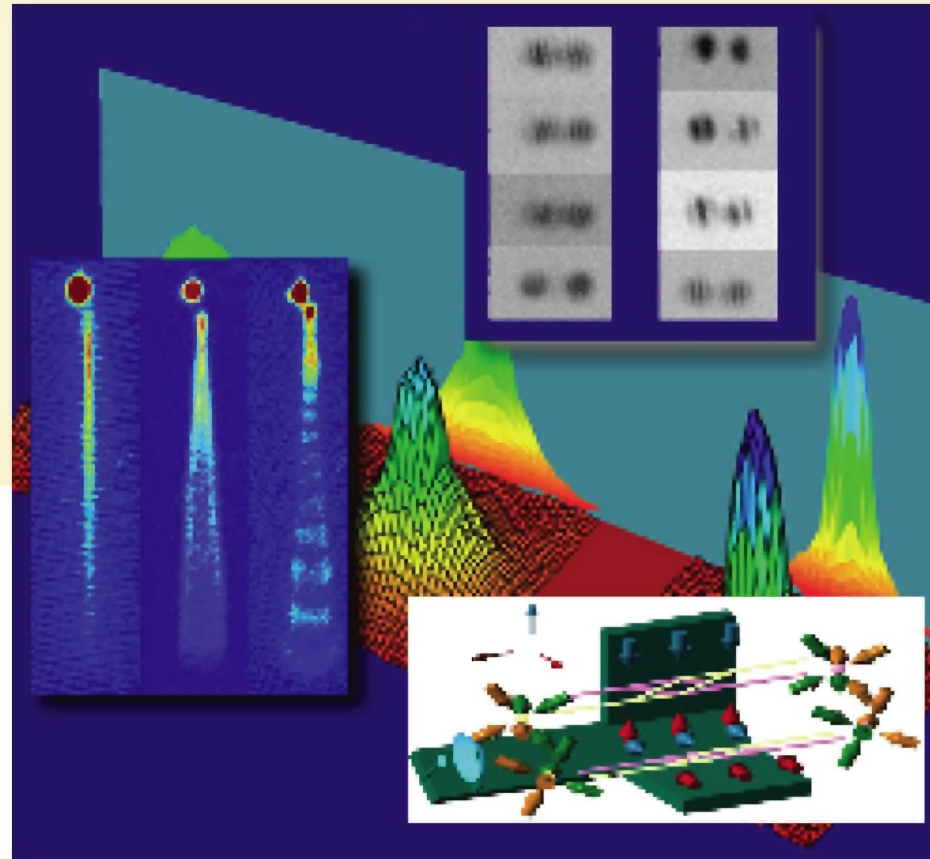
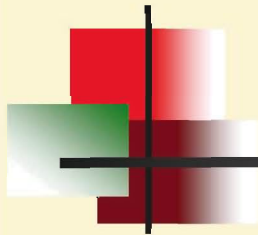
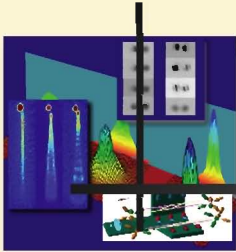


P. BOUYER

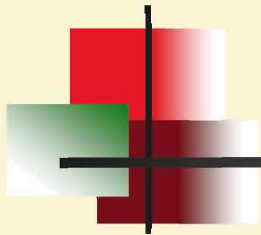
**SENSEURS INERTIELS ATOMIQUES :
DES SOURCES ATOMIQUES CLASSIQUES
AUX LASERS À ATOMES**





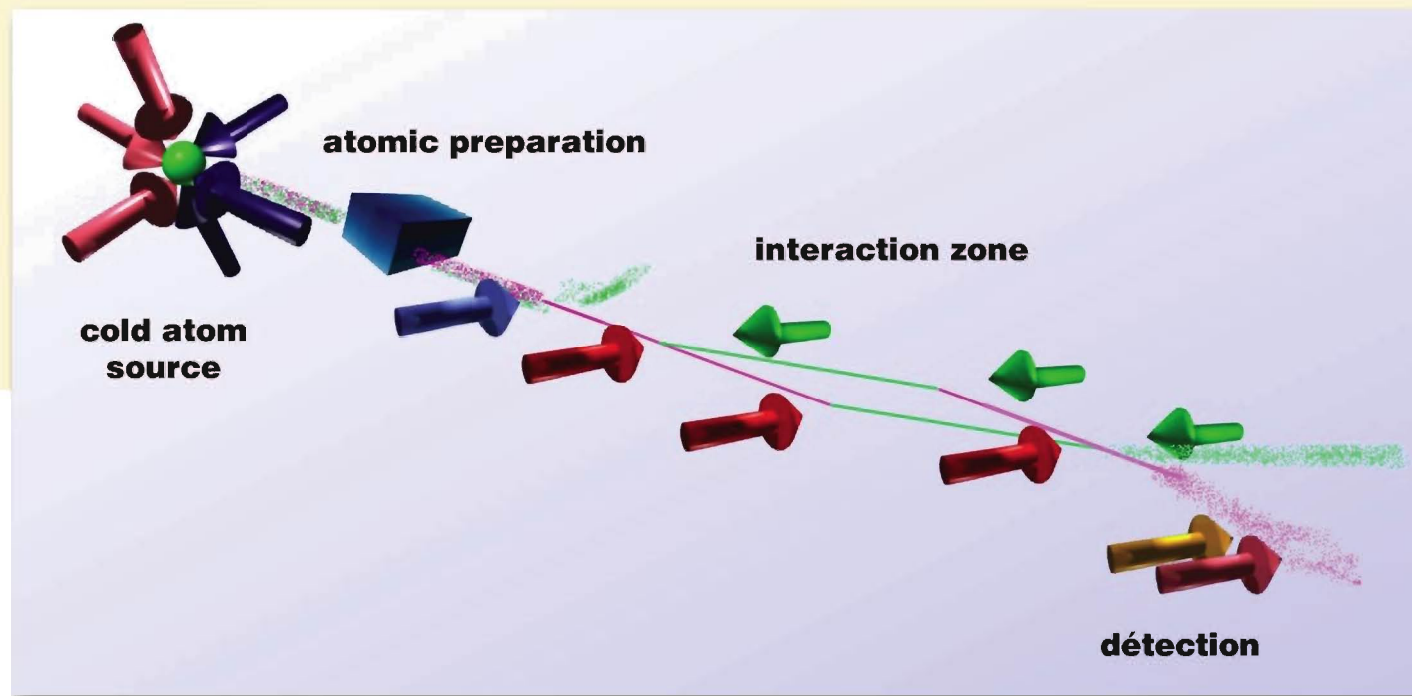
Curriculum Vitae

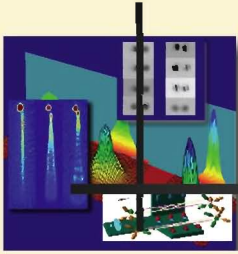
- Ingénieur diplômé de l'École Supérieure d'Optique (IOTA)
- Thèse de l'Université Paris XI au laboratoire Kastler Brossel
 - ⇒ **Directeur : C. Salomon**
 - ⇒ Refroidissement et piégeage radiatif
 - ⇒ TROOP, Cavité Atomique et Forces Dipolaires Rectifiées
- Séjour post-doctoral à Stanford
 - ⇒ **Directeur : M. Kasevich**
 - ⇒ Interférométrie atomique à l'aide de transitions Raman stimulées
 - ⇒ Gyromètre et Gradiomètre à atomes
- Groupe d'optique Atomique (LCFIO)
 - ⇒ **Directeur : A. Aspect**
 - ⇒ Condensation de Bose-Einstein et Lasers à Atomes
 - ⇒ Interférométrie Atomique
 - ⇒ Biophotonique



- 1. LES SENSEURS INERTIELS ATOMIQUES**
- 2. UNE SOURCE ATOMIQUE COHÉRENTE :
LE LASER À ATOMES**
- 3. LE FUTUR**

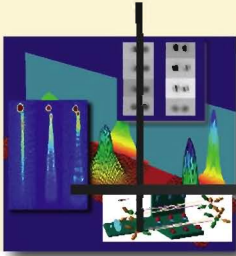
LES SENSEURS INERTIELS ATOMIQUES



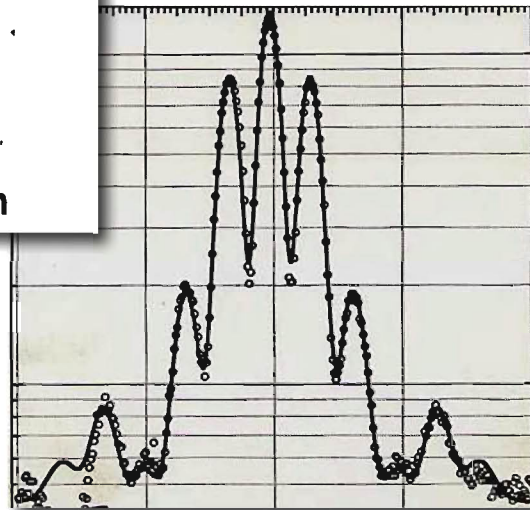
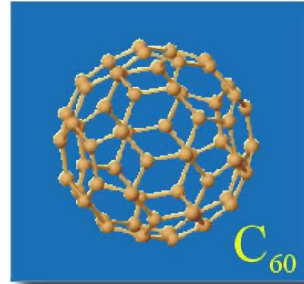
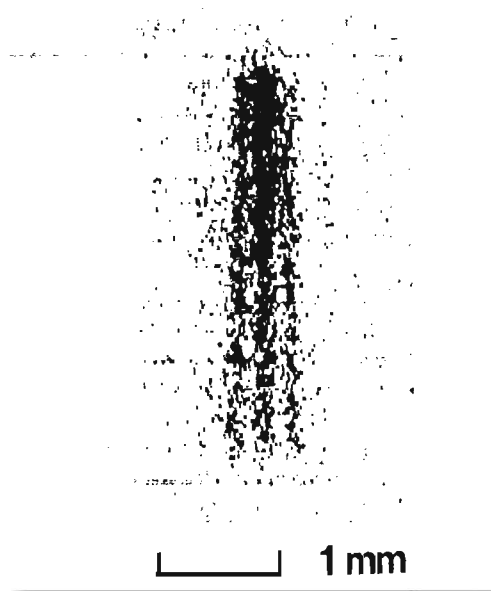


Les Senseurs Inertiels Atomiques

- **LES INTERFÉROMÈTRE ATOMIQUES**
- **COMPRENDRE LA SENSIBILITÉ INERTIELLE**
- **LE GRADIOMÈTRE ATOMIQUE**
- **LE GYROMÈTRE À JET THERMIQUE**
- **LE GOM : BASE INERTIELLE À ATOMES FROIDS**



Interférométrie Atomique



□ ~1990 : premières démonstrations d'interféromètre

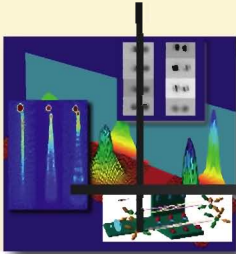
- ⇒ Franges d'Young
- ⇒ Interféromètres à masque
- ⇒ Interféromètres à réseau lumineux
- ⇒ Interféromètre à impulsion lumineuses

□ Mise en évidence de la dualité onde/corpuscule

- ⇒ Mesures de l'effet de décohérence
- ⇒ Franges pour des "grosses" molécules
 - ⇒ Zeilinger

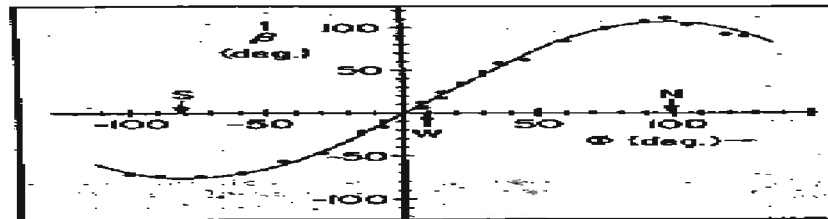
□ Mesures précises

- ⇒ Mesure de l'effet d'indice
 - ⇒ Pritchard, Vigué

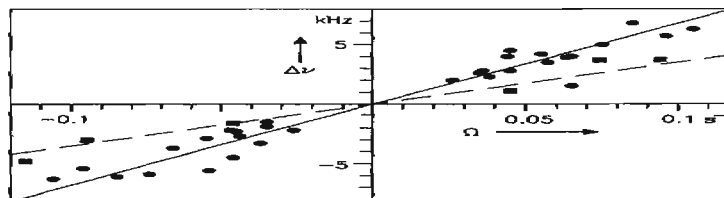


Senseurs Inertiels Atomiques

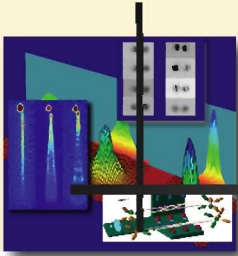
- Interféromètre atomiques = Senseurs inertiels de haute sensibilité
 - ⇒ *Clouser - Bordé 1988*
- Accéléromètre
 - ⇒ *Kasevich & Chu 1991*
- Effet Sagnac pour les ondes de matière
 - ⇒ Neutrons : *Werner et al. 1979 (earth rotation)*



- ⇒ Atomes : *Ramsey-Bordé : Riehle & al. 1991*



- ⇒ *Interferomètres : Pritchard 1996, Zeilinger 1996 ...*

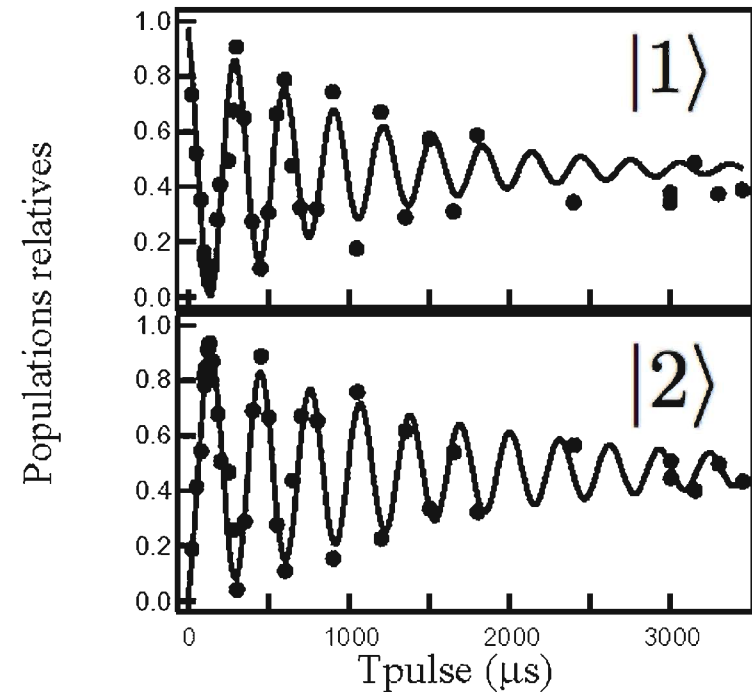
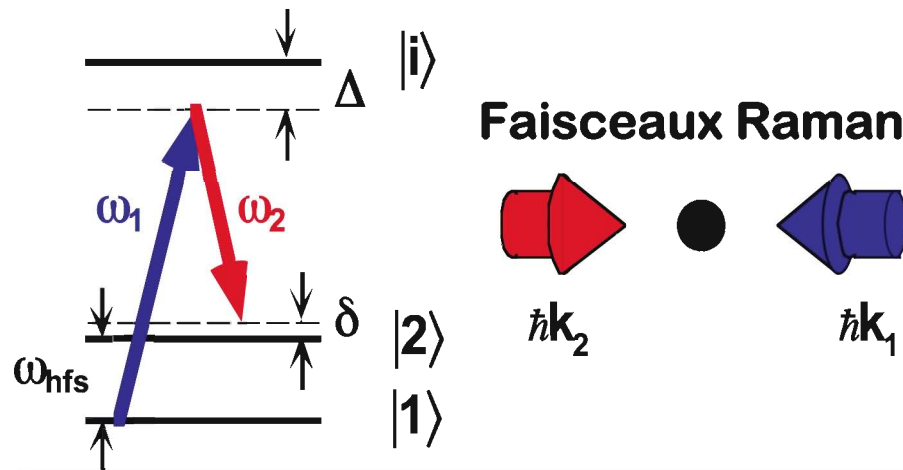


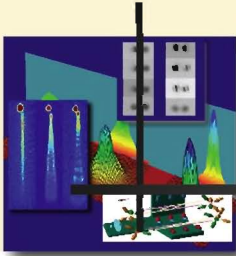
Interféromètre Atomique

□ On utilise de la lumière qui induit une transition atomique oscillante

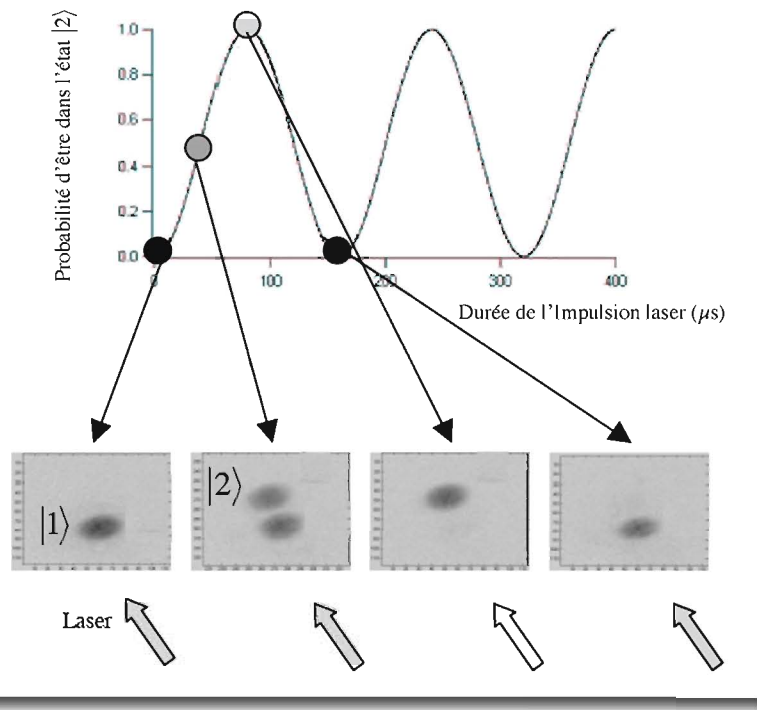
⇒ *Atomes avec 2 états différents et différente énergie*

