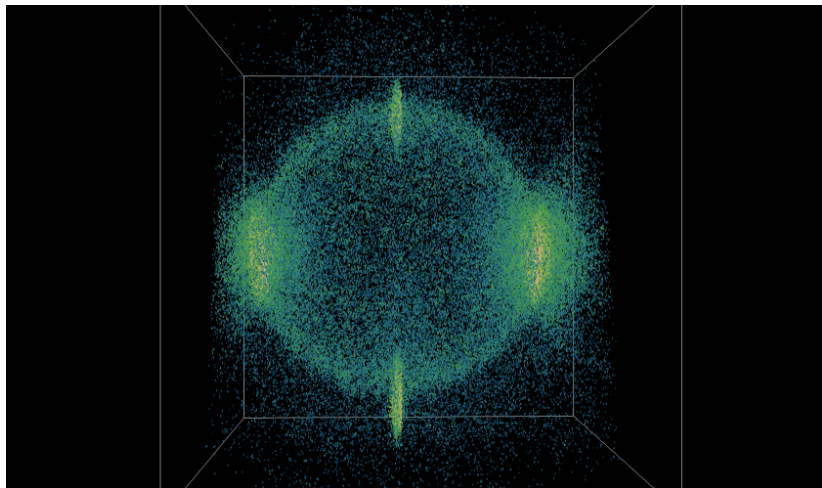


Lignes à retard

- $x \rightarrow n\Delta t$, n entier.
- Taille d'un pixel spatial = $200 \mu\text{m}$ ($\sim 10^5$ pixels)
- Résolution: $300 \mu\text{m}$ et 1 ns RMS

Long temps de vol : $(x, y, t) \longleftrightarrow (v_x, v_y, v_z)$

Résultats expérimentaux



- 1 Production de paires d'atomes
- 2 Mise en évidence des corrélations**
- 3 Simulations stochastiques de la collision de deux condensats
- 4 Conclusion et perspectives

Mesure de la fonction $g^{(2)}$

Comment mettre en évidence les paires produites par collision ?

$$G^{(2)}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = \langle n(\mathbf{v}_1) n(\mathbf{v}_2) \rangle$$

$G^{(2)}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) \implies$ Probabilité de détecter conjointement un atome de vitesse \mathbf{v}_1 et un atome de vitesse \mathbf{v}_2 .

- Phénomène aléatoire : $G^{(2)}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = \langle n(\mathbf{v}_1) \rangle \langle n(\mathbf{v}_2) \rangle$.
- Mise en évidence des corrélations :

$$g^{(2)}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = \frac{G^{(2)}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)}{\langle n(\mathbf{v}_1) \rangle \langle n(\mathbf{v}_2) \rangle} \neq 1$$

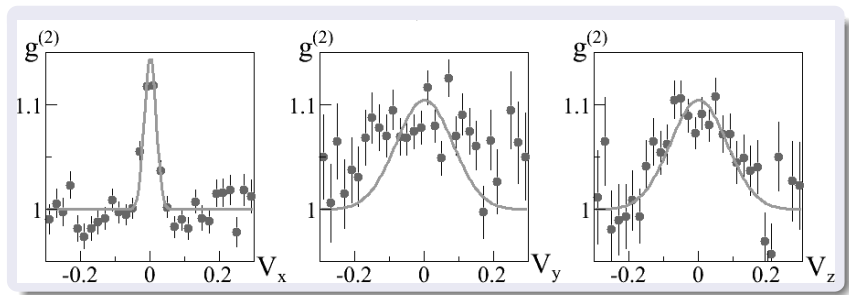
Dans le halo de collision, on s'attend à ce que $g^{(2)}(\mathbf{v}, -\mathbf{v}) > 1$.

Paires d'atomes corrélés

Mesure expérimentale

- Faible nombre de paires détecté \rightarrow moyennage.

- Mesure de $g^{(2)}(\mathbf{V}) = \frac{\int_{\mathcal{S}} d^3\mathbf{v} G^{(2)}(\mathbf{v}, -\mathbf{v} + \mathbf{V})}{\int_{\mathcal{S}} d^3\mathbf{v} n(\mathbf{v})n(-\mathbf{v} + \mathbf{V})}$



Interprétation qualitative

- Existence de paires d'atomes corrélés.
- Anisotropie de la corrélation \leftrightarrow Anisotropie du condensat.

