

Les condensats de Bose-Einstein : Systèmes modèles pour la matière condensée

Hélène Perrin

Laboratoire de physique des lasers, CNRS-Université Paris Nord

séminaire FIP – 6 mars 2012



1995 : premiers condensats de gaz dilués



Rb

E. Cornell



Na

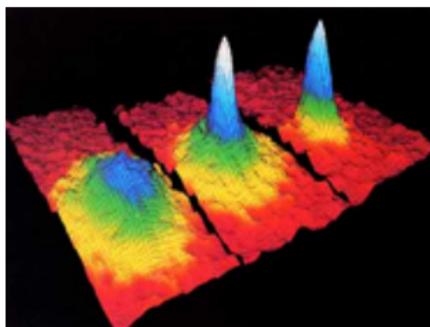
C. Wieman



W. Ketterle

prix Nobel de
physique 2001

$T > T_C$



$T < T_C$



Condensats et mers de Fermi

Les éléments condensés à ce jour

	alcalins																gaz rares								
1998	H	alcalino-terreux																						2001	He
1997	Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne	
1995	Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar	
1999/ 2001	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr							
1995	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe							
2002	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn							
	Fr	Ra	Ac																						
																	2011/2012				2003				
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	lanthanides										
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Em	Md	No	Lr											

+ BEC de molécules : deux fermions (K_2 , Li_2) ou deux bosons (Cs_2)

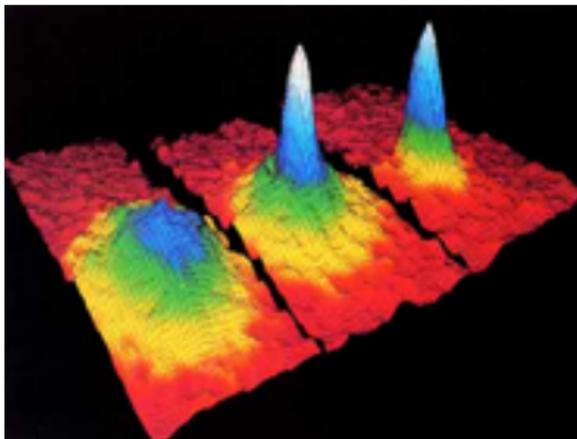
+ gaz de Fermi moléculaire, fermion+boson (KRb)

Plan de l'exposé

- 1 Qu'est-ce qu'un condensat ?
- 2 Méthodes expérimentales
- 3 Un système largement accordable
- 4 Système modèle

Introduction aux gaz dégénérés

Qu'est-ce qu'un condensat ?



Bosons et fermions

Facteur d'occupation des états d'énergie :

fermions : électrons, neutrons, protons... ; spin 1/2, 3/2...

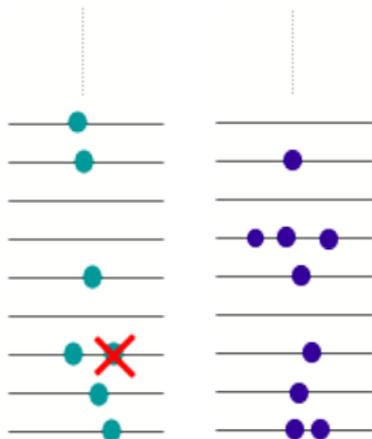
bosons : photons, composés d'un nb pair de fermions... ; spin 0, 1, 2...

Loi de **Fermi-Dirac**

$$f(E) = \frac{1}{e^{\beta(E-\mu)} + 1}$$

$$0 < f < 1$$

Principe de Pauli



Loi de **Bose-Einstein**

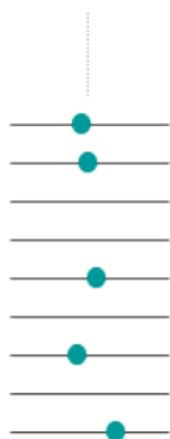
$$f(E) = \frac{1}{e^{\beta(E-\mu)} - 1}$$

f n'est pas bornée

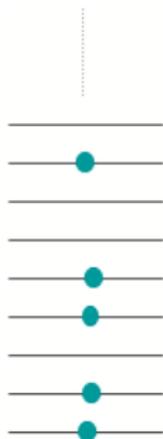
$$\beta = 1/k_B T ; \mu : \text{potentiel chimique}$$