⇒ *Laser(s) accordé sur la différence d'énergie*





Interféromètre Atomique



□ Si on éclaire les atomes

⇒ *Oscillation (de Rabi) de l'état atomique entre $|1\rangle$ et $|2\rangle$*

⇒ *La fréquence dépend de l'intensité laser*

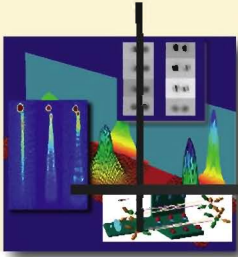
□ Si on contrôle la durée d'éclairement

⇒ *On arrête l'oscillation dans un certain état atomique*

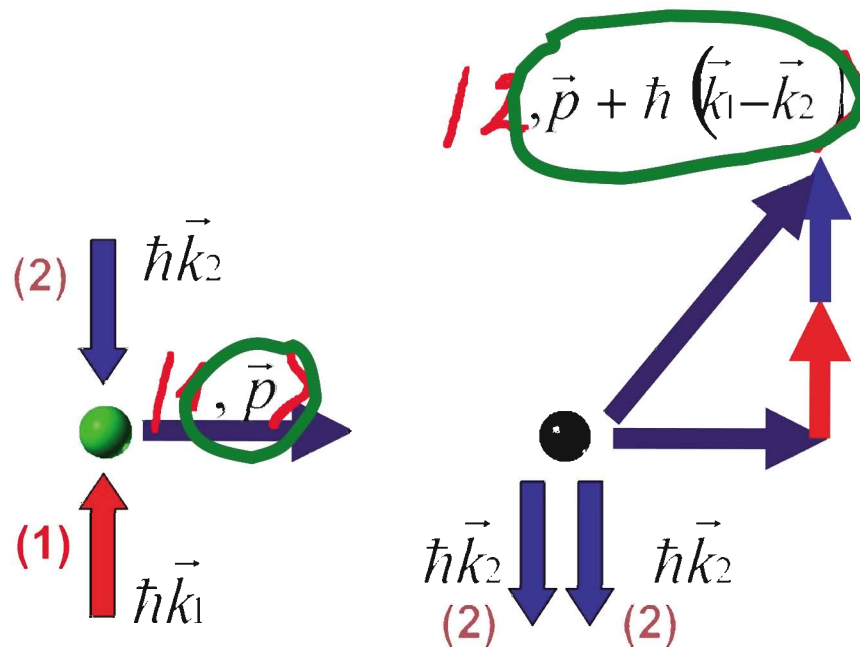
$$c_1 |1\rangle + c_2 |2\rangle$$

⇒ *1/4 d'oscillation : lame séparatrice ($\pi/2$)*

⇒ *1/2 oscillation : miroir (π)*



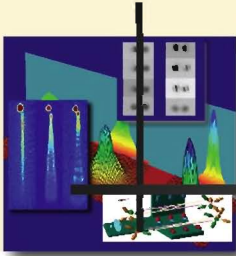
Interféromètre Atomique



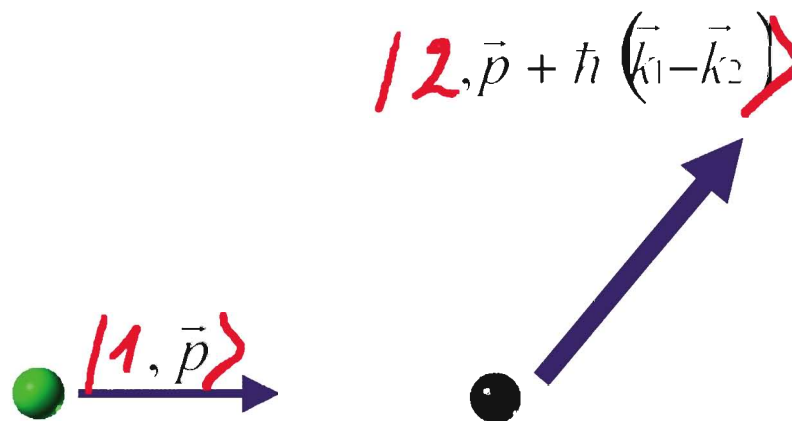
□ Le transfert d'énergie s'accompagne d'un transfert d'impulsion

⇒ Equivalent d'un cube séparateur de polarisation

⇒ Les deux parties de la fonction d'onde vont suivre des trajectoires différentes



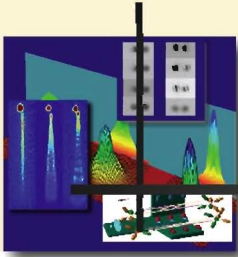
Interféromètre Atomique



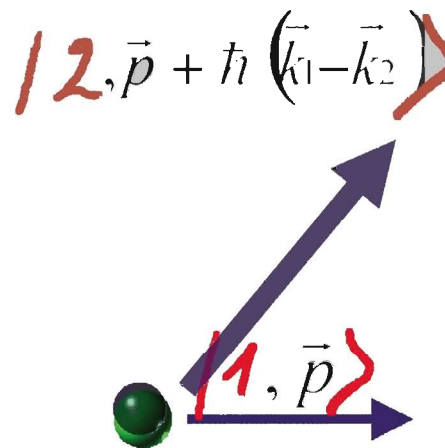
□ Le transfert d'énergie s'accompagne d'un transfert d'impulsion

⇒ Equivalent d'un cube séparateur de polarisation

⇒ Les deux parties de la fonction d'onde vont suivre des trajectoires différentes



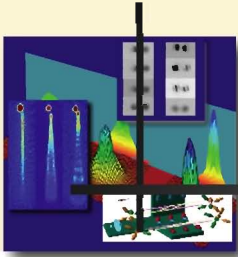
Interféromètre Atomique



□ Le transfert d'énergie s'accompagne d'un transfert d'impulsion

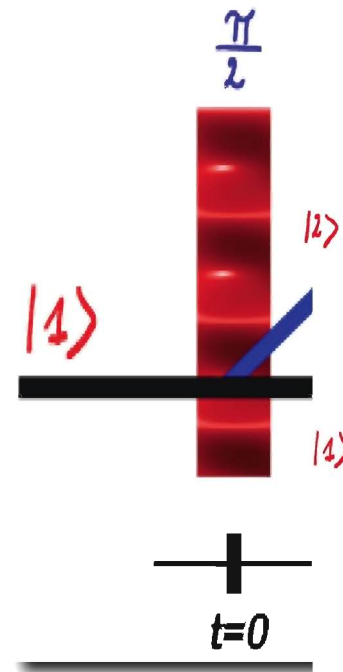
⇒ **Equivalent d'un cube séparateur de polarisation**

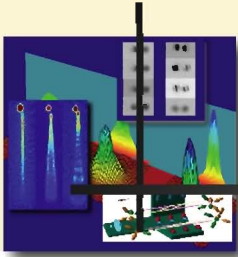
⇒ Les deux parties de la fonction d'onde vont suivre des trajectoires différentes



Interféromètre Atomique

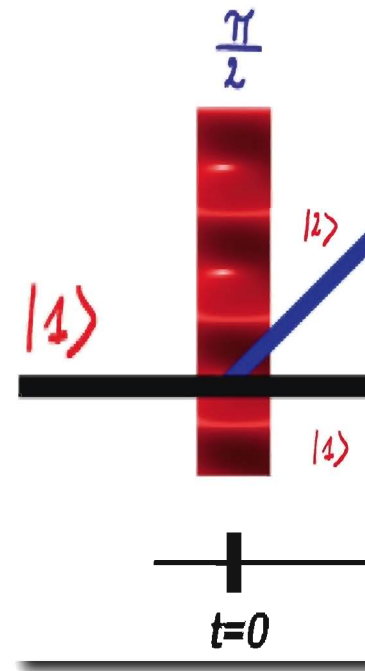
- La première impulsion $\pi/2$ est une **lame séparatrice**
 - ⇒ Superposition cohérente des deux états

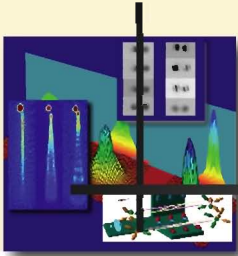




Interféromètre Atomique

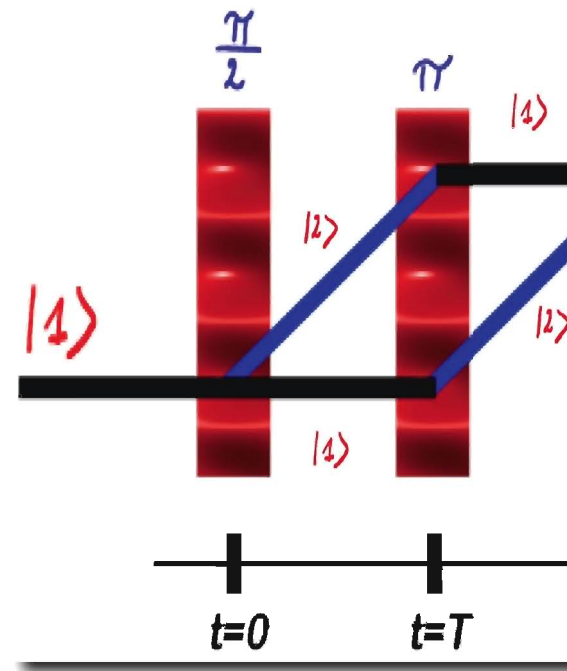
- La première impulsion $\pi/2$ est une **lame séparatrice**
 - ⇒ Superposition cohérente des deux états
 - ⇒ Vitesse différente
 - ⇒ Les deux "composantes" se séparent

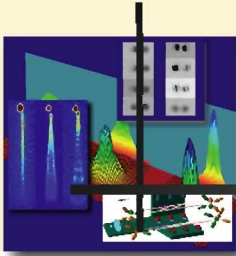




Interféromètre Atomique

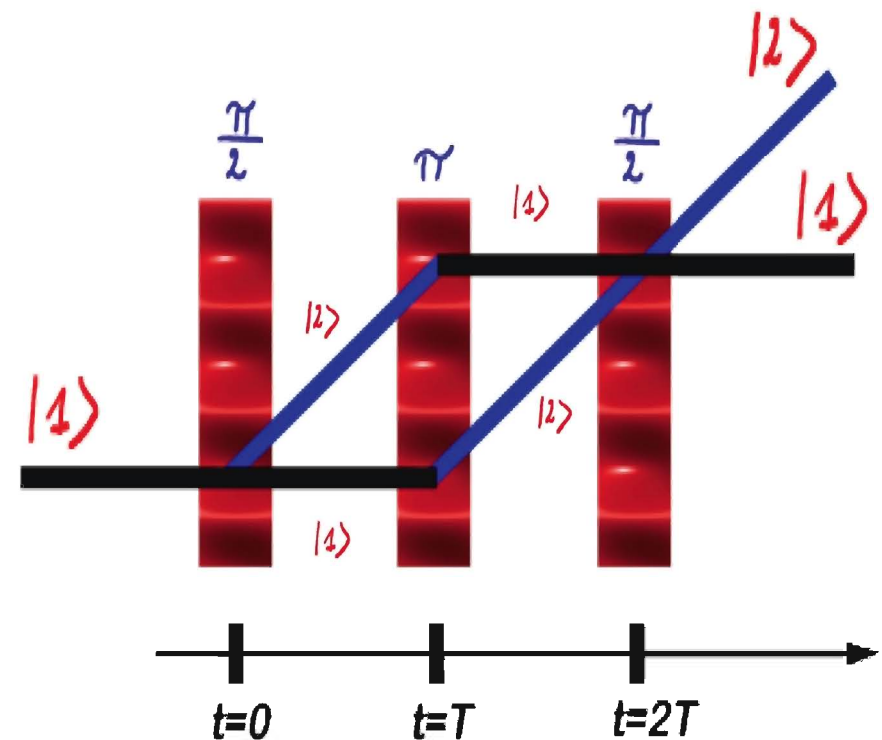
- La première impulsion $\pi/2$ est une **lame séparatrice**
 - ⇒ Superposition cohérente des deux états
 - ⇒ Vitesse différente
 - ⇒ Les deux "composantes" se séparent
- On applique l'impulsion π : **miroir**
 - ⇒ Change l'état et la vitesse

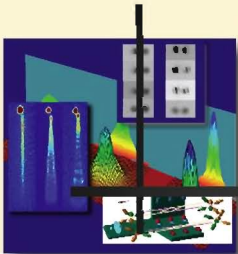




Interféromètre Atomique

- La première impulsion $\pi/2$ est **une lame séparatrice**
 - ⇒ **Superposition cohérente des deux états**
 - ⇒ **Vitesse différente**
 - ⇒ **Les deux "composantes" se séparent**
- On applique l'impulsion π : **miroir**
 - ⇒ **Change l'état et la vitesse**
- On applique l'impulsion $\pi/2$ **quand les deux composantes se rejoignent à nouveau**
 - **L'état de l'atome en sortie dépend du déphasage**

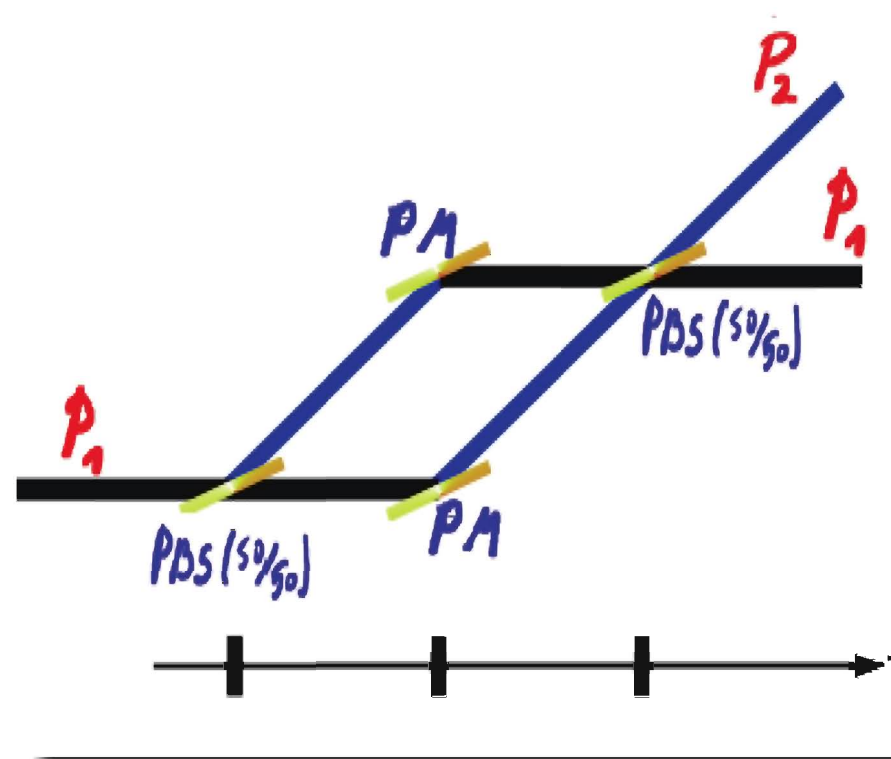


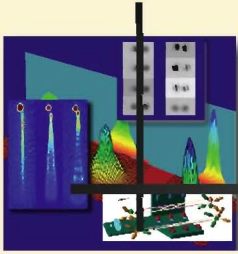


Interféromètre Atomique

On a réalisé un
interféromètre de Mach-
Zehnder temporel

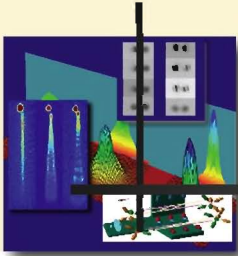
sensible à l'état interne
(polarisation)





Les Senseurs Inertiels Atomiques

- **LES INTERFÉROMÈTRE ATOMIQUES**
- **COMPRENDRE LA SENSIBILITÉ INERTIELLE**
- **LE GRADIOMÈTRE ATOMIQUE**
- **LE GYROMÈTRE À JET THERMIQUE**
- **LE GOM : BASE INERTIELLE À ATOMES FROIDS**



D'où vient la sensibilité inertielle ?

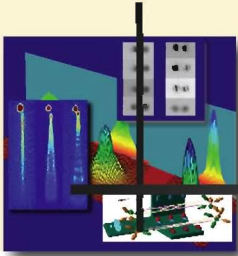
$$\cos(kx + \phi_0)$$



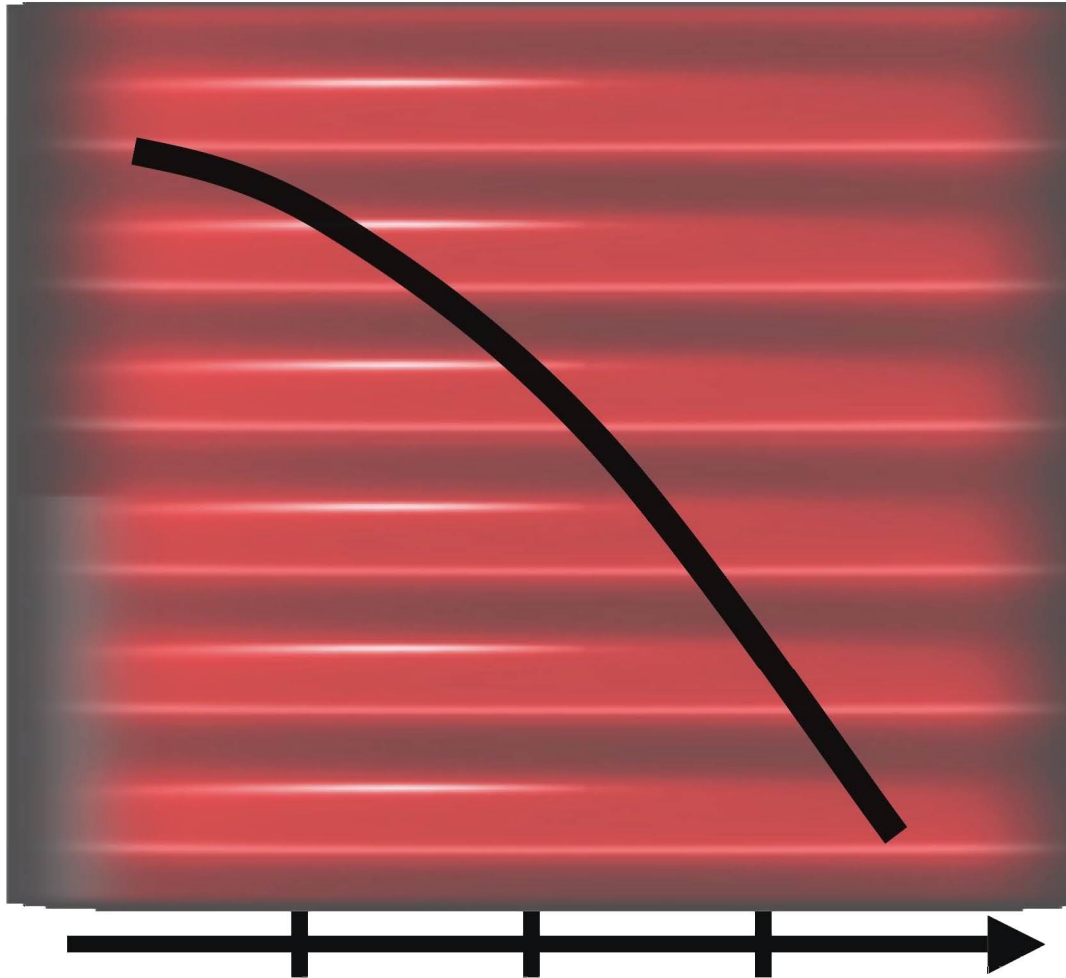
□ On utilise une règle (optique) pour mesurer précisément la position de la masse test

⇒ *Gravimètre à coin de cube (FG5)*

⇒ *La phase du laser est lue interférométrie (optique)*

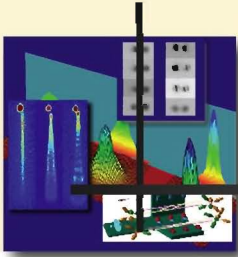


D'où vient la sensibilité inertielle ?

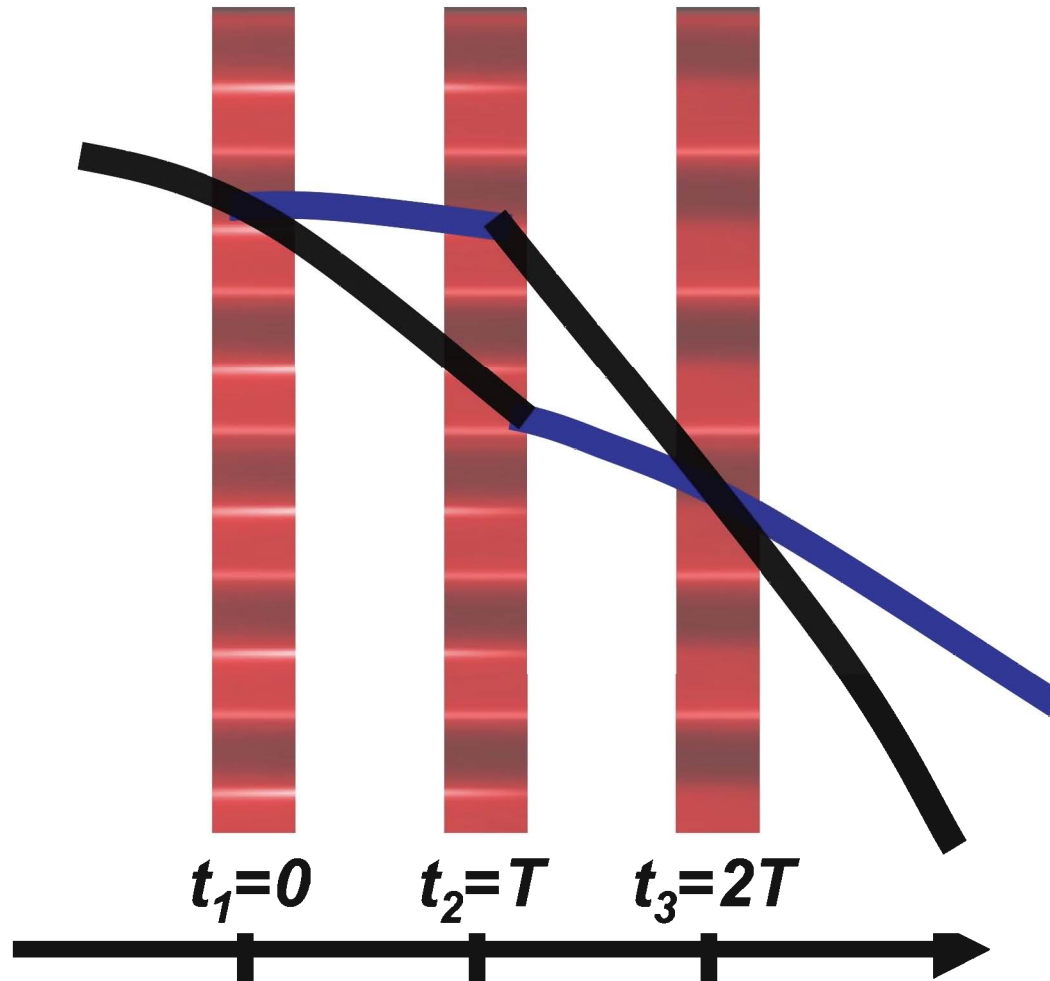


□ On utilise une règle (optique) pour mesurer précisément la position des atomes

⇒ *On va la phase du laser par interférométrie atomique*

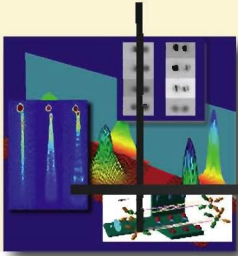


D'où vient la sensibilité inertielle ?