Interprétation de la largeur des corrélations

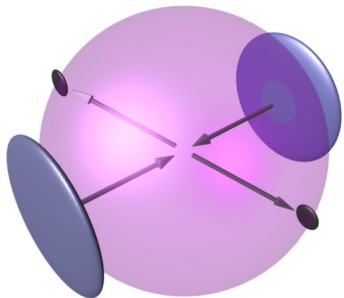


Image physique

- $\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_3 + \mathbf{v}_4$
- Incertitude sur \mathbf{v}_i :

$$\mathbf{v}_3 + \mathbf{v}_4 = \delta\mathbf{v} \neq \mathbf{0}$$

- Heisenberg : $m\Delta v \sim \frac{\hbar}{\Delta x}$

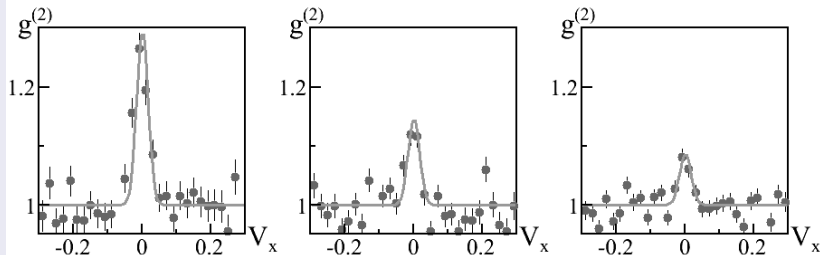
Résultats des ajustements

- Axe long $\sim 0.09 v_R$: bon ordre de grandeur.
- Axe court $\sim 0.004 v_R$: **limité par la résolution ($0.014 v_R$)**.

Hauteur corrélations

Dépendance de la hauteur des corrélations avec N_{sc}

- $g^{(2)}(\mathbf{V} = \mathbf{0}) = \frac{\text{fortuite} + \text{vraie}}{\text{fortuite}} = 1 + \eta$.
- $\eta = \frac{\text{vraie}}{\text{fortuite}} \propto \frac{N_{sc}}{N_{sc}^2}$.



$N_{sc} = 50$

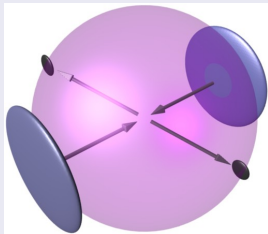
$N_{sc} = 125$

$N_{sc} = 190$

Régime spontané ?

Mesure expérimentale

- Diffusion des paires \longrightarrow **Processus aléatoire.**
- Interférences quantiques : **Effet Hanbury Brown Twiss.**
- Bosons \longleftrightarrow groupement.

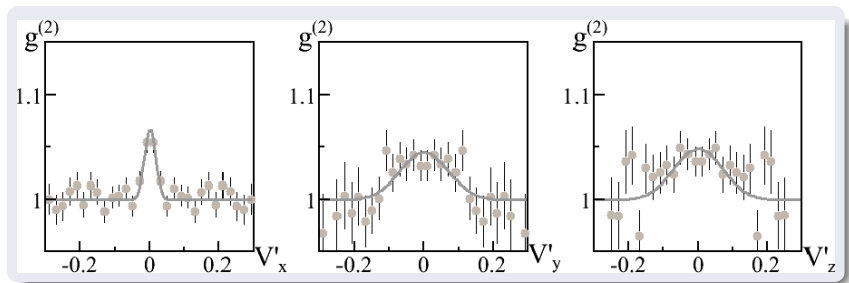


Mesure du volume de cohérence de la source.

- Largeurs de corrélation \leftrightarrow taille initiale de la source.
- **Effet ondulatoire** \rightarrow dualité onde-corpuscule.

Mesure expérimentale

- Diffusion des paires \rightarrow **Processus aléatoire.**
- Interférences quantiques : **Effet Hanbury Brown Twiss.**
- Bosons \longleftrightarrow groupement.



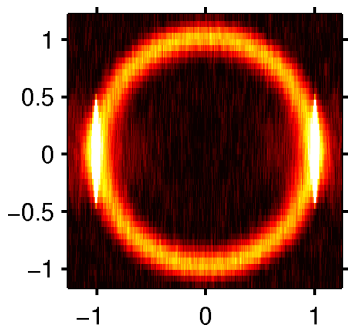
Mesure du volume de cohérence de la source.

- Largeurs de corrélation \leftrightarrow taille initiale de la source.
- **Effet ondulatoire \rightarrow dualité onde-corpuscule.**

- 1 Production de paires d'atomes
- 2 Mise en évidence des corrélations
- 3 Simulations stochastiques de la collision de deux condensats**
- 4 Conclusion et perspectives

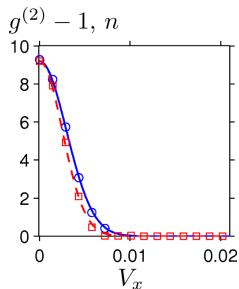
Principe général

- Collisions de deux CBE : **grand nombre de modes.**
- Calcul numérique quasi-impossible.
- Méthodes stochastiques → **temps de calcul raisonnable.**
- Séjour Univ. of Queensland (K. Kheruntsyan, P. Drummond).