Fermions à basse température

Fermions dégénérés : mer de Fermi



$T > T_F$



$T \sim T_F$

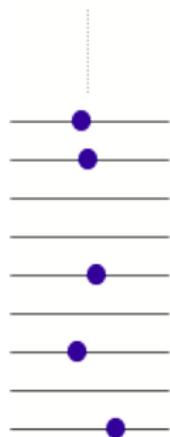


$T < T_F$

E_F

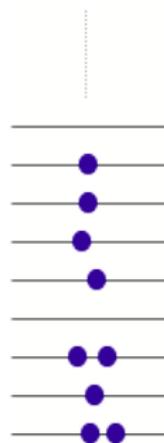
Bosons à basse température

Condensation de Bose-Einstein : **accumulation macroscopique** de particules dans l'**état fondamental**

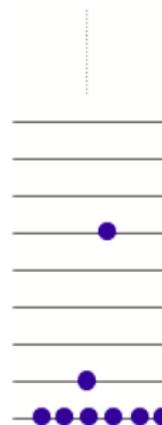


$$T > T_C$$

$$N_0 \ll N$$



$$T \sim T_C$$



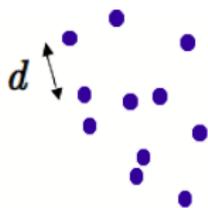
$$T < T_C$$

$$N_0 \sim N$$

Température critique

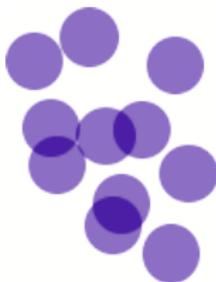
Critère de dégénérescence : plus d'un atome par état.

Taille d'un état : $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2\pi m k_B T}}$ longueur d'onde de Broglie



$$T > T_C$$

$$\lambda \ll d$$



$$T \sim T_C$$

$$\lambda \sim d$$



$$T < T_C$$

$$\lambda > d$$

une seule fonction
d'onde commune à
toutes les particules ?

Température critique

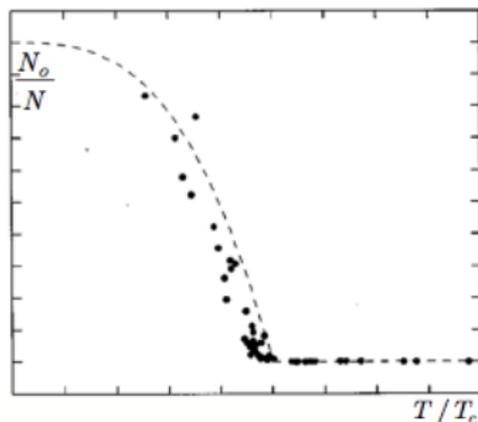
A $T = T_C$ tel que $n\lambda^3 \sim 1$: **transition de phase**
condensation dans l'état fondamental du système.

Dans une **boîte** : $n\lambda^3 > 2.6$

Dans un **piège harmonique** :

$$k_B T_C = \hbar\omega_0 N^{1/3} \gg \hbar\omega_0$$

$$\frac{N_0}{N} = 1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^3$$



Ordres de grandeur : $N = 10^6$, $\omega_0/2\pi = 50$ Hz

$\Rightarrow T_C = 250$ nK **ultra froid !**

Rôle des interactions

- interactions faibles (gaz dilué)
- une même fonction d'onde pour tous les atomes

interférences entre condensats

longueur de cohérence = taille du nuage

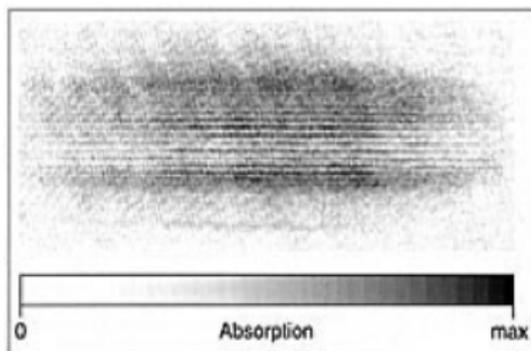
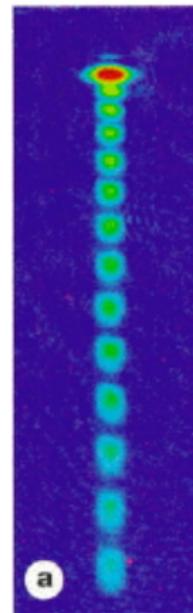