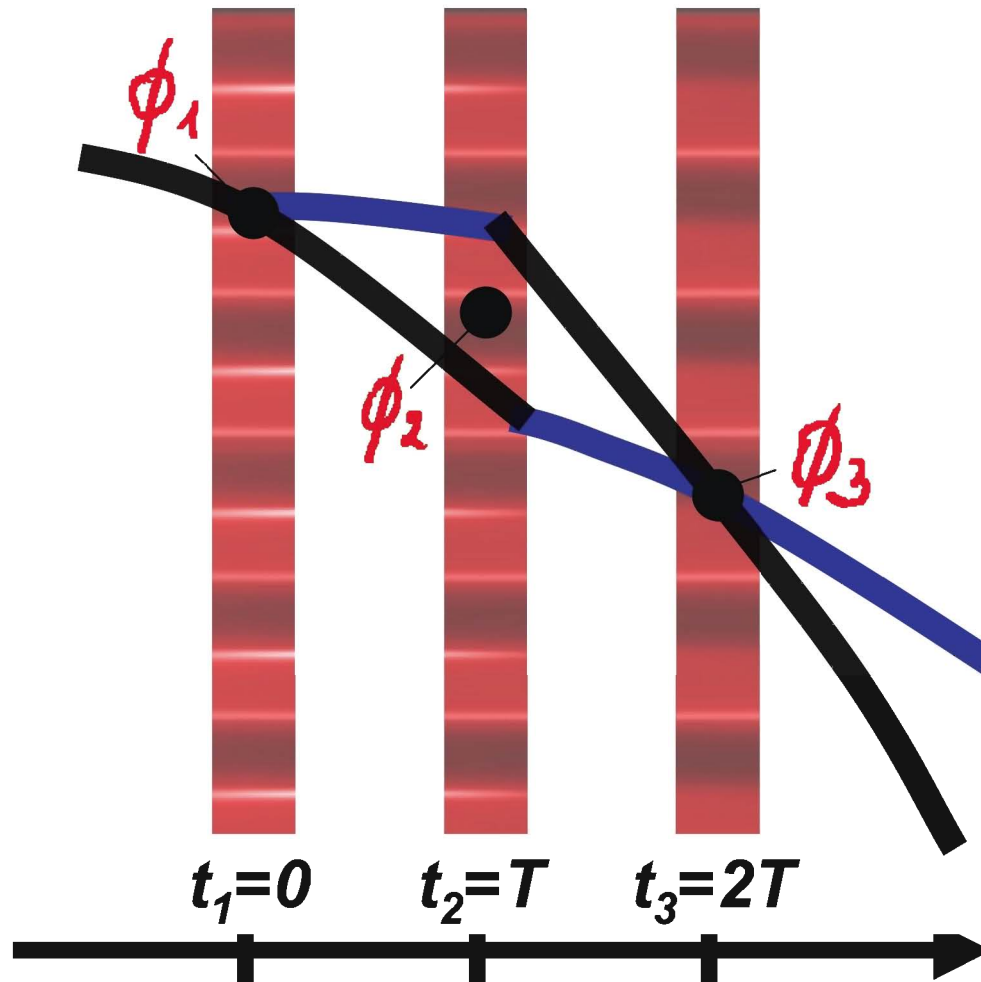


□ On utilise une règle (optique) pour mesurer précisément la position des atomes

⇒ *On va la phase du laser par interférométrie atomique*



D'où vient la sensibilité inertielle ?

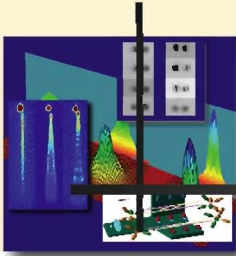


□ On utilise une règle (optique) pour mesurer précisément la position des atomes

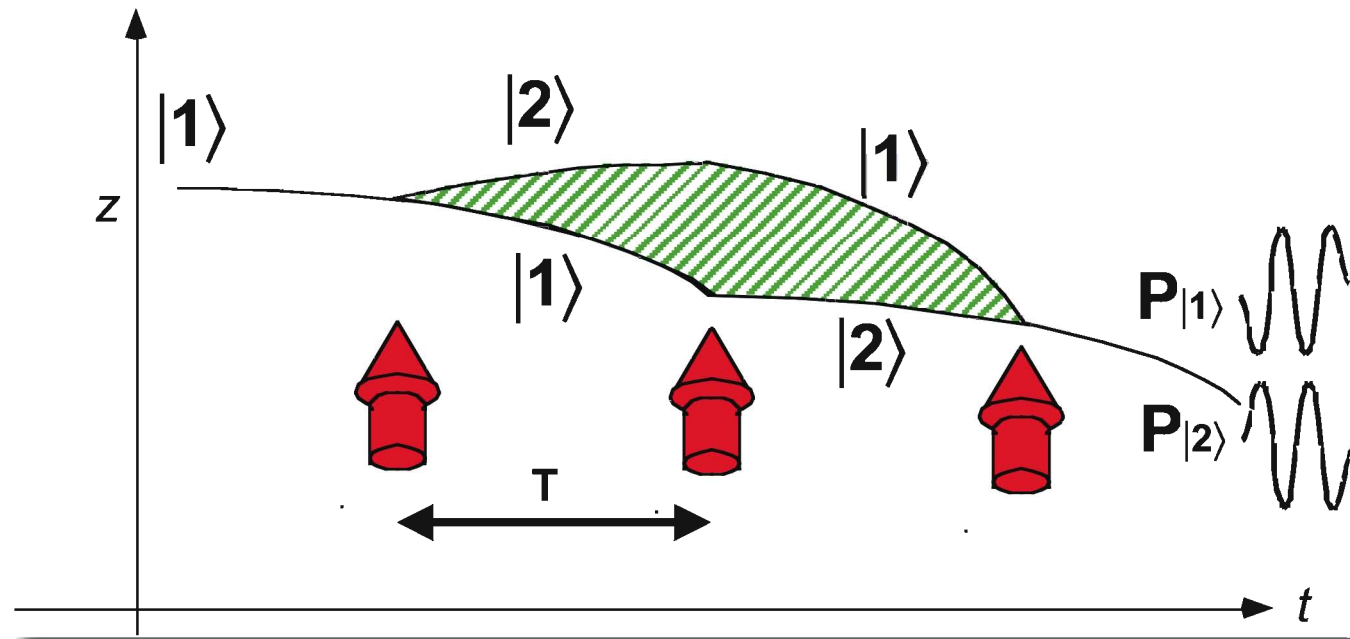
⇒ *On va la phase du laser par interférométrie atomique*

□ La phase dépend de la position "classique" du paquet d'onde dans l'onde laser : $\Phi(t_i) = kx(t_i) + \Phi_0$

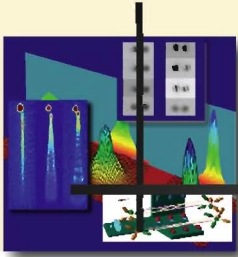
$$\Delta\phi = \phi_1 - 2\phi_2 + \phi_3$$



Senseurs Inertiels Atomiques



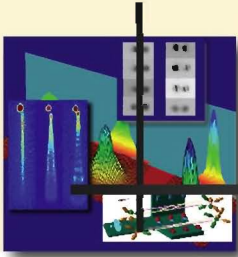
- **Un senseur inertielle lit la position de la masse test “atomique” à l’aide de lasers**
 - ⇒ **Une mesure de vitesse s’améliore avec le temps T**
 - ⇒ **La mesure d’une accélération d’améliore avec T^2**



Senseurs Inertiels Atomiques

Accéléromètre

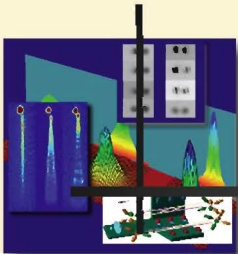
- **Un senseur inertiel lit la position de la masse test “atomique” à l’aide de lasers**
 - ⇒ **Une mesure de vitesse s’améliore avec le temps T**
 - ⇒ **La mesure d’une accélération d’améliore avec T^2**



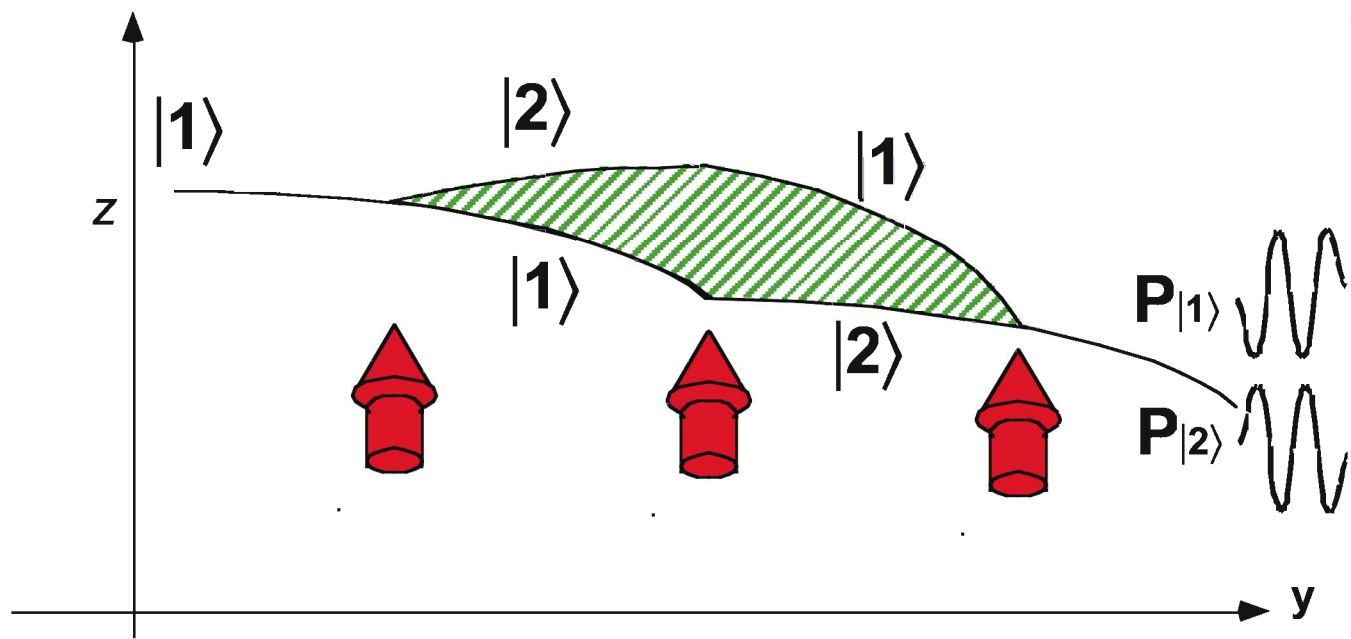
Senseurs Inertiels Atomiques

$$\Delta a_{\min} = \frac{a \big|_{\Delta\phi_{\text{acc}} = \pm \pi \text{ rad}}}{\sqrt{N}} \equiv \frac{1}{R T^2 \sqrt{N}}$$

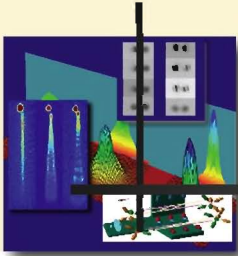
- **Un senseur inertiel lit la position de la masse test “atomique” à l’aide de lasers**
 - ⇒ **Une mesure de vitesse s’améliore avec le temps T**
 - ⇒ **La mesure d’une accélération d’améliore avec T²**



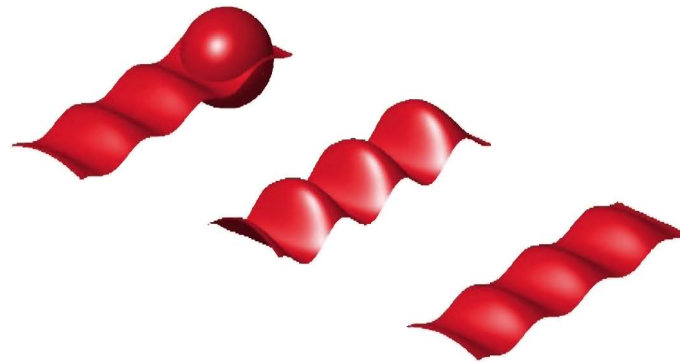
Senseurs Inertiels Atomiques



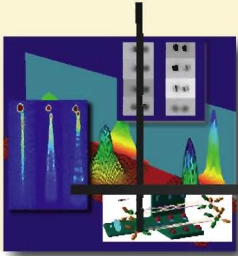
Gyromètre



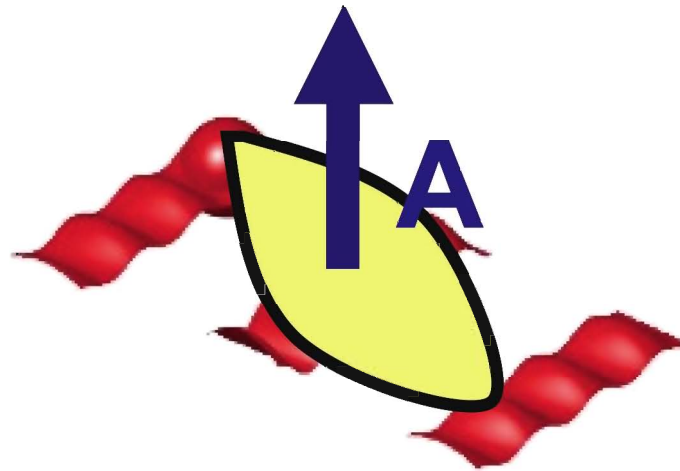
L'effet Sagnac Atomique



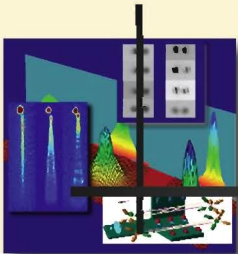
$$\Delta \Omega_{\min} = \frac{\Delta a_{\text{cor.}}}{2 v_y} \equiv \frac{\hbar}{m} \frac{1}{L v_R T \sqrt{N}}$$



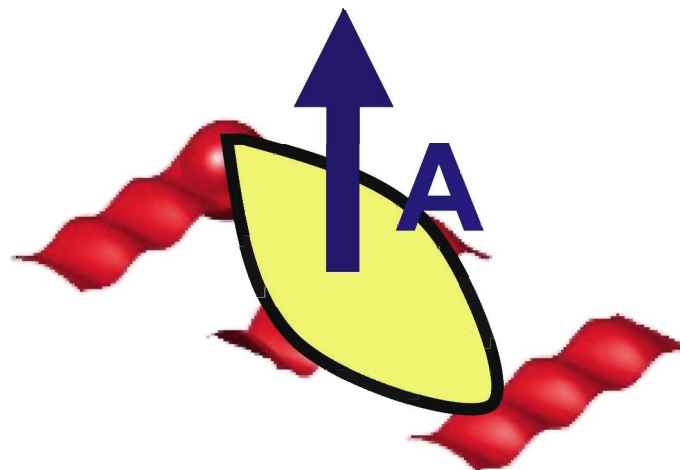
L'effet Sagnac Atomique



$$\Delta\phi_{\text{rot}} = L^2 \frac{v_R}{v_L} \Omega \equiv 4\pi \frac{\Omega A}{\lambda_{dB} v_L}$$



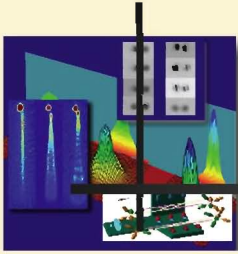
L'effet Sagnac Atomique



$$R = \frac{d\phi_{dB}}{d\phi_{ph}} = \frac{c \lambda_{ph}}{v \lambda_{dB}} \equiv \frac{M c^2}{\hbar \omega_0}$$

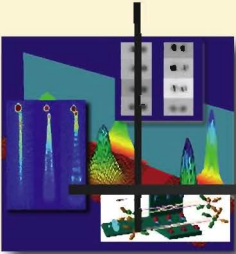
1 GeV/nucléon
10¹¹

1 eV

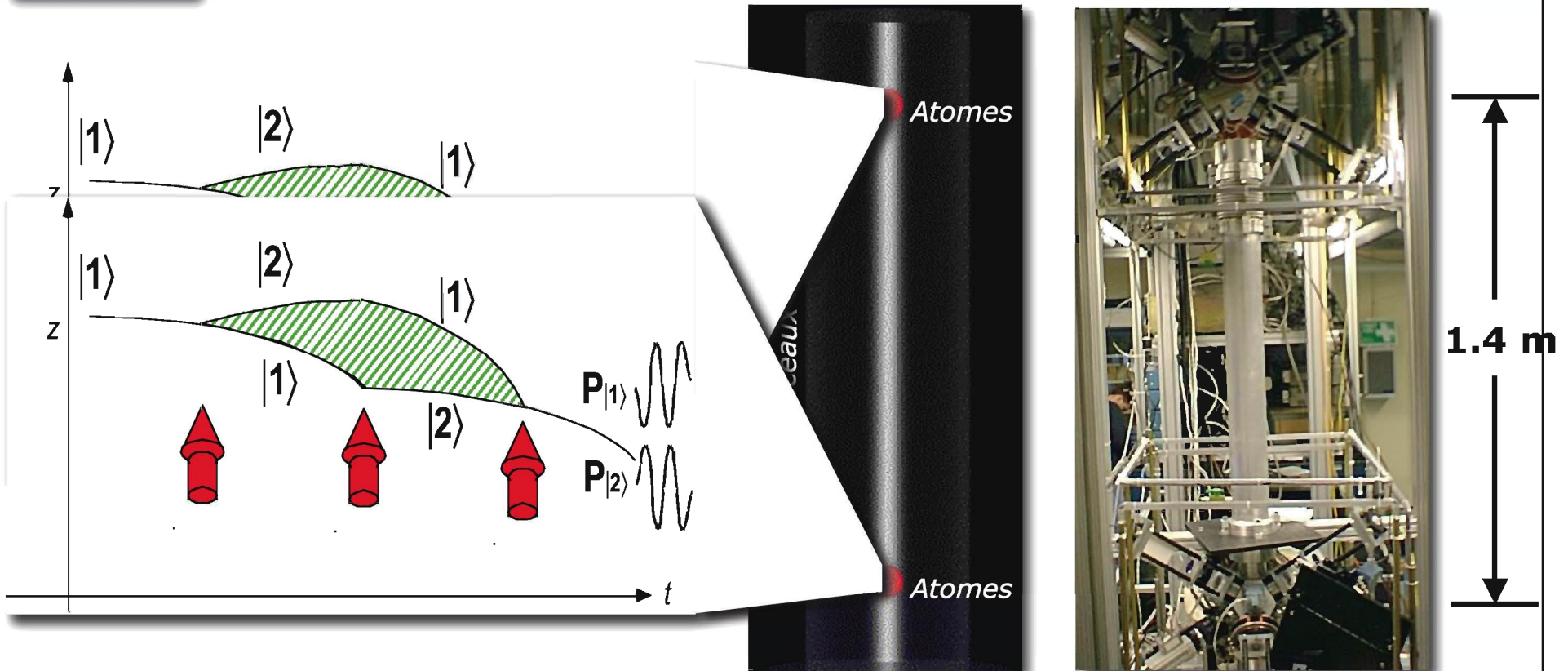


Les Senseurs Inertiels Atomiques

- **LES INTERFÉROMÈTRE ATOMIQUES**
- **COMMENT CONSTRUIT-ON UN SENSEURS INERTIEL ATOMIQUE**
- **LE GRADIOMÈTRE ATOMIQUE**
- **LE GYROMÈTRE À JET THERMIQUE**
- **LE GOM : BASE INERTIELLE À ATOMES FROIDS**