- **Prise en compte de tous les effets quantiques...**
- Résultats obtenus comparables aux résultats expérimentaux.
- **Limitation de la durée de la collision : $t_{\text{sim}} = 25\mu\text{s}$.**

Comparaison avec les résultats expérimentaux



Corrélations

- Largeurs corrélation \sim Largeurs condensat.
- anisotropie (axe court - axe long).
- Hauteur compatible avec le petit modèle corpusculaire.

- Interprétation encore valable pour différentes valeurs des paramètres de la collision.
- Expérience \rightarrow régime spontané confirmé.

- 1 Production de paires d'atomes
- 2 Mise en évidence des corrélations
- 3 Simulations stochastiques de la collision de deux condensats
- 4 Conclusion et perspectives

Conclusion

Une source de paires d'atomes corrélés.

- Corrélation opposée : caractère **corpusculaire**.
- Corrélation locale : caractère **ondulatoire**.
- → **dualité onde corpuscule**.
- \longleftrightarrow Dissociation de molécules.

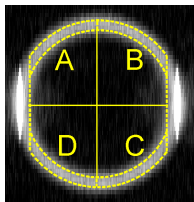
Système de détection capable de caractériser la source.

- Equivalent atomique des photodétecteurs.
- Compatibilité largeurs des corrélations locales et opposées.
- Régime spontané.

Outil pour étudier corrélations plus complexes

- Inégalités de Bell.
- Réduction des fluctuations : $N_{\mathbf{v}} = N_{-\mathbf{v}}$.

Mesure de la réduction de fluctuations



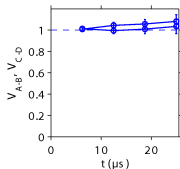
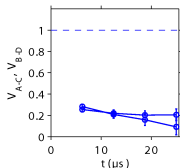
- Réduction des fluctuations du nombre d'occupation de deux modes opposés.
- Découpage de la sphère.

- Qualité de la réduction des fluctuations :

$$V_{A-C} = V_{B-D} \sim 0.2$$

- Limitation expérimentale \rightarrow efficacité de détection $\epsilon \sim 10\%$:

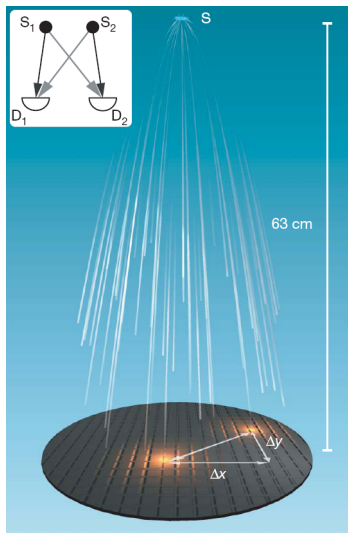
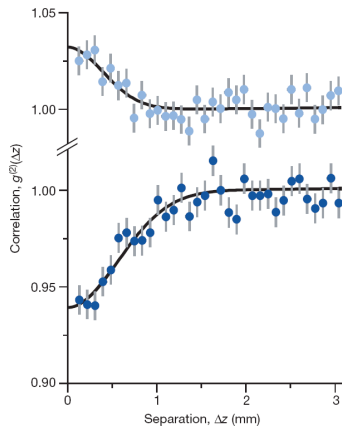
$$V_{\text{exp}} = \sqrt{1 - \epsilon} \sim 0.95$$



Remerciements

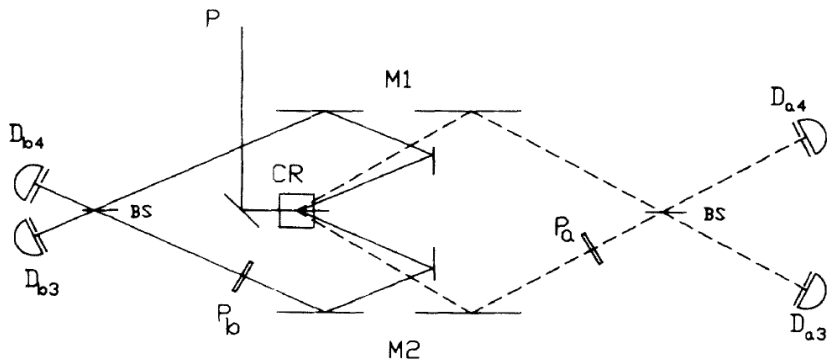


Hanbury Brown et Twiss



T. Jelte & al, *Nature* **445**, 402 (2007)

Violation inégalités de Bell



J.G. Rarity and P.R. Tapster, *PRL* **64**, 2495 (1990)