photo MIT 1996

photo
Munich
2000 →



Rôle des interactions

- interactions faibles (gaz dilué)
- une même fonction d'onde pour tous les atomes
- effet des interactions : **champ moyen**
- **equation de Gross-Pitaevskii**

$$\left(\underbrace{-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m}}_{E_{\text{cin}}} + \underbrace{V_{\text{ext}}(\mathbf{r})}_{E_{\text{pot}}} + \underbrace{g|\psi|^2}_{E_{\text{int}}} \right) \psi = \mu \psi$$

$g = \frac{4\pi\hbar^2 a}{m}$ constante de couplage pour les **interactions**
 a longueur de diffusion
 μ potentiel chimique

Hydrodynamique

Formulation hydrodynamique équivalente $\psi(\mathbf{r}, t) = \sqrt{n(\mathbf{r}, t)} e^{i\theta(\mathbf{r}, t)}$

$$(1) \quad \partial_t n + \nabla \cdot (n\mathbf{v}) = 0 \quad \text{équation de continuité}$$

$$(2) \quad m\partial_t \mathbf{v} = -\nabla \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta(\sqrt{n})}{\sqrt{n}} + \frac{1}{2} m v^2 + V_{\text{ext}} + g n \right)$$

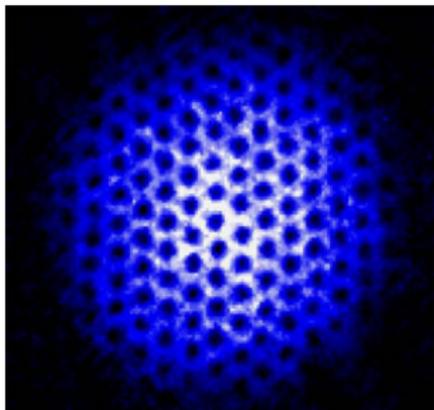
(2) équation d'Euler

$$\mathbf{v} = \frac{\hbar}{m} \nabla \theta \quad \text{vitesse du superfluide} \quad \text{écoulement irrotationnel}$$

Hydrodynamique et superfluidité

Les équation hydrodynamiques décrivent

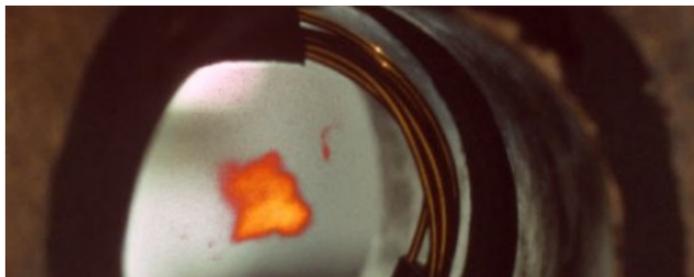
- L'expansion d'un condensat
- Les modes propres (respiration, quadrupolaire...)
- Les excitations : phonons, solitons, particules libres...
- La formation de vortex en présence de rotation



Une signature de la superfluidité :
réseau de vortex dans un condensat
en rotation.