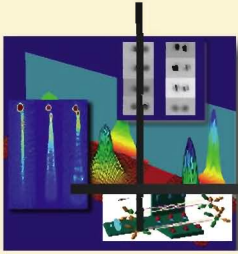


Gradiomètre de Stanford (1996)



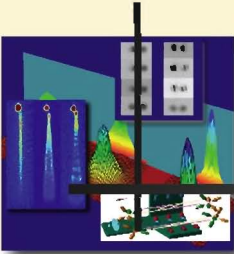
Snadden et al (1998)

$$\Delta\left(\frac{\delta a}{\delta z}\right) = 4 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2} / \sqrt{\text{Hz}} = 40 \text{ Eötvös}^2$$

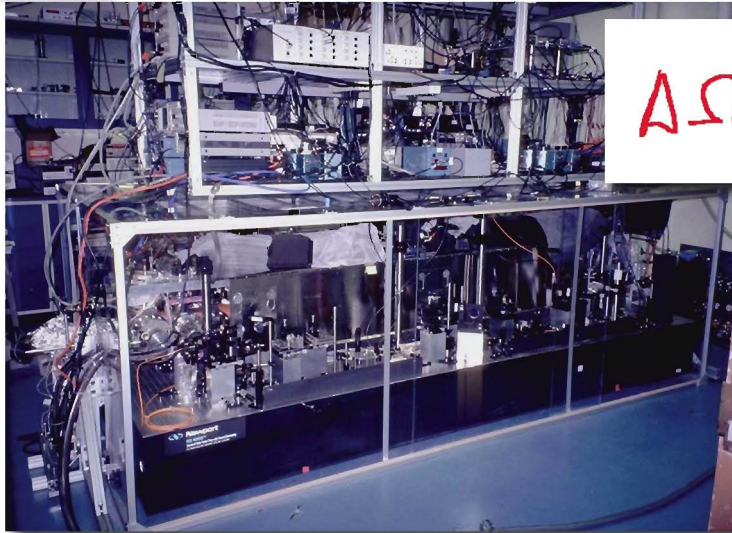


Les Senseurs Inertiels Atomiques

- **LES INTERFÉROMÈTRE ATOMIQUES**
- **COMMENT CONSTRUIT-ON UN SENSEURS INERTIEL ATOMIQUE**
- **LE GRADIOMÈTRE ATOMIQUE**
- **LE GYROMÈTRE À JET THERMIQUE**
- **LE GOM : BASE INERTIELLE À ATOMES FROIDS**

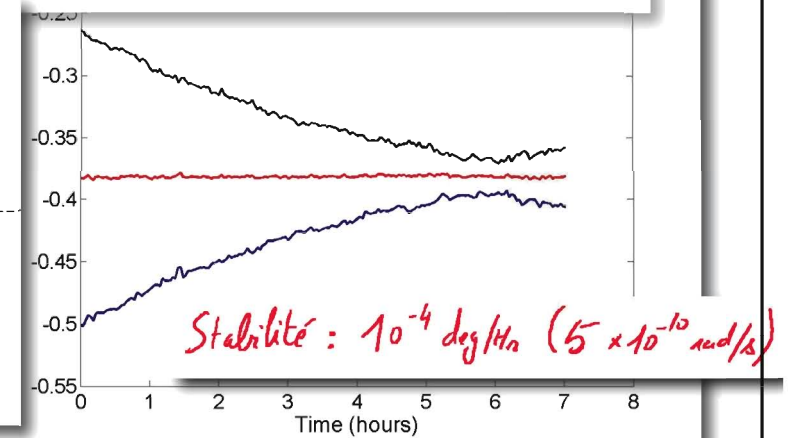
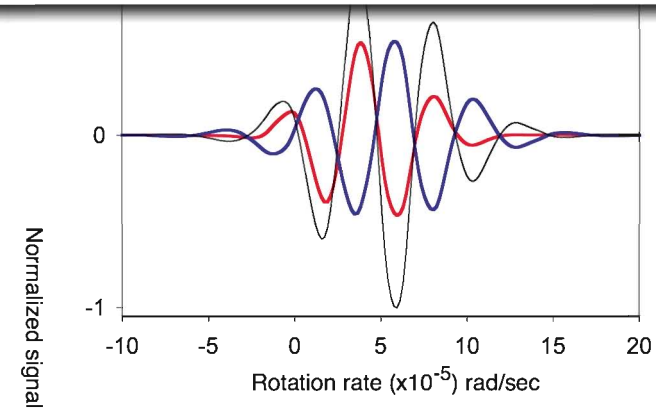
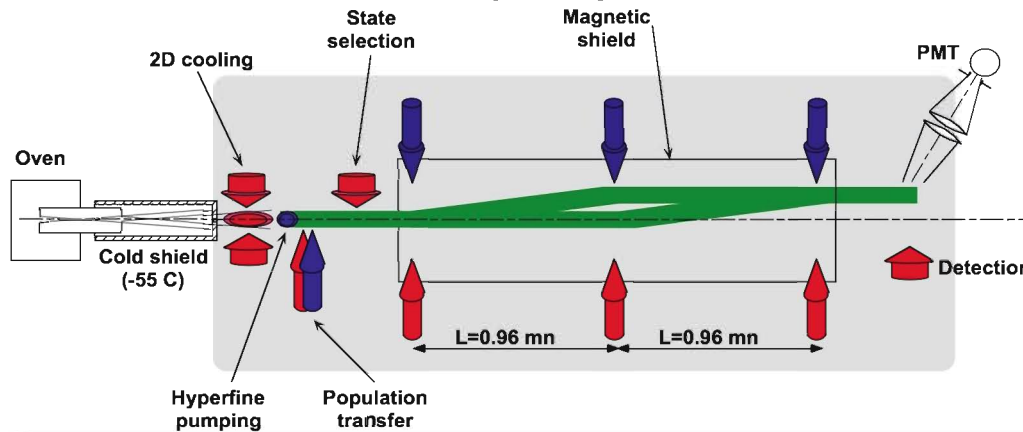


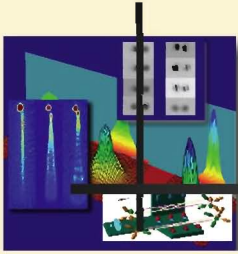
Gyroscope Stanford



$$\Delta\Omega = 2 \times 10^{-6} \text{ deg}/\sqrt{\text{Hz}} \equiv 6 \times 10^{-10} \text{ rad/s} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$$

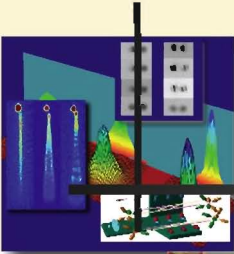
Gustavson et al (1997)



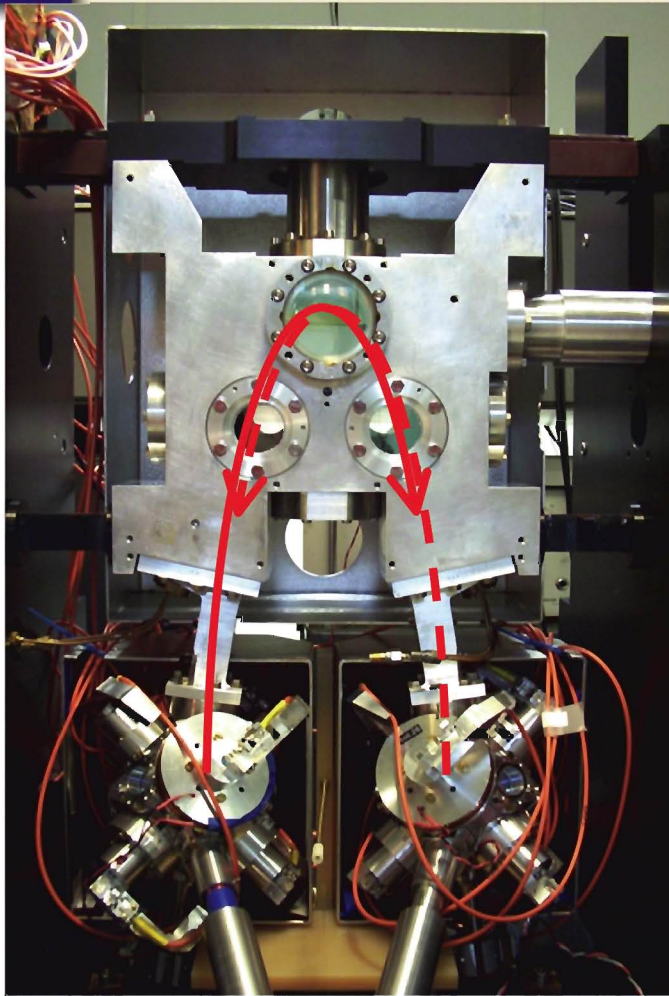


Les Senseurs Inertiels Atomiques

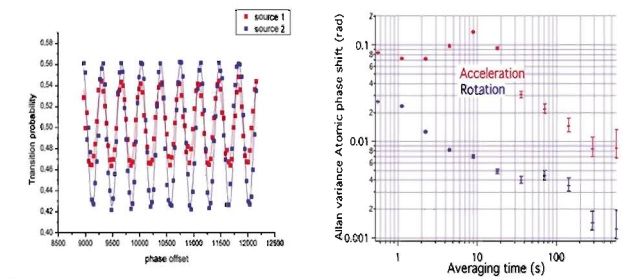
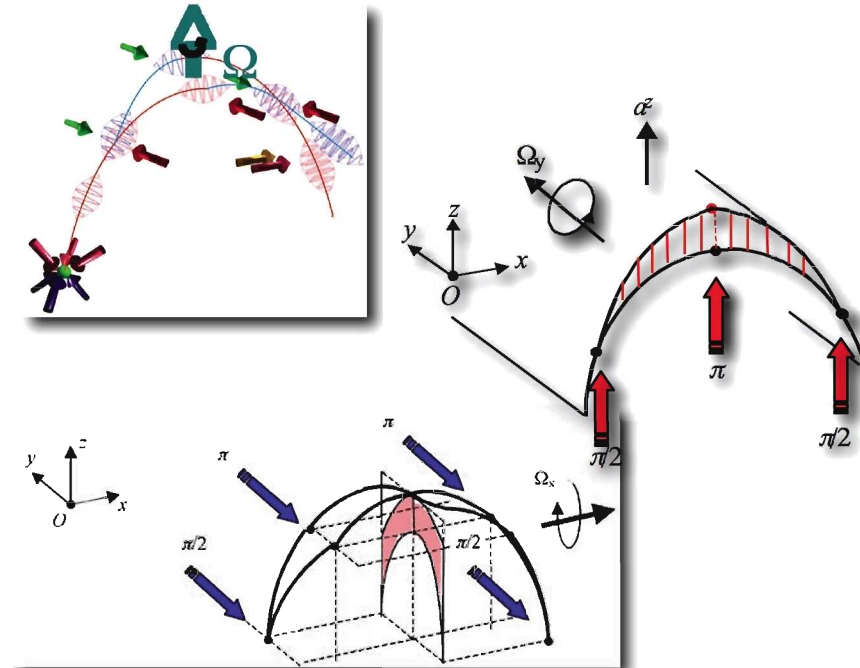
- **LES INTERFÉROMÈTRE ATOMIQUES**
- **COMMENT CONSTRUIT-ON UN SENSEURS INERTIEL ATOMIQUE**
- **LE GRADIOMÈTRE ATOMIQUE**
- **LE GYROMÈTRE À JET THERMIQUE**
- **LE GOM : BASE INERTIELLE À ATOMES FROIDS**



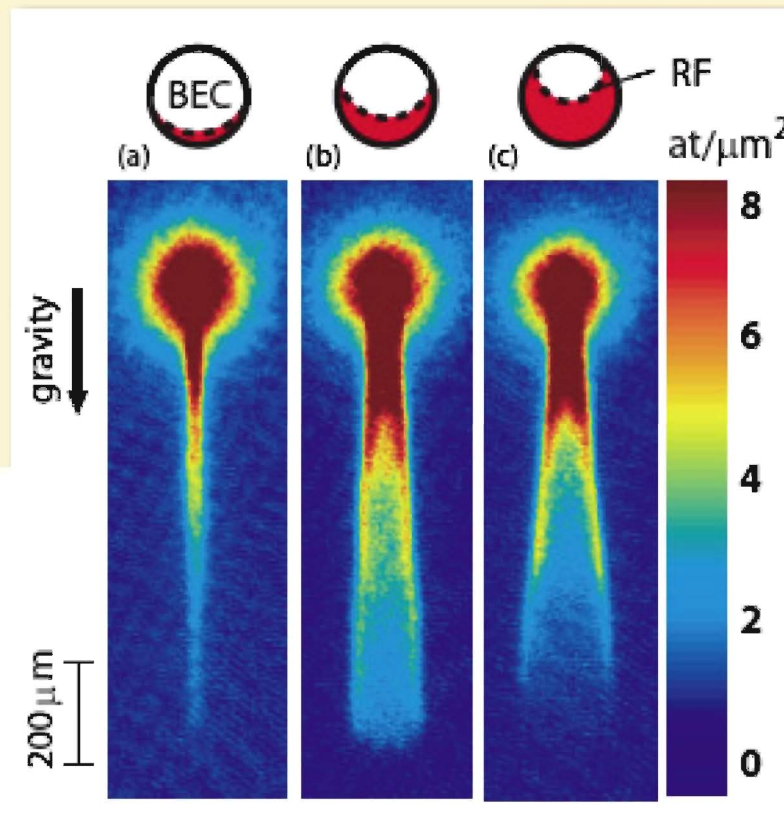
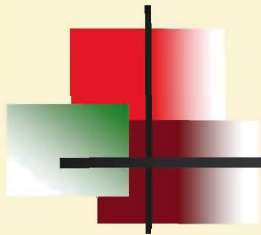
Une base inertielle à atomes froids (SYRTE)

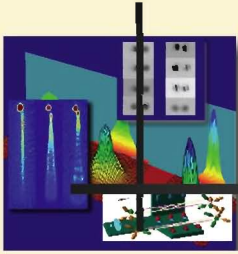


Yver et al (en préparation)



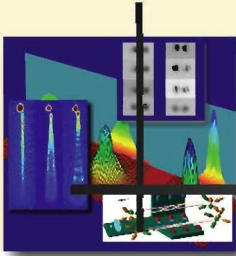
UNE SOURCE ATOMIQUE COHÉRENTE : LE LASER À ATOMES



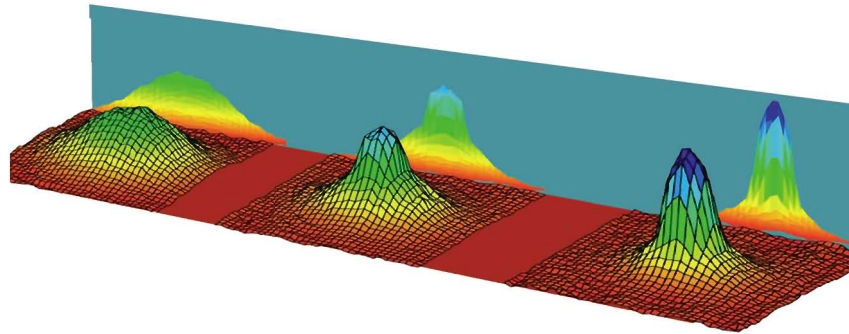


Condensation de Bose-Einstein

- **LA RÉVOLUTION DE 1995**
- **CBE ET LASER À ATOMES**
- **CARACTÉRISTIQUES D'UN LASER À ATOMES**
- **LA COHÉRENCE ...**
- **AUTRES ÉTUDES & LES MONTAGES**

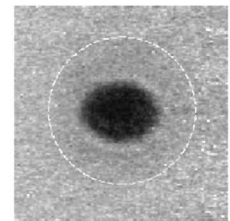
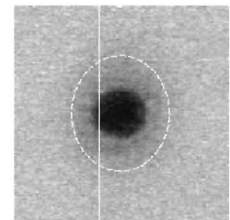
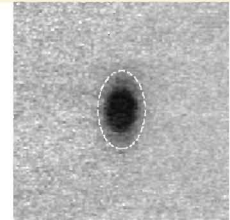


1995: CBE d'un gaz dilué ultrafroid



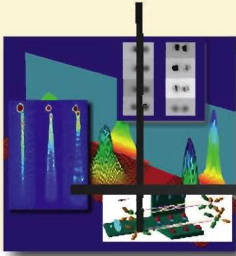
Apparition brutale d'un pic d'un pic de densité à basse température

Observation d'un nuage dont l'expansion est anisotrope : inversion d'ellipticité

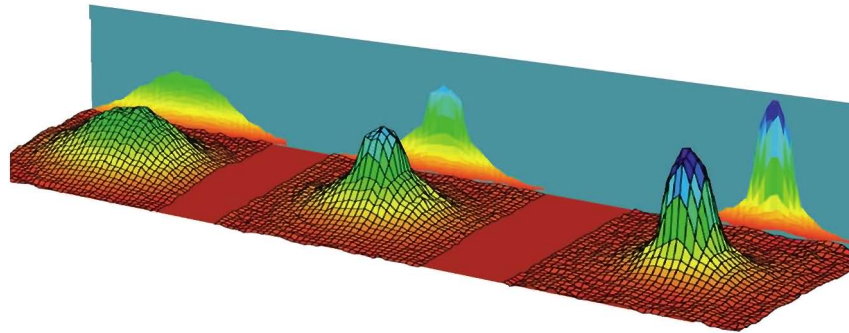


Interprétation: le nuage d'atomes se comporte comme un seul mode (fonction d'onde) :

Laser à atomes



1995: CBE d'un gaz dilué ultrafroid



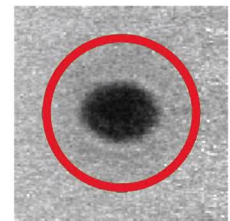
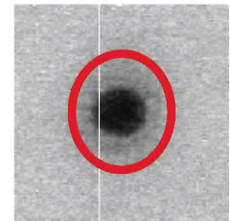
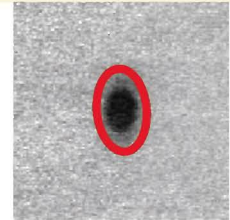
$$N_{\text{BEC}} \sim N \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^3 \right]$$

Effet de seuil du laser à atomes

$$\Delta p \sim \frac{1}{\Delta x}$$

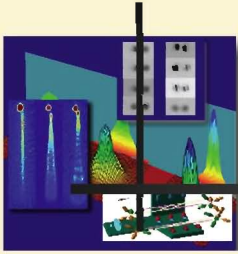
Effet de diffraction

Astigmatisme des diodes laser



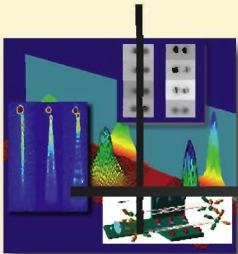
Interprétation: le nuage d'atomes se comporte
comme un seul mode (fonction d'onde) :