Les atomes froids en pratique

Méthodes expérimentales



Les atomes froids en pratique

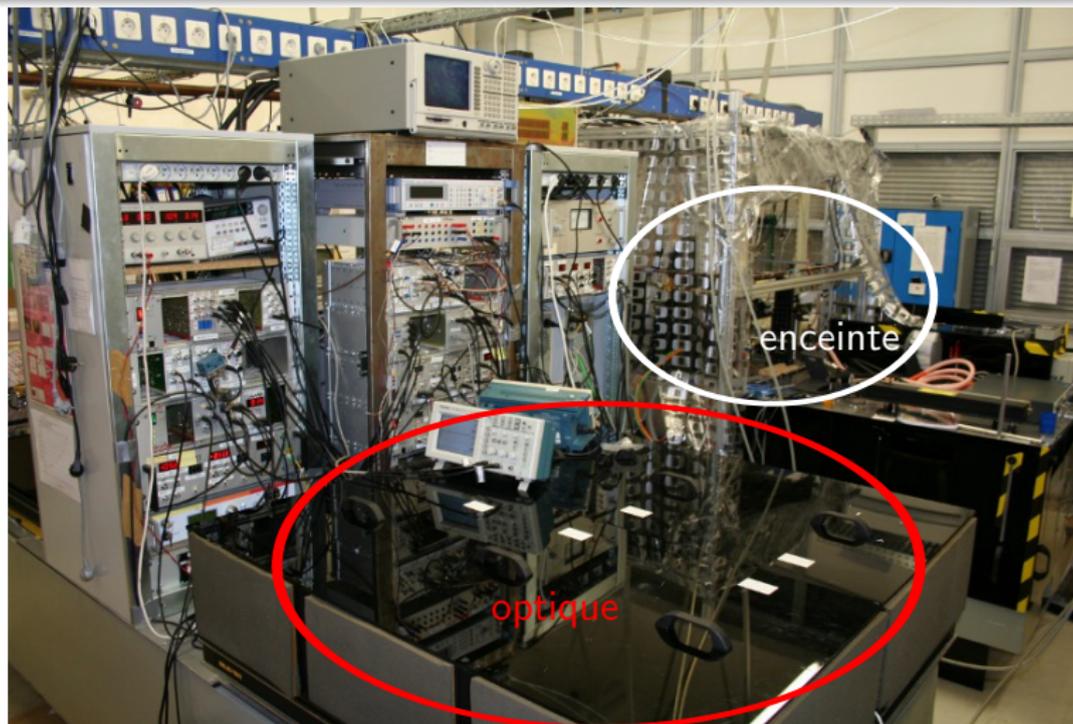
Que signifie « basse température » ? :

froid : $T < 1$ mK

ultra froid : $T < 1$ μ K

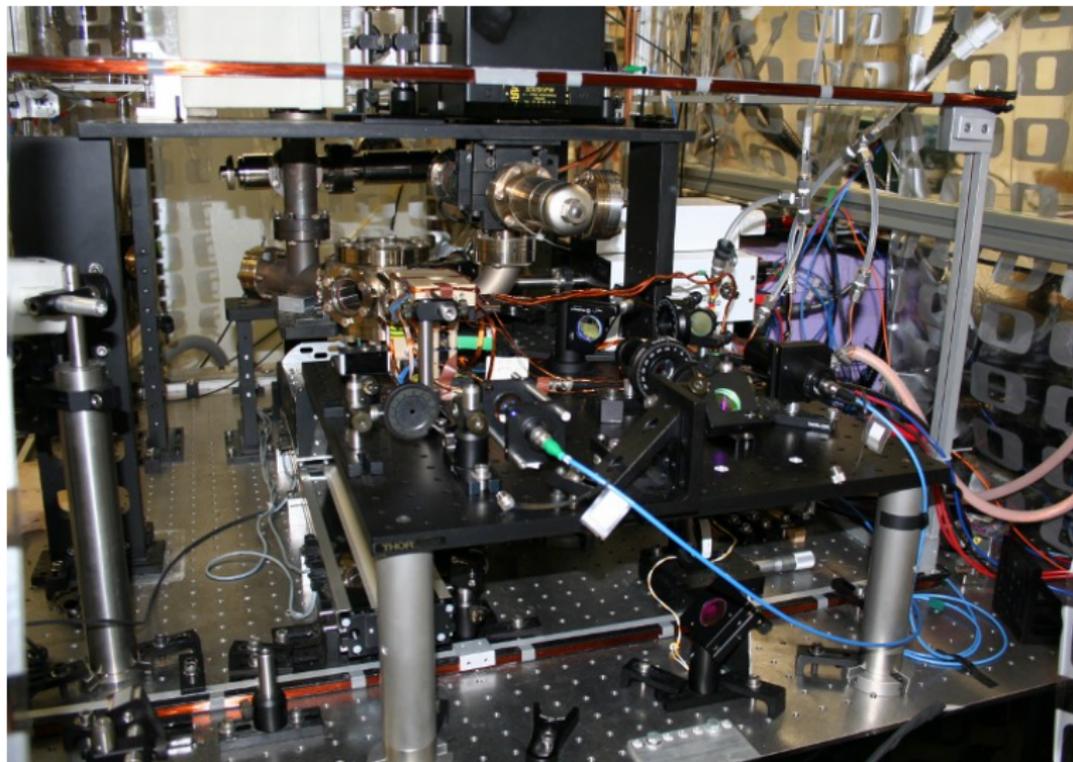
ingrédients : lasers, ultravide, champs magnétiques et RF, électronique et pilotage par ordinateurs...

Aperçu d'un montage typique



vue d'ensemble du montage de condensation du rubidium du LPL

Aperçu d'un montage typique



l'enceinte à vide

Aperçu d'un montage typique

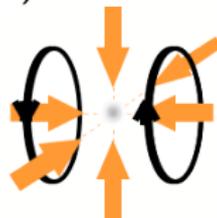


les sources laser

Production d'un condensat

La recette traditionnelle du condensat

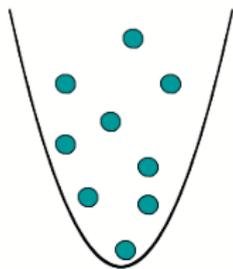
- Très peu d'atomes, beaucoup de **vide** (10^{-11} mbar)
 $n\lambda^3 \sim 10^{-20}$
- pré-refroidissement dans un **piège magnéto-optique** :
 10^8-10^{10} atomes @ 1–100 μK ; $n\lambda^3 \sim 10^{-7}$
- transfert dans un **piège conservatif** (magnétique, optique, hybride...)
- refroidissement par **évaporation** jusqu'à T_C : $n\lambda^3 \sim 1$
- **imagerie** par absorption résonnante de 10^5-10^7 atomes dégénérés @ 1–100 nK.



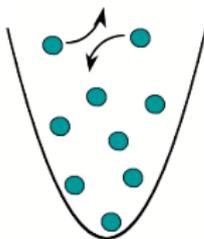
Refroidissement par évaporation

...ou comment souffler sur son café le refroidit

On réduit la profondeur d'un piège conservatif.
L'énergie est redistribuée grâce aux **collisions élastiques**.



équilibre à T_1



on baisse les bords

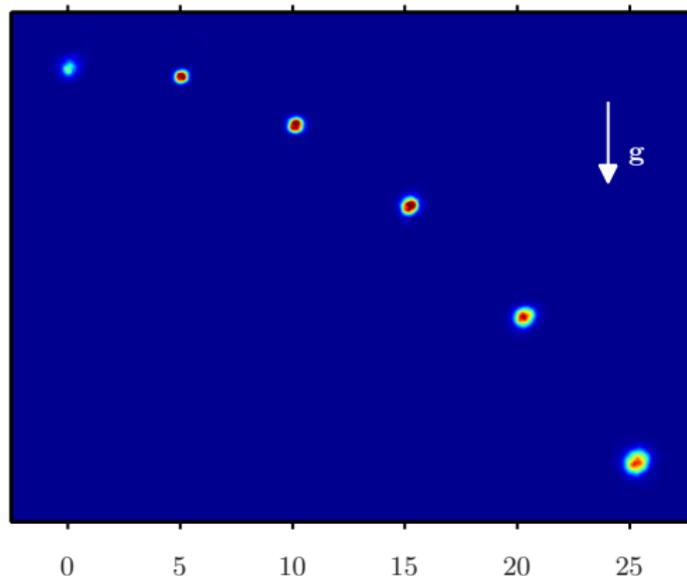


équilibre à $T_2 < T_1$

Observation de l'expansion d'un condensat

Temps de vol

Temps de vol : expansion libre d'un condensat sous l'effet des interactions répulsives et de la dispersion en vitesse initiale.

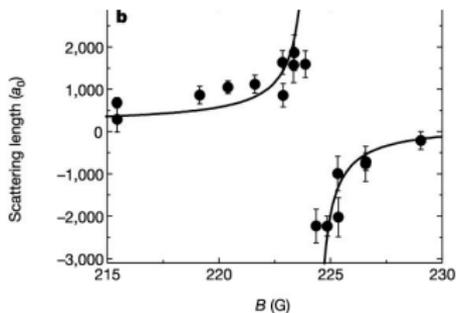


expansion et chute d'un condensat de rubidium (LPL 2011)

t_{tof} [ms]