Laser à atomes

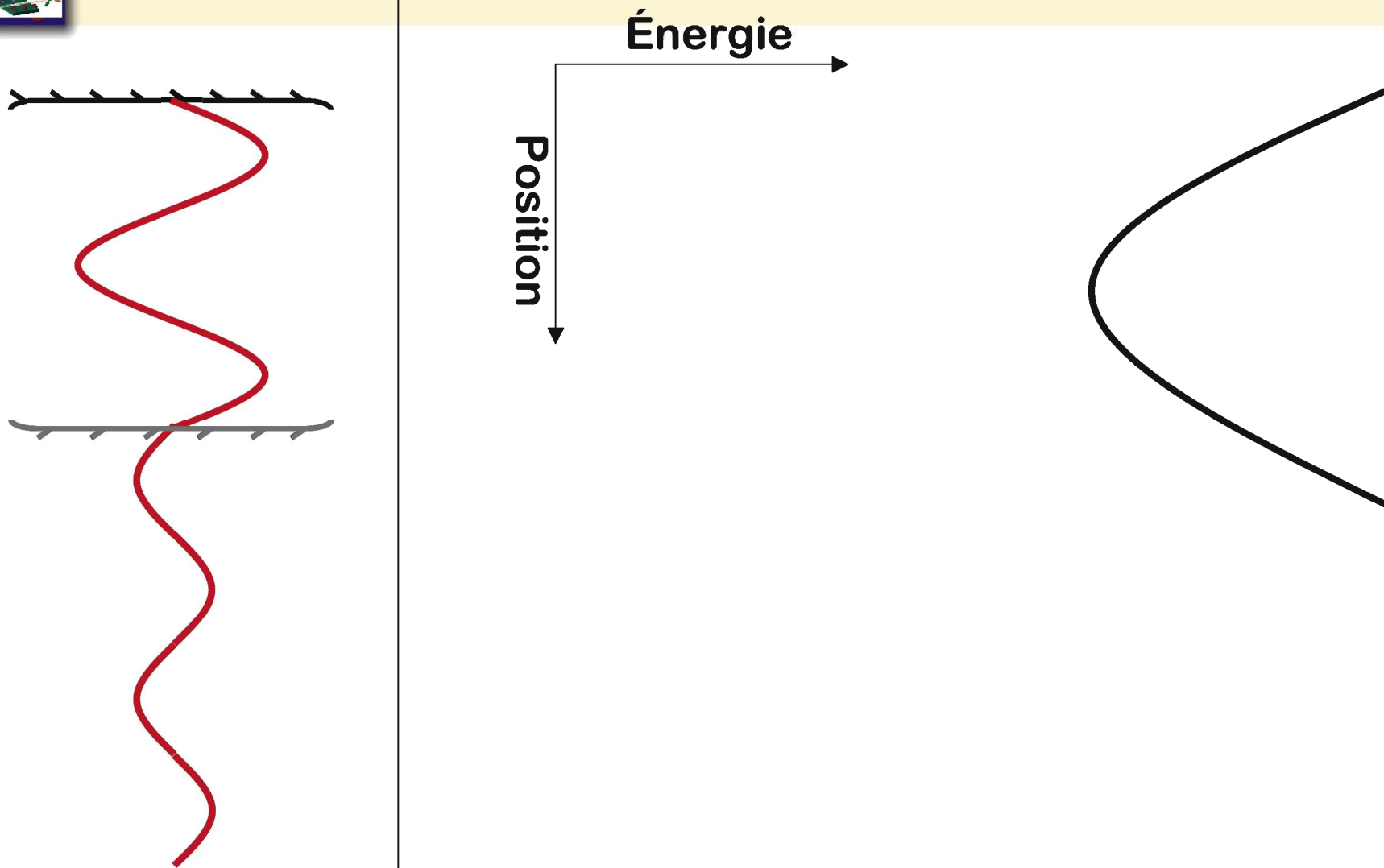


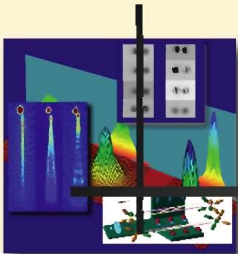
Condensation de Bose-Einstein

- **LA RÉVOLUTION DE 1995**
- **CBE ET LASER À ATOMES**
- **CARACTÉRISTIQUES D'UN LASER À ATOMES**
- **LA COHÉRENCE ...**
- **AUTRES ÉTUDES & LES MONTAGES**



Le résonateur atomique

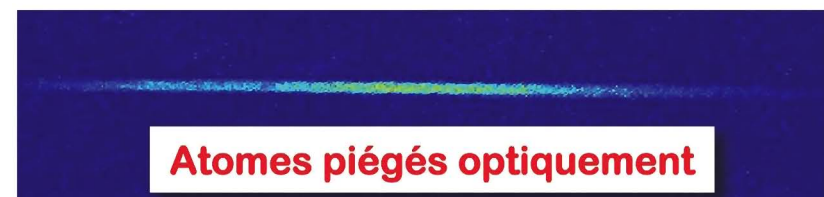
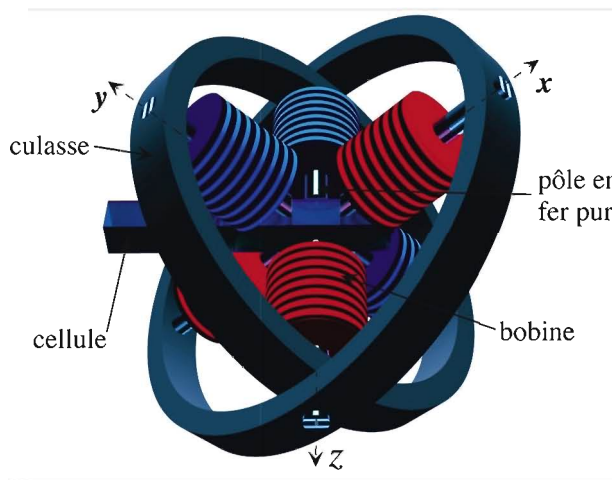
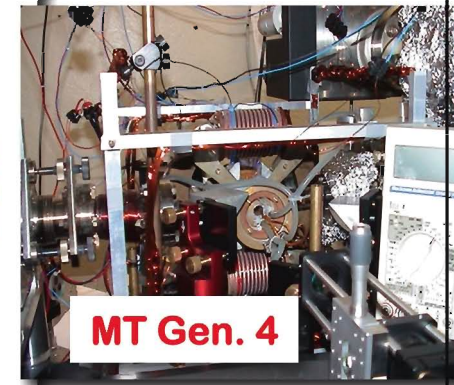
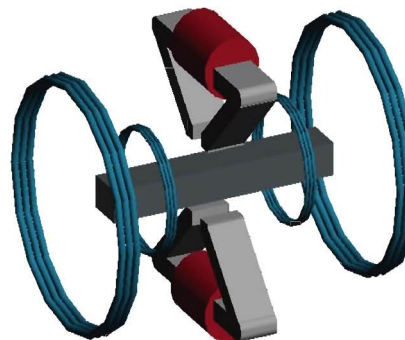


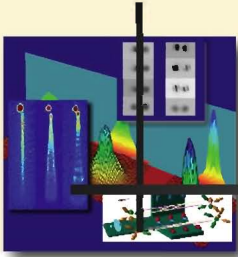


Le résonateur atomique

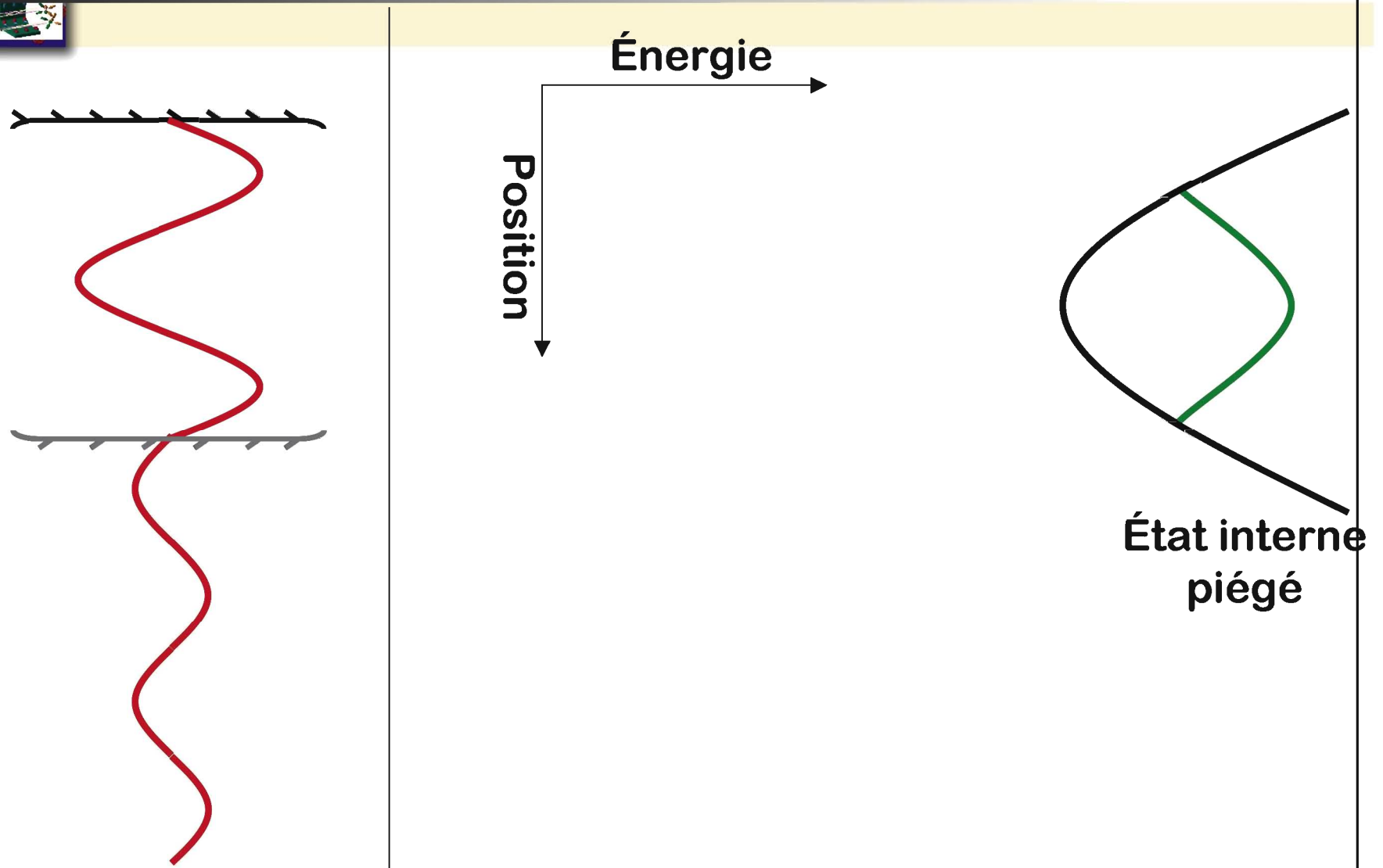
Utilisation de pièges non-dissipatifs indispensable

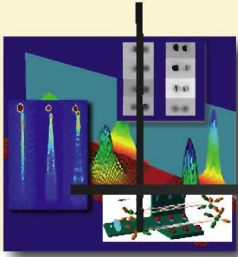
- ⇒ Piège ferromagnétiques
- ⇒ Pièges Optiques



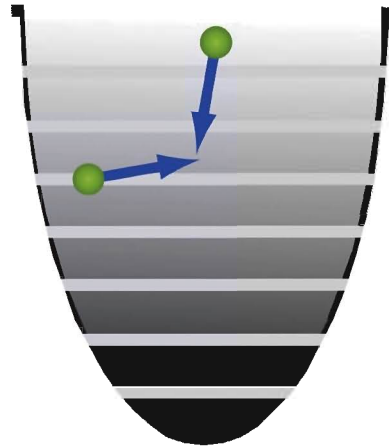


Le processus d'amplification





Le processus d'amplification



Refroidissement évaporatif

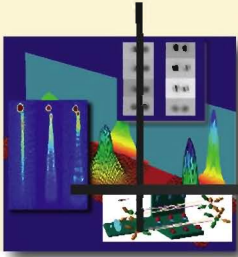
⇒ **Collisions entre deux atomes**
« tièdes »

⇒ **Peut créer un atome chaud**
et un atome froid

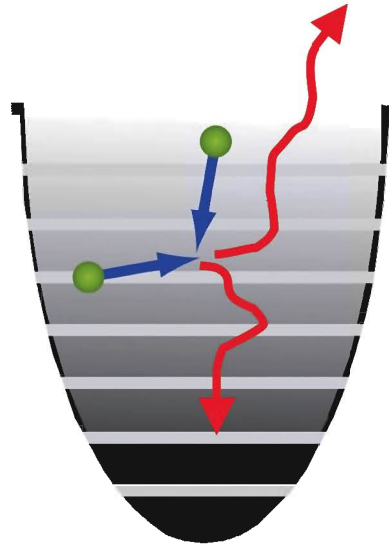
⇒ **On se débarrasse de**
l'atome chaud

⇒ **Amplification bosonique**

⇒ **Plus on a d'atomes froids,**
plus la chance d'en créer
d'autres par collision est
grande



Le processus d'amplification



Refroidissement évaporatif

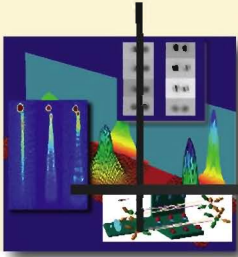
⇒ **Collisions entre deux atomes**
« tièdes »

⇒ **Peut créer un atome chaud**
et un atome froid

⇒ **On se débarrasse de**
l'atome chaud

⇒ **Amplification bosonique**

⇒ **Plus on a d'atomes froids,**
plus la chance d'en créer
d'autres par collision est
grande



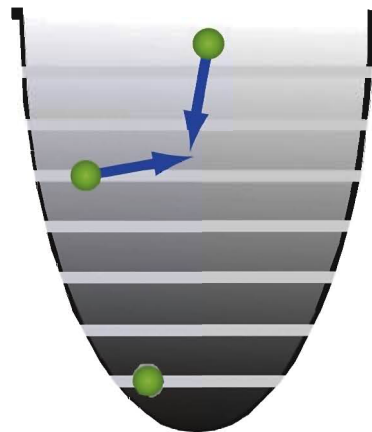
Le processus d'amplification

Refroidissement évaporatif

⇒ **Collisions entre deux atomes**
« tièdes »

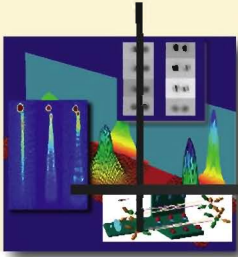
⇒ **Peut créer un atome chaud**
et un atome froid

⇒ **On se débarrasse de**
l'atome chaud



⇒ **Amplification bosonique**

⇒ **Plus on a d'atomes froids,**
plus la chance d'en créer
d'autres par collision est
grande



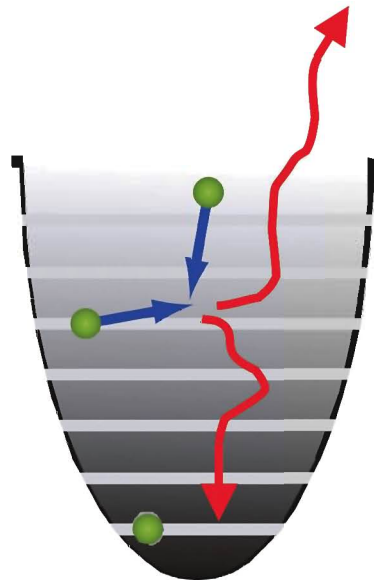
Le processus d'amplification

Refroidissement évaporatif

⇒ **Collisions entre deux atomes**
« tièdes »

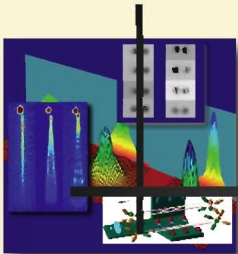
⇒ **Peut créer un atome chaud**
et un atome froid

⇒ **On se débarrasse de**
l'atome chaud

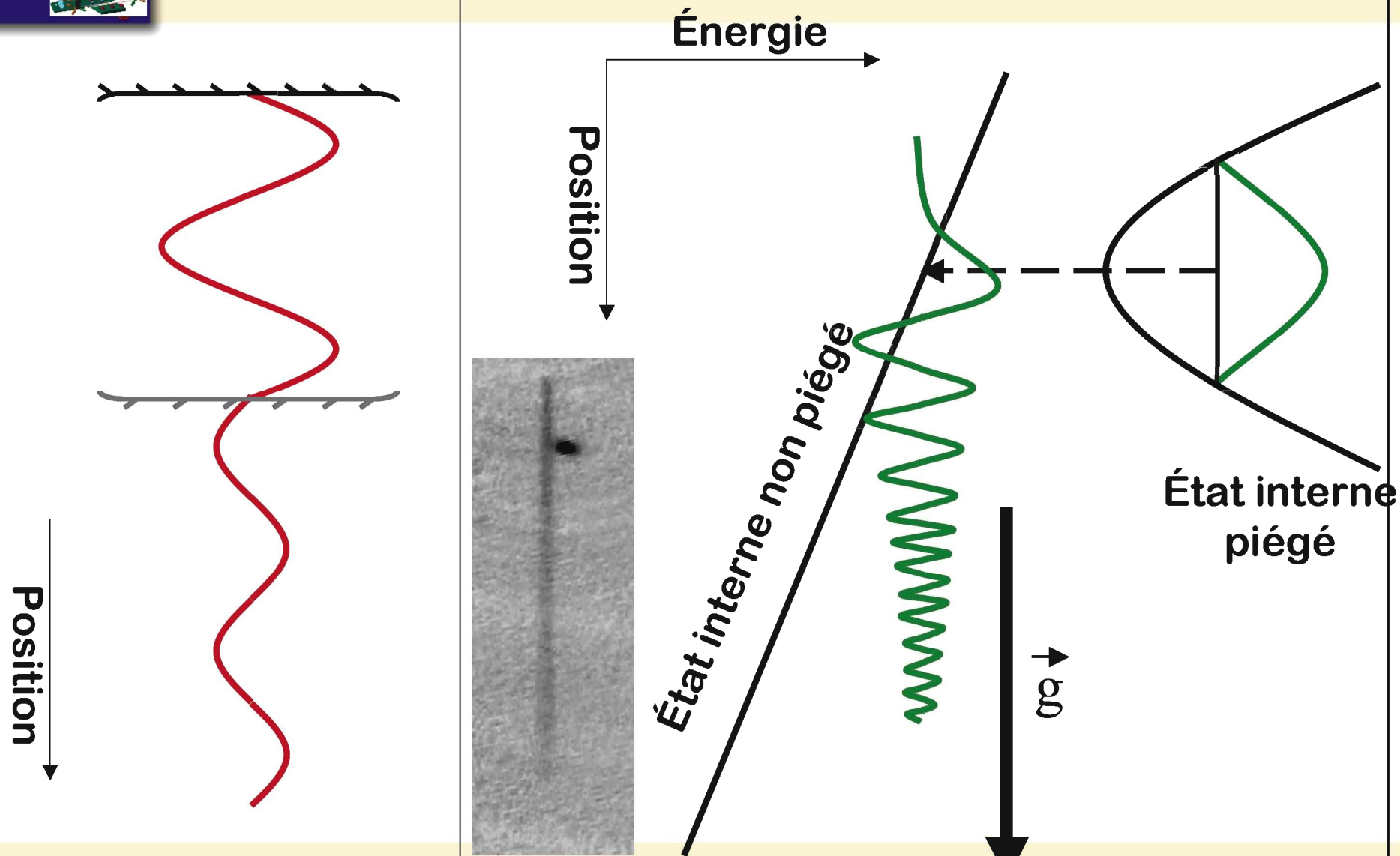


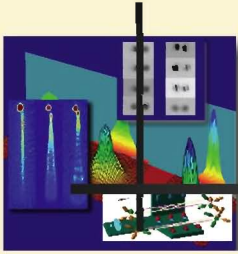
⇒ **Amplification bosonique**

⇒ **Plus on a d'atomes froids,**
plus la chance d'en créer
d'autres par collision est
grande