Les atomes froids comme systèmes contrôlables

Un système largement accordable



Les atomes froids comme systèmes modèles

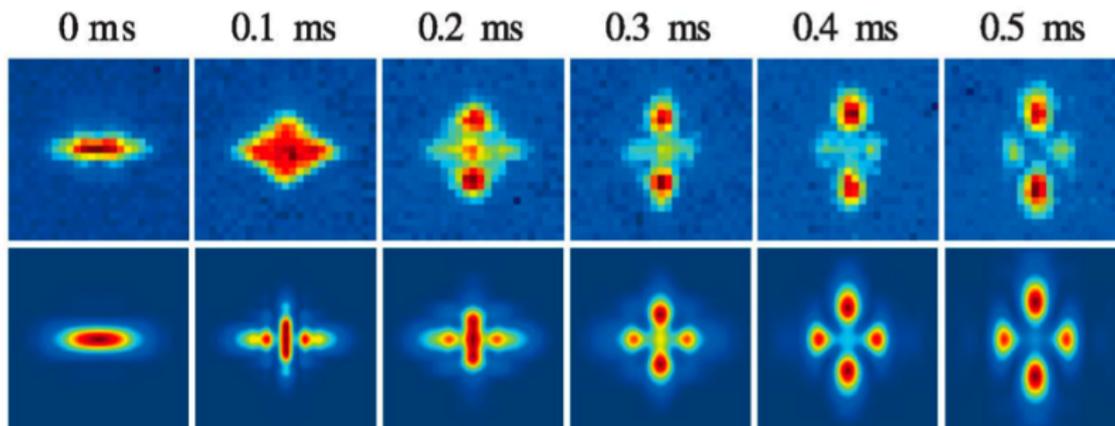
Quels atouts ?

- systèmes simples, dont les paramètres sont bien compris
- température basse et contrôlable jusqu'à ~ 1 nK
- bosons, fermions, ou mélanges, piégés et refroidis jusqu'à la dégénérescence
- interactions accordables
- large variété de géométries de piégeage
- de nombreux outils diagnostiques directs ou indirects
- analogie avec l'optique (laser à atomes, optique quantique...)
- analogie avec la matière condensée (les atomes jouent le rôle des électrons)
- l'idée de Feynman d'un simulateur quantique est à portée de main !

Contrôle des interactions

Exemple d'application : effondrement d'un gaz dipolaire

Effondrement d'un gaz dipolaire de chrome, en ajustant $a = 0$.

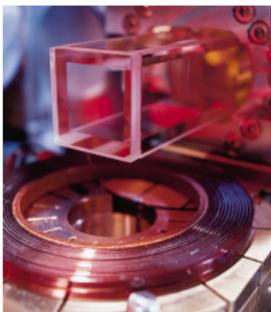


Pfau (Stuttgart), 2008

Voir aussi l'expérience chrome au LPL

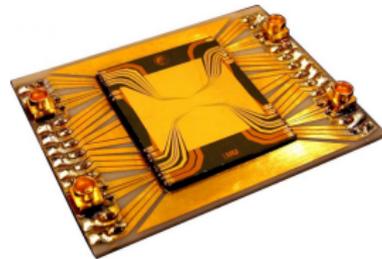
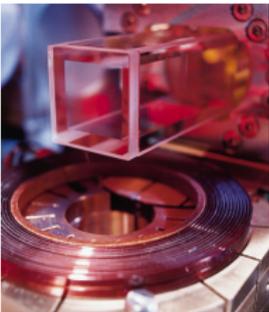
Pièges conservatifs

- pièges magnétiques : bobines macroscopiques...



Pièges conservatifs

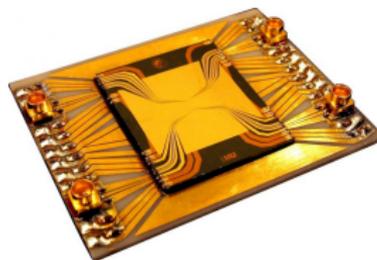
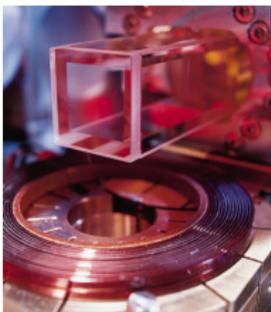
- pièges magnétiques : bobines macroscopiques...



... ou puce à atomes

Pièges conservatifs

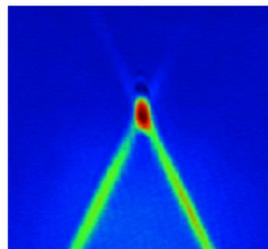
- pièges magnétiques : bobines macroscopiques...



... ou puce à atomes