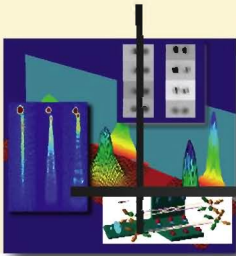
Le coupleur de sortie





Condensation de Bose-Einstein

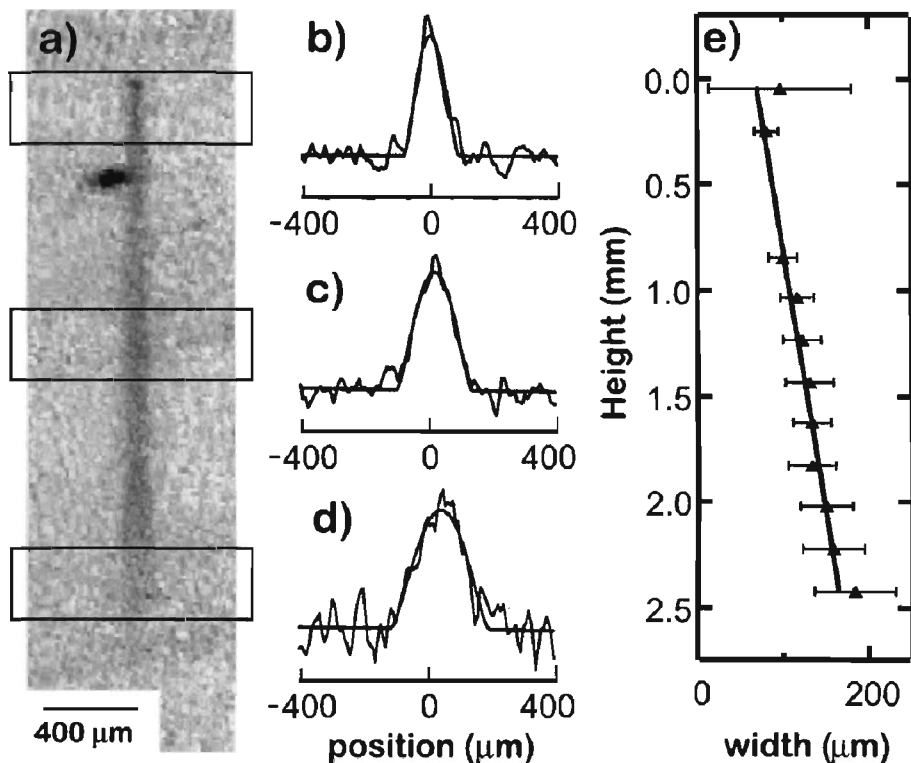
- **LA RÉVOLUTION DE 1995**
- **CBE ET LASER À ATOMES**
- **CARACTÉRISTIQUES D'UN LASER À ATOMES**
- **LA COHÉRENCE ...**
- **AUTRES ÉTUDES & LES MONTAGES**



Caractérisation du faisceau laser à atomes

□ Modèle théorique du laser à atomes

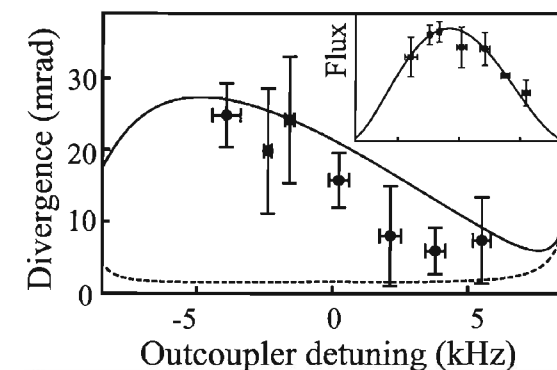
⇒ *règle d'or de Fermi*



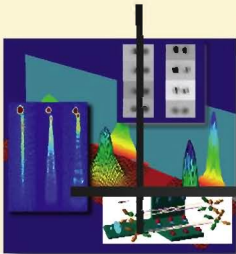
□ Modèle ABCD paraxial pour décrire la propagation d'un faisceau "idéal"

⇒ *Incluse divergence*

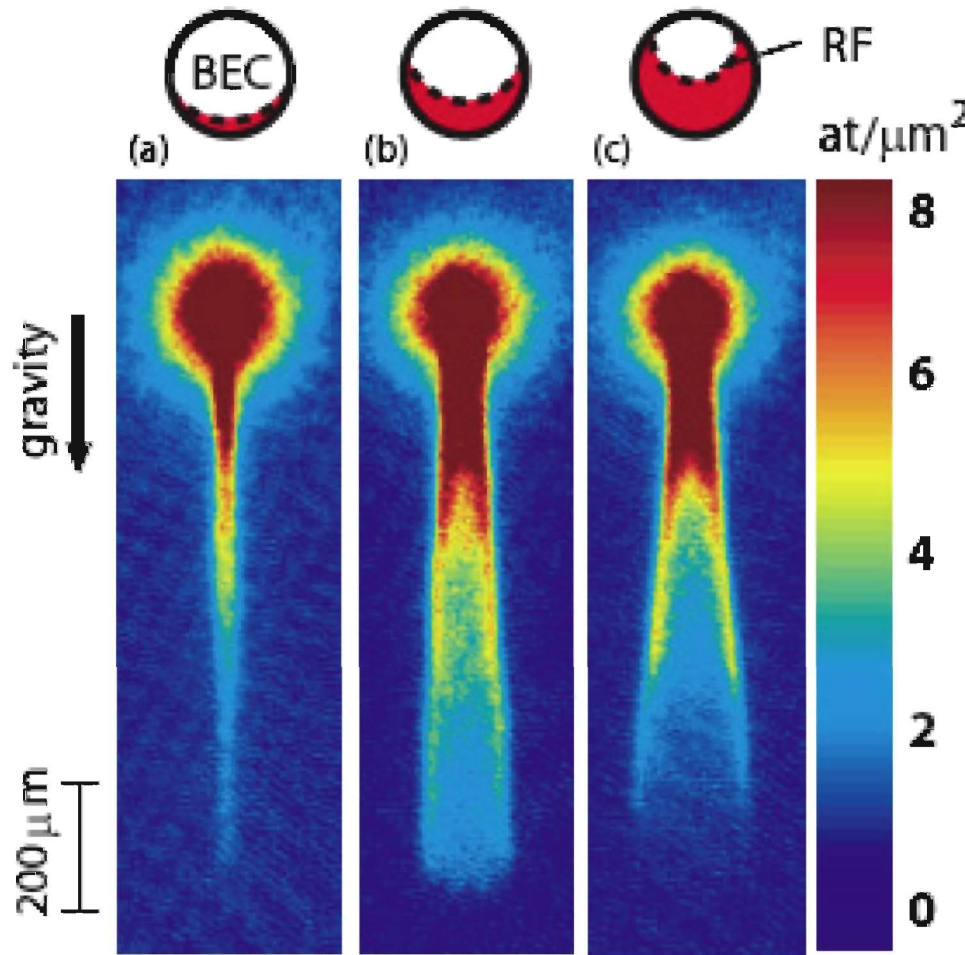
⇒ *Effets des interactions*



Le Coq et al (2001)

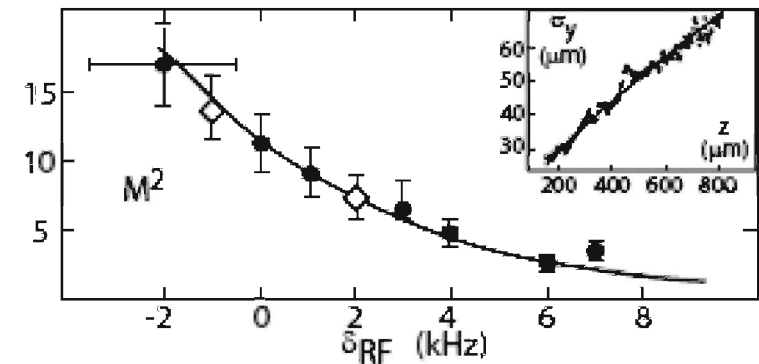


Caractérisation du faisceau laser à atomes



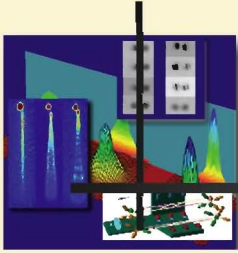
□ Modèle ABCD paraxial peut décrire la propagation d'un faisceau "non-idéal"

⇒ *Détermination du facteur M^2*



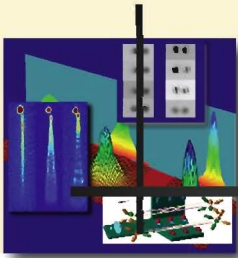
⇒ *Utilisation des techniques calculatoires de l'optique pour calculer M^2*

Riou et al (soumis en 2005)

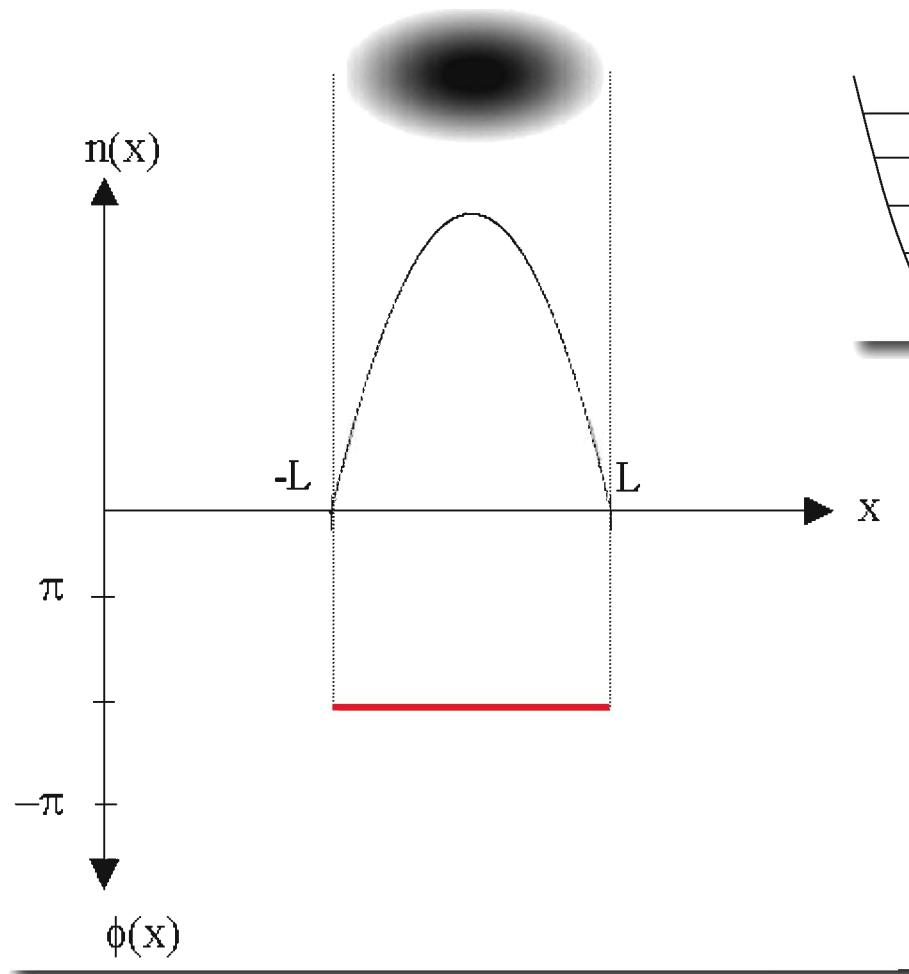


Condensation de Bose-Einstein

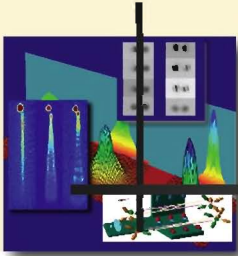
- **LA RÉVOLUTION DE 1995**
- **CBE ET LASER À ATOMES**
- **CARACTÉRISTIQUES D'UN LASER À ATOMES**
- **LA COHÉRENCE ... (DES QUASI CONDENSATS)**
- **AUTRES ÉTUDES & LES MONTAGES**



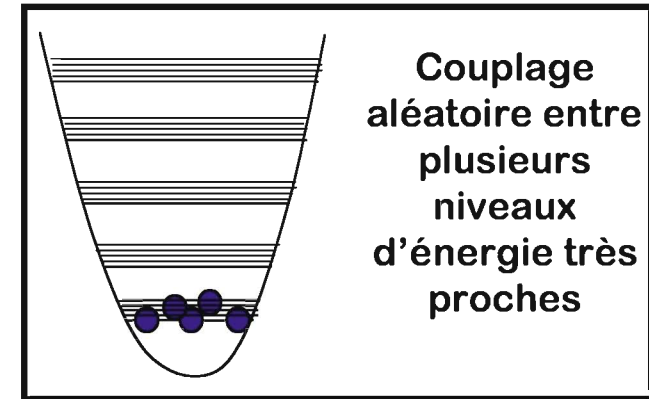
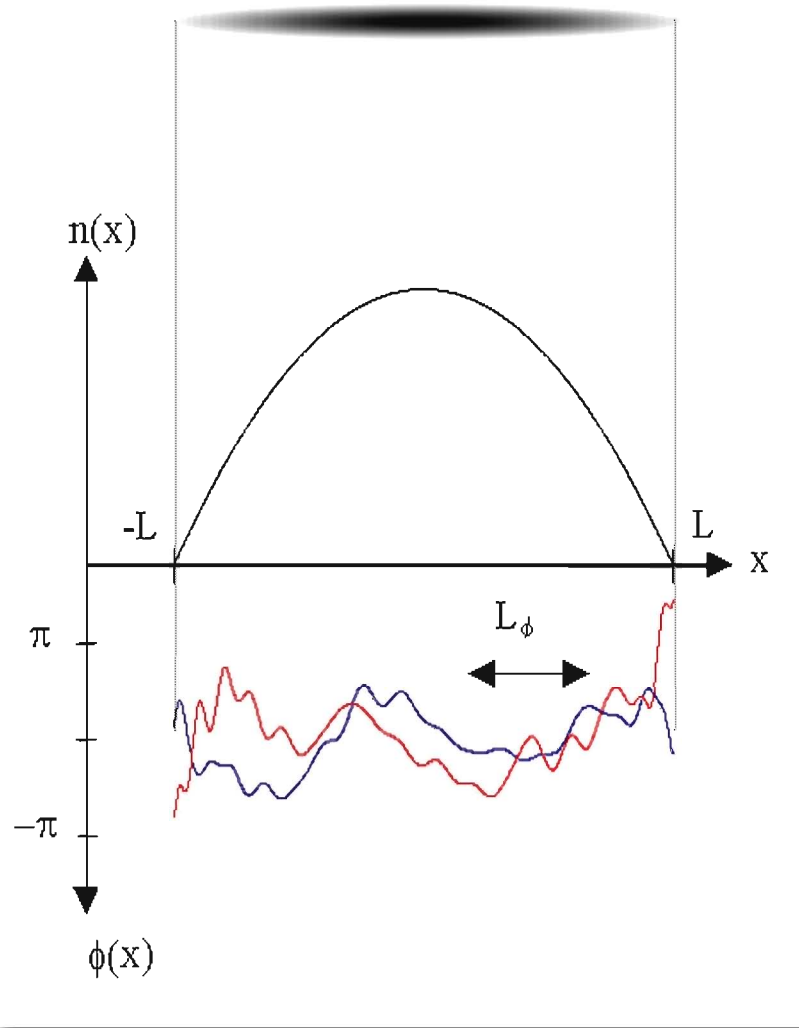
Condensats ...



- ❑ **BEC = objet cohérent**
- ❑ **Phase uniforme sur toute sa longueur : sa longueur de cohérence est égale à sa taille : $L_\phi = L$**



Condensats ... et Quasicondensats



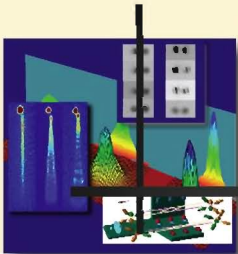
La phase fluctue le long de l'axe et d'une réalisation à l'autre.

Baisse de la longueur de cohérence

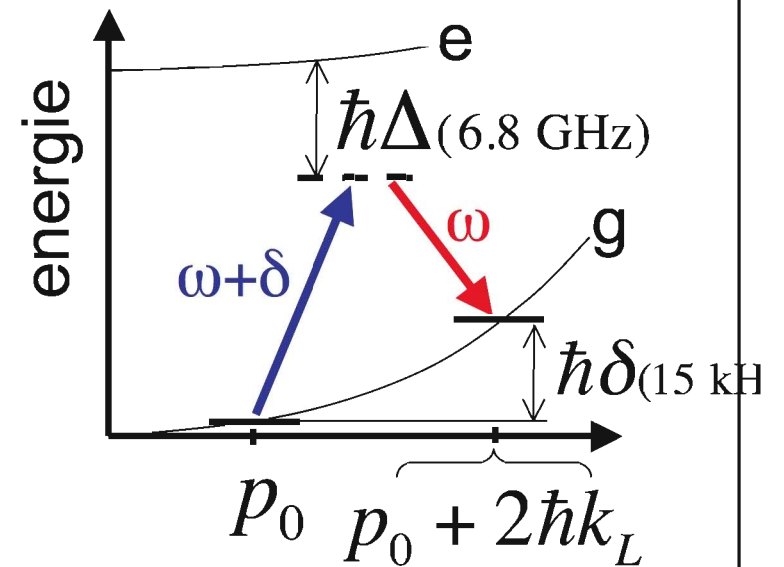
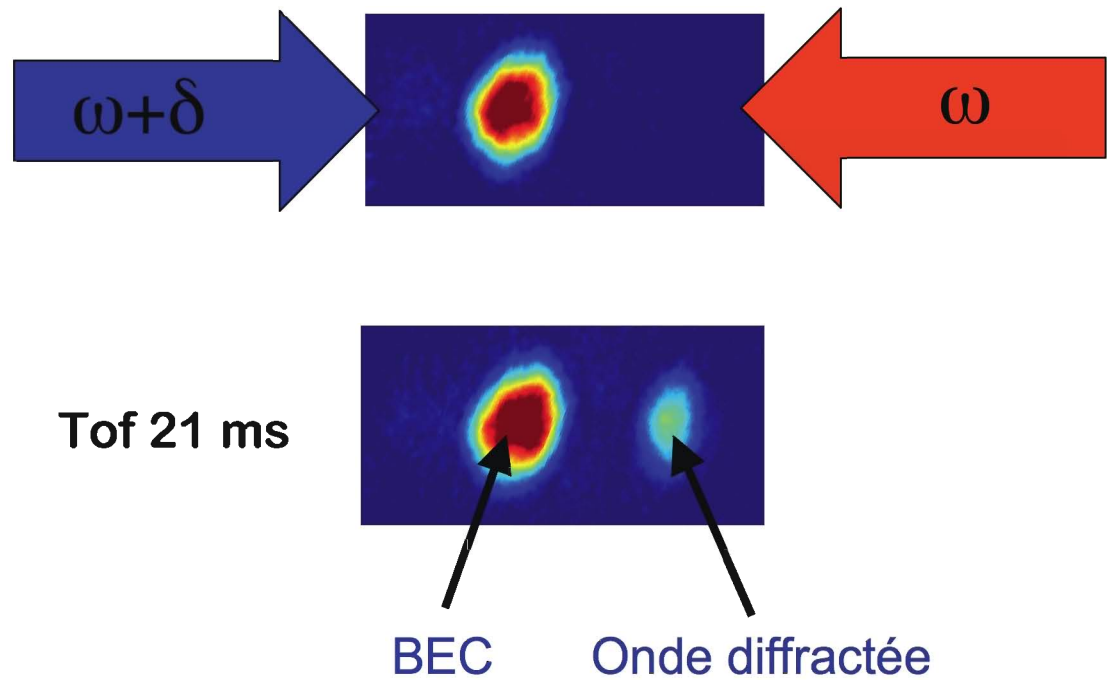
On parle de *quasi-condensat*

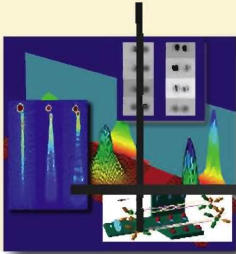
On peut étudier la cohérence par interférométrie atomique, ou par l'analyse de la TF de la fonction de corrélation

Gerbier et al (2003)



Réseau de diffraction pour condensat



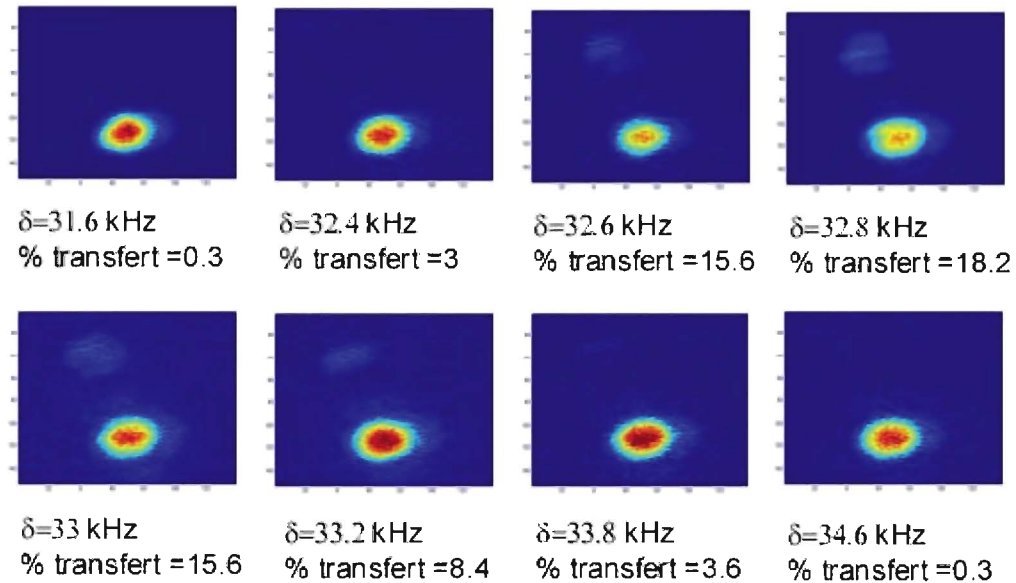


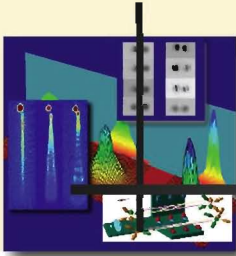
Vélocimétrie Doppler et Spectroscopie de Bragg

Effet Doppler

$$\delta = 2\vec{k}_L \cdot \vec{v}_R + 2\vec{k}_L \cdot \vec{v}_{\text{atoms}}$$

Efficacité de diffraction \Leftrightarrow vitesse & désaccord





Vélocimétrie Doppler et Spectroscopie de Bragg

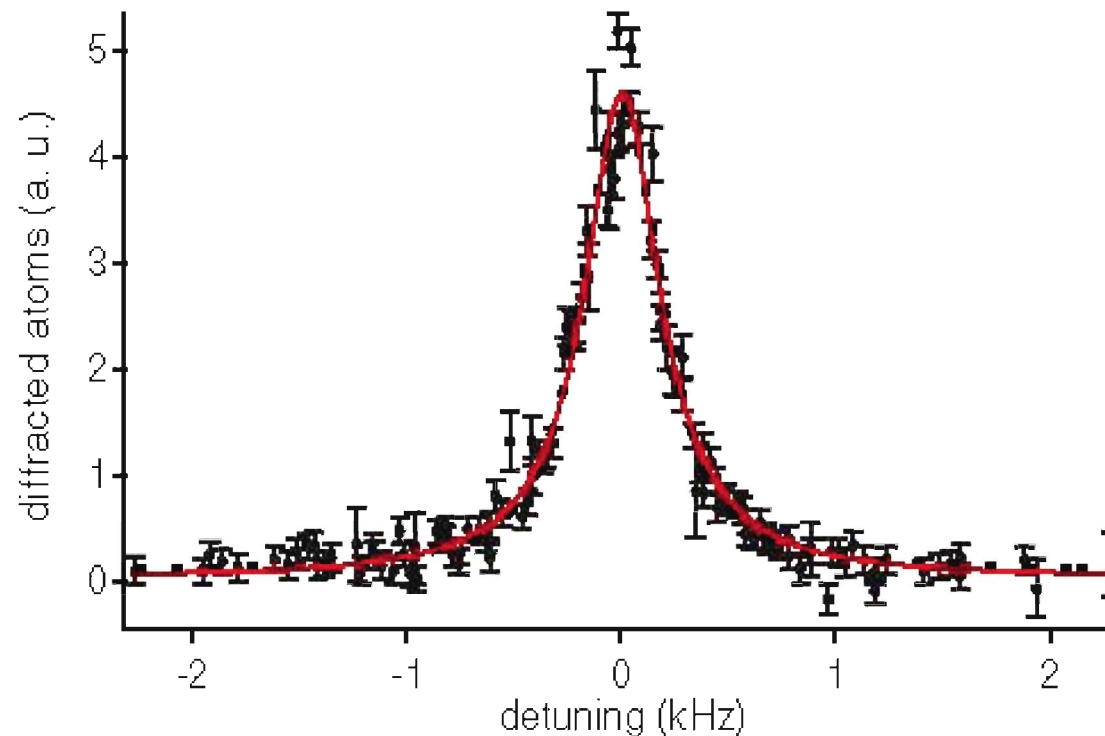
Effet Doppler

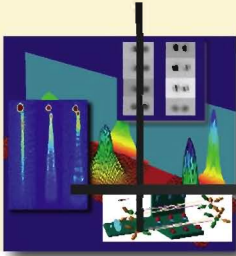
$$\delta = 2\vec{k}_L \cdot \vec{v}_R + 2\vec{k}_L \cdot \vec{v}_{\text{atoms}}$$

Efficacité de diffraction \Leftrightarrow vitesse & désaccord

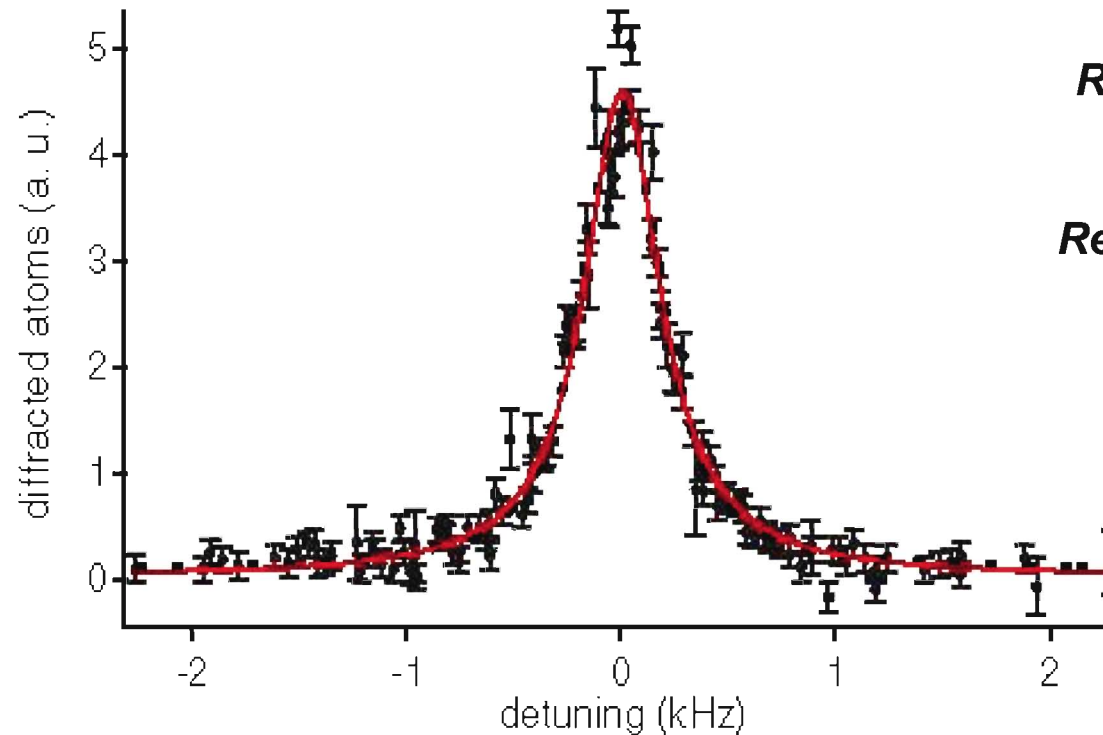
Largeur spectrale = Distribution en vitesses

100Hz rms \Rightarrow 16pK énergie cinétique ou 40 μ m/s





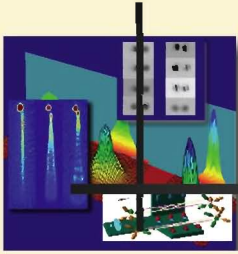
La Cohérence ...



Richard et al (2003)

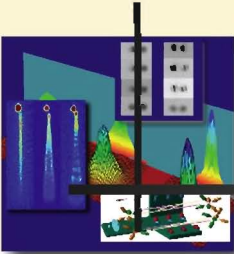
Retter et al (en prep.)

**Dans les systèmes allongés, la cohérence est réduite
La cohérence (même réduite) s'établit très rapidement**

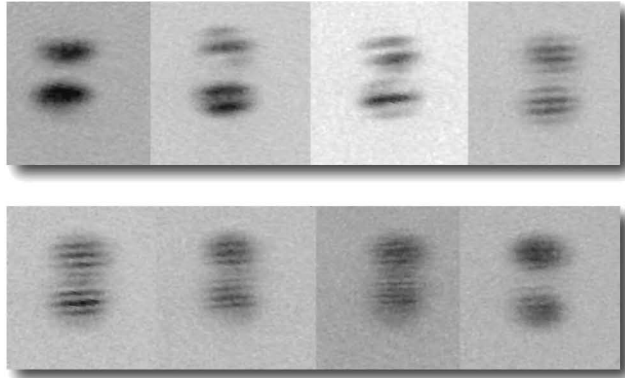


Condensation de Bose-Einstein

- **LA RÉVOLUTION DE 1995**
- **CBE ET LASER À ATOMES**
- **CARACTÉRISTIQUES D'UN LASER À ATOMES**
- **LA COHÉRENCE ...**
- **AUTRES ÉTUDES & LES MONTAGES**

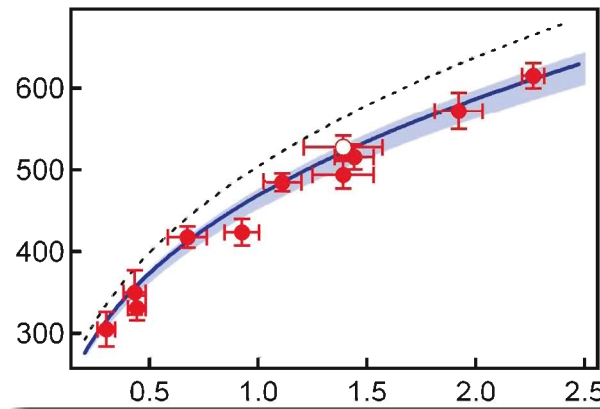


Autres études

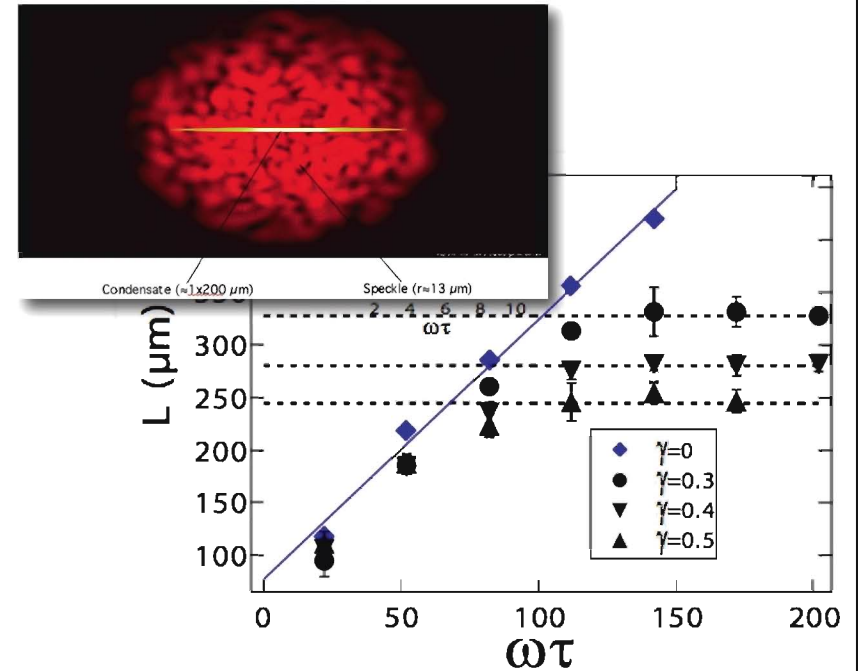


⇒ *Interférométrie avec des condensats*

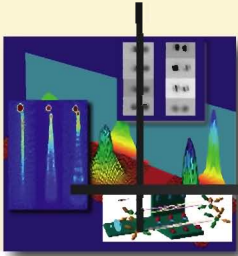
Hugbart et al (2005)



⇒ *Etude de la thermodynamique du CBE*
Gerbier et al (2004)



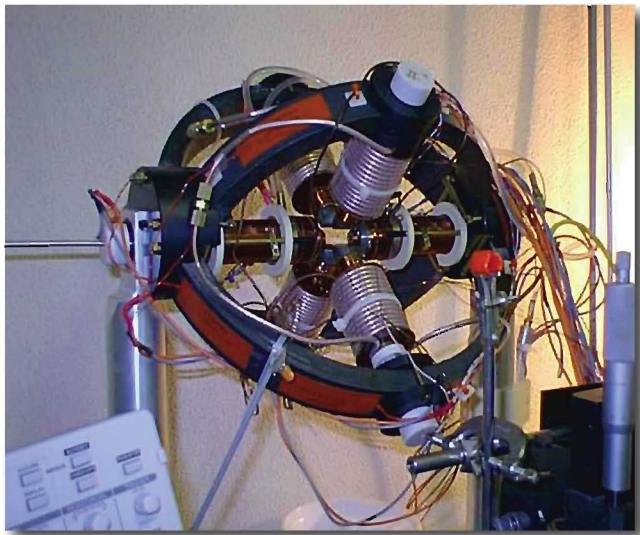
⇒ *Phénomènes de localisation dans des milieux diffusants*
Clément et al (2005)



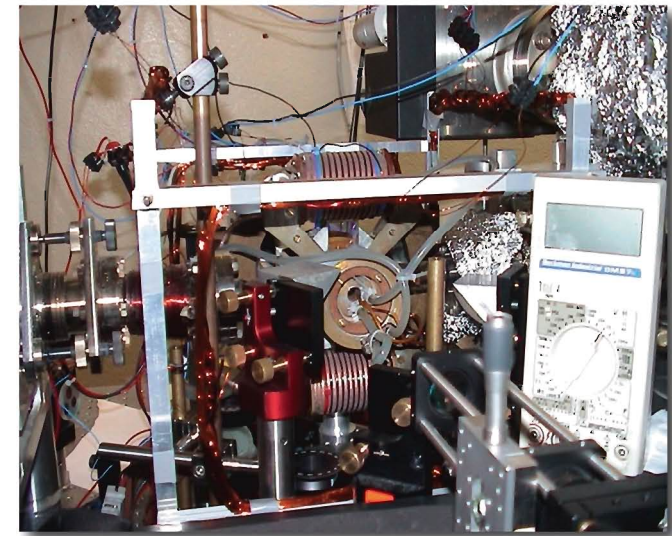
Les montages

2 dispositifs distincts d'étude des sources atomiques cohérentes

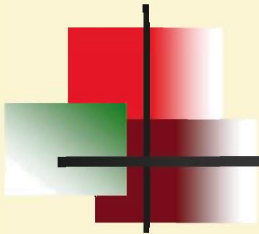
**Etude de la
cohérence des
condensats 1D
(06/1998)**

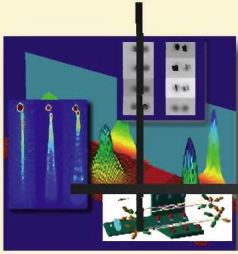


**Source Atomique
Cohérente Versatile
(11/2003)**



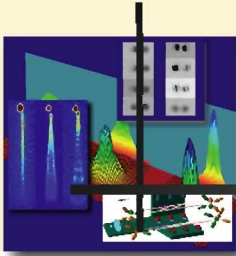
LE FUTUR (PROCHE)





Le futur proche

- **MESURE DE PRÉCISION AVEC DES CONDENSATS (?)**
- **NOUVEAUX INTERFÉROMÈTRES ATOMIQUES**
- **APPLICATIONS À L'ESPACE**



Mesure de précision avec des condensats

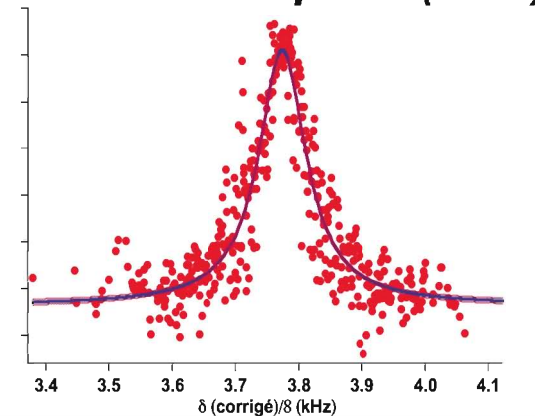
□ Mesure (test) de h/m avec un condensat

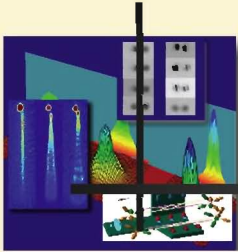
- *Valeur moyenne*
 3773.7 ± 0.5 Hz
- *Valeur théorique*
 3770.9 Hz
- *interactions*
 2.8 ± 0.5 Hz

*Solution : gaz idéal (fermions)
Résonance de Feshbach*

Manip de mélange Rb/K (KRUB)

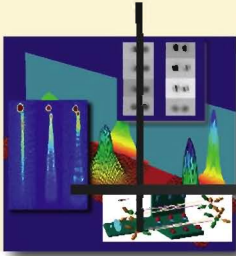
Le Coq et al (2005)



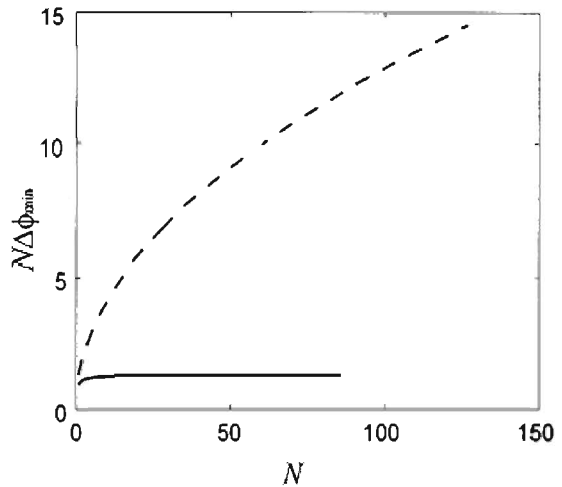


Le futur proche

- **MESURE DE PRÉCISION AVEC DES CONDENSATS (?)**
- **NOUVEAUX INTERFÉROMÈTRES ATOMIQUES**
- **APPLICATIONS À L'ESPACE**



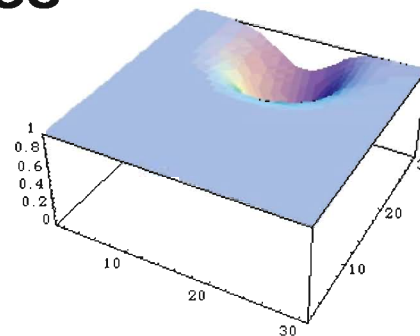
Nouvelles générations d'interféromètres



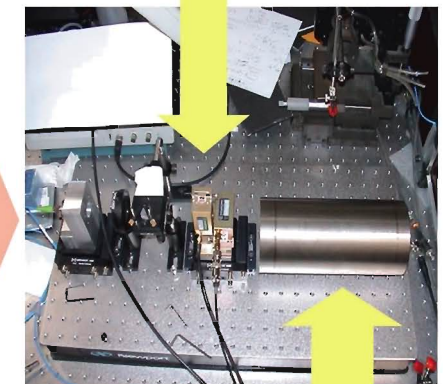
Bouyer et Kasevich (1997)

- ❑ Utilisation (et création) **d'états intriqués**
- ❑ Détection au delà de la limite standard
 - ❑ Sensible même avec peu d'atomes $S/N=10^6$

- ❑ Gyromètre actifs
- ❑ Gyromètres superfluides
 - ❑ CBE dans un tore optique

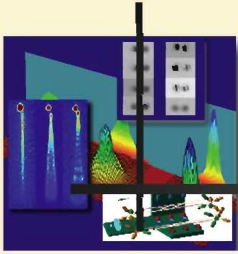


Laser YAG
monolithique ultra-
stable



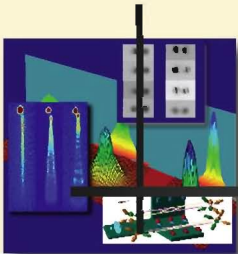
Modulateurs

Télescope de focalisation (invar)

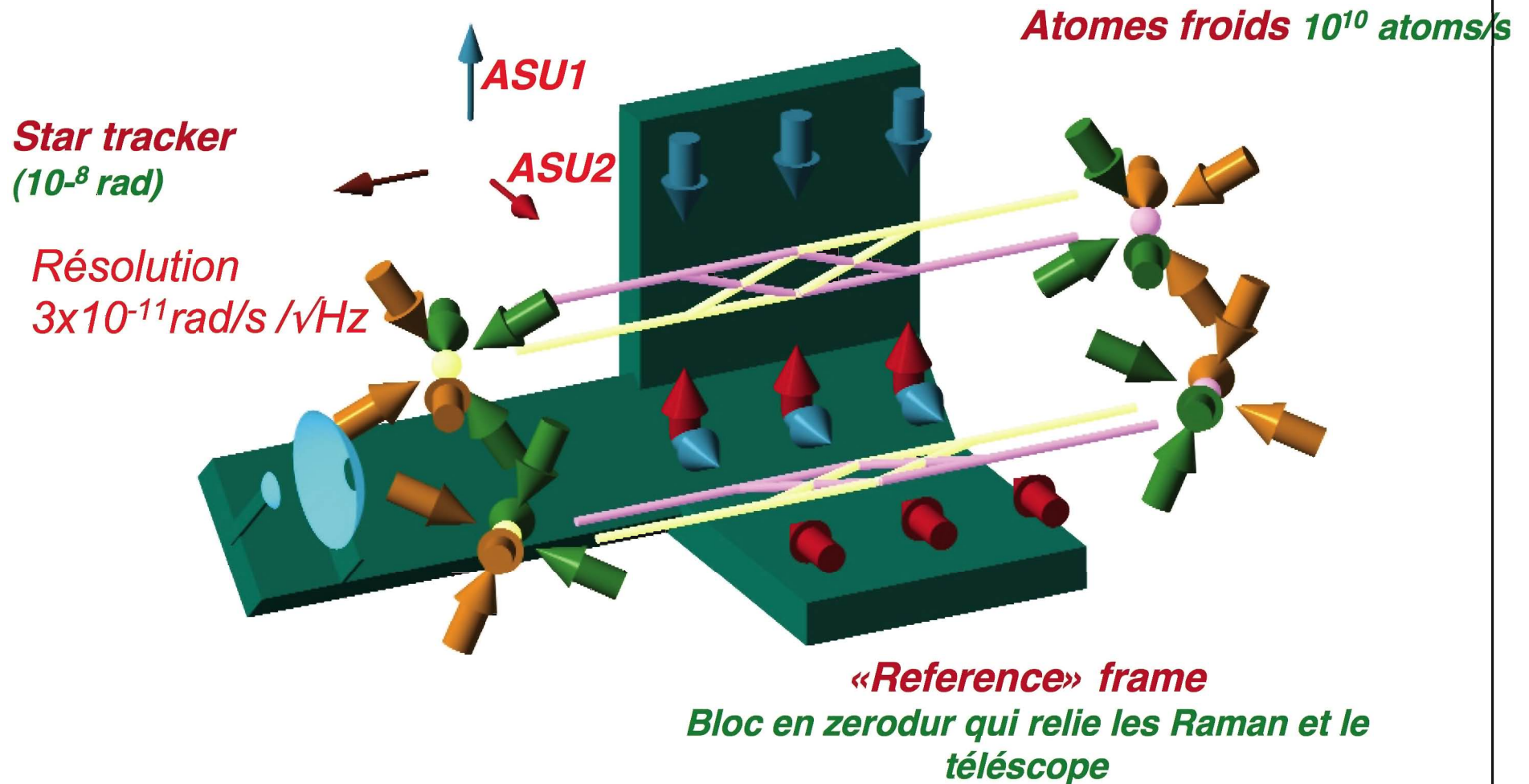


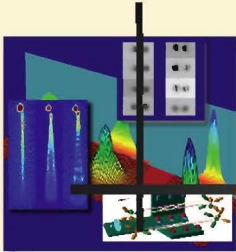
Le futur proche

- **MESURE DE PRÉCISION AVEC DES CONDENSATS**
- **NOUVEAUX INTERFÉROMÈTRES ATOMIQUES**
- **APPLICATIONS À L'ESPACE**

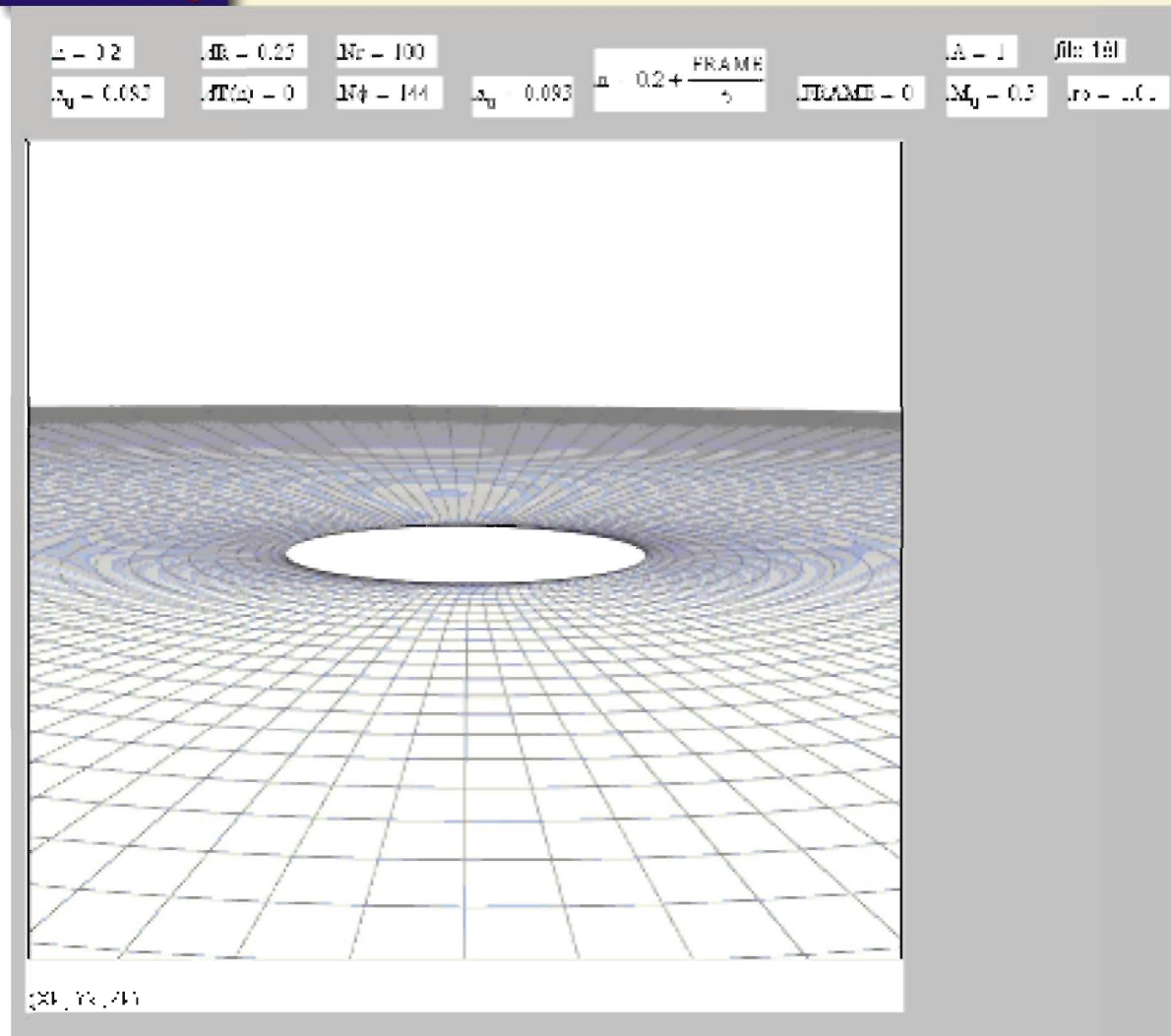


HYPER : Mesurer des effets relativistes



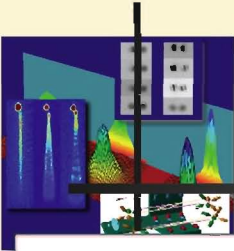


L'effet Lense-Thirring



Effet Relativiste

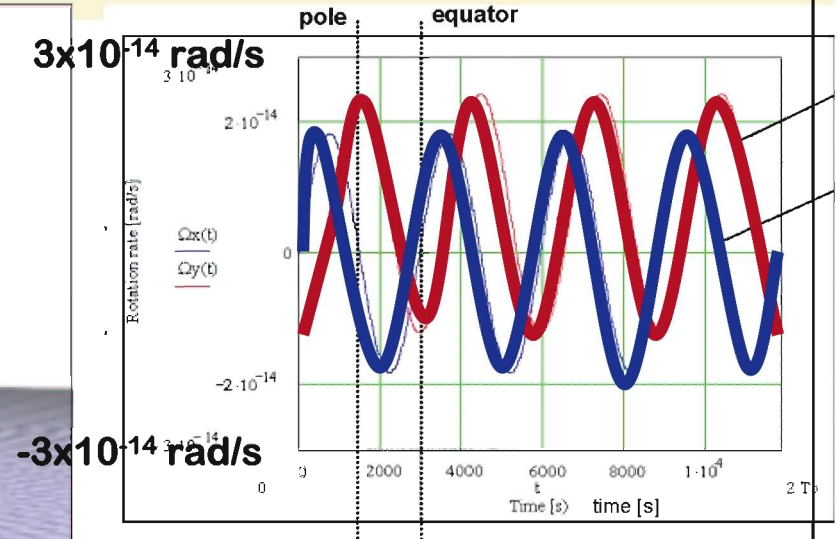
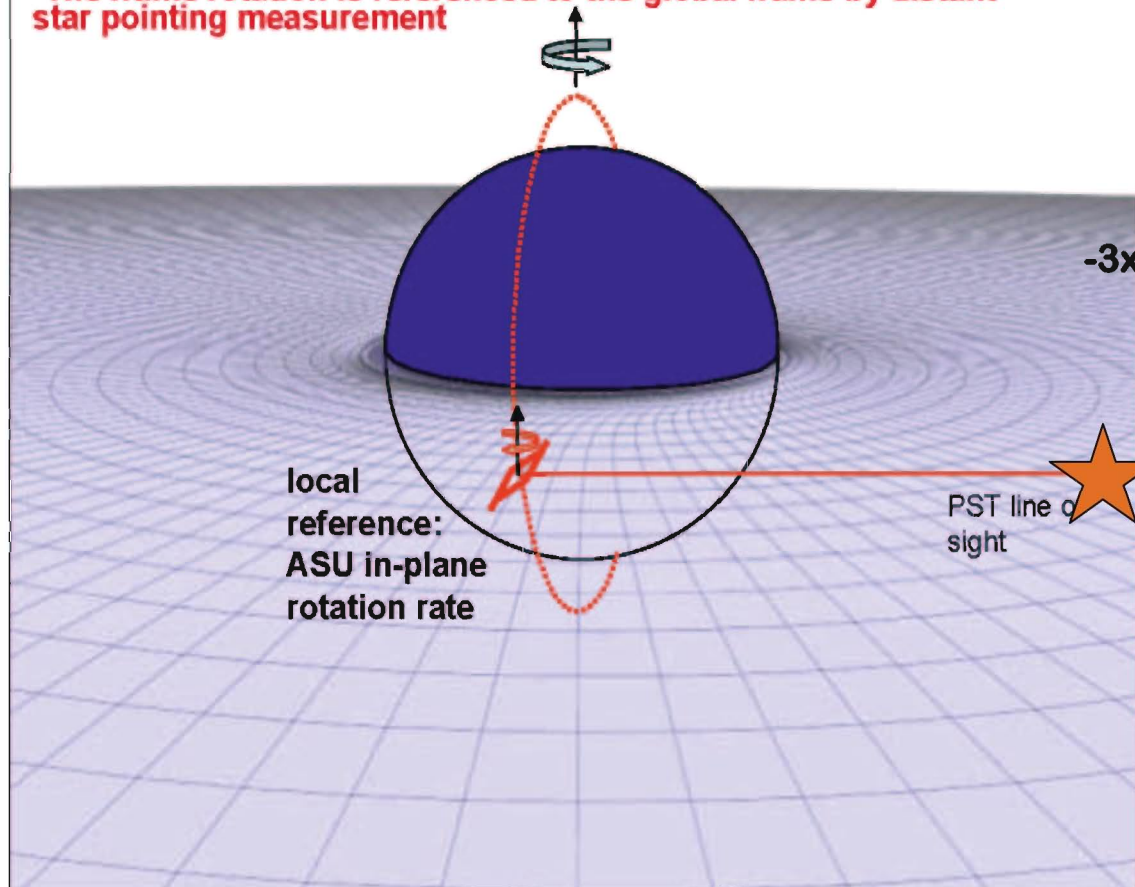
Gravitomagnétisme
Courbure de
l'espace temps
autour d'objets
massifs en rotation



L'effet Lense-Thirring et HYPER

Equatorial plane frame dragging measured by HYPER

- The local inertial frame is probed by the ASU rotation rate measurement
- The frame rotation is referenced to the global frame by distant star pointing measurement



Effet LT

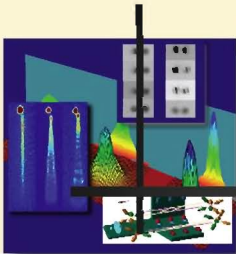
Modulé à 1/2 période d'orbite

2 ASU en quadrature

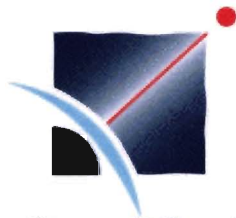
Effet de Sitter

40 à 80 plus gros

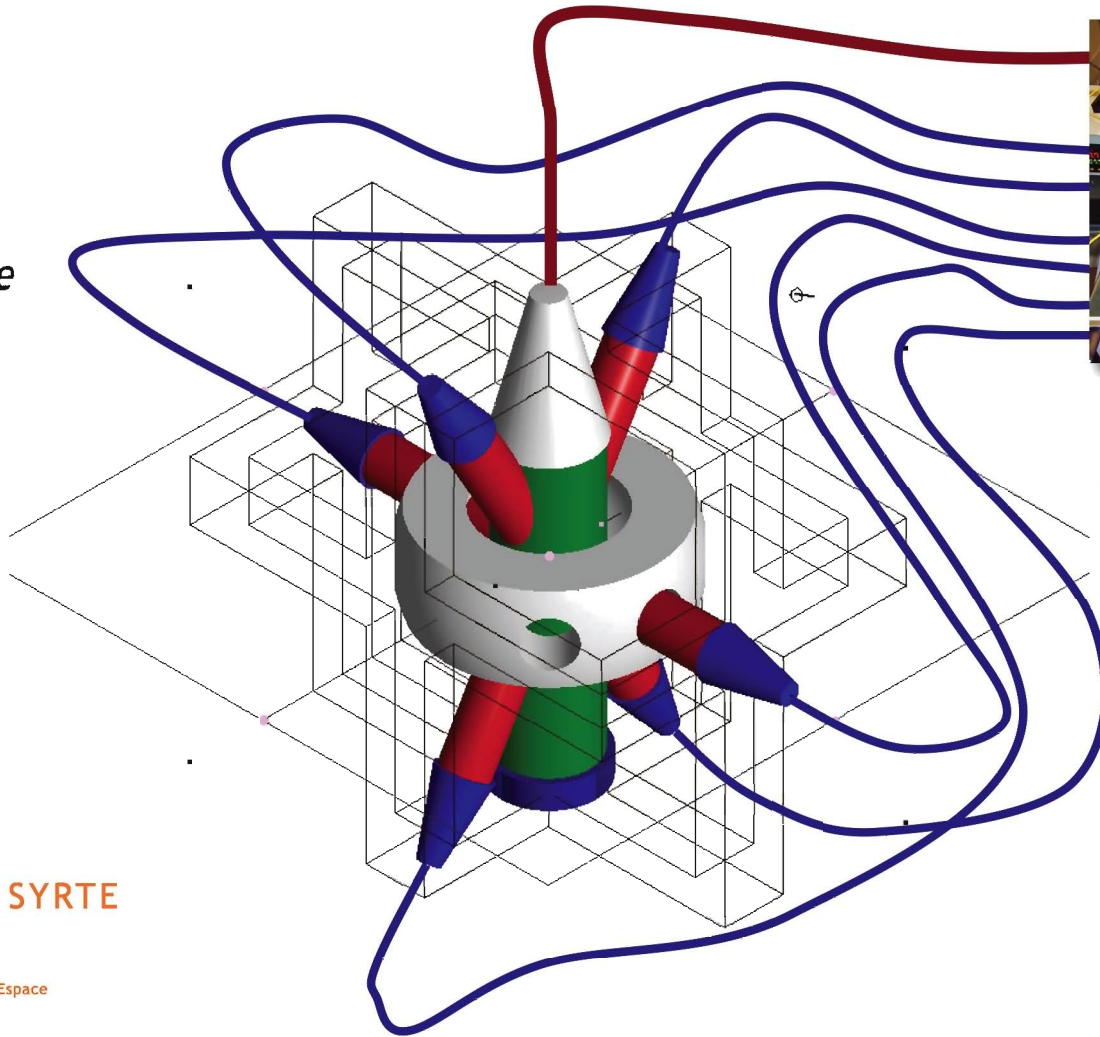
Constant



ICE : Interférométrie à 0-g



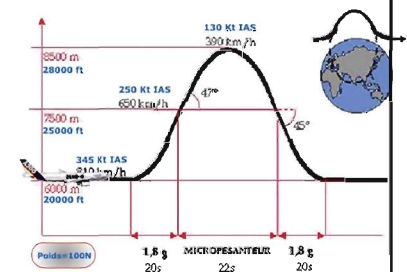
Institut d'Optique



ONERA

L'Observatoire de Paris SYRTE

Systèmes de Référence Temps-Espace



C. Cohen Tannoudji
J. Dalibard
C. Salomon

P. Desbiolles
P. Lemonde
A. Steane
M. Dahan
A. Michaud
C. Aminoff

GOM
C. Bordé
A. Landragin
A. Clairon
N. Dimarg
D. Holleville
J. Fils
F. Yver

BEC
B. Desruelles
V. Boyer
G. Dellanoy

S. Murdoch
S. Rangwala
Y. L.C.
M. Lécrivain

BEC 1D
J. Thywissen
S. Richard
F. Gerbier

J. Retter
M. Hugbard
A. Varon

Laser à Atomes
Y. Le Coq
V. Josse
M. Fauquergue
J.F. Riou
W. Guérin
S. R.

A. Aspect
N. Westbrook
C. Westbrook

M. Kasevich
T. Gustavson
K.G. Haritos
J. McGuirk

Désordre
L. Sanchez-Palancia
D. Clément
J. R., A. V., M. H.
G. Schlyapnikov,
D. Ganghart

Nouveaux Interféromètres
S. Schwartz
F. Impens
C. B., A. L.

BioPhotonique
N. W.
K. Perronet
S. Yoshizawa
D. Fourmy

KRUB
R. Nyman
G. Varoquaux
J.-F. Clément
Y. L.C.

HYPER
E. Rasel, W. Ertmer, G. Bagnasco,
S. Airey, L. Cacciaputi

Groupe d'optique atomique
I. Bouchoule, D. Boiron
A. Villing, F. Moron
LCFIO et IOTA

ICE
A. Bresson, P. Touboul
A.L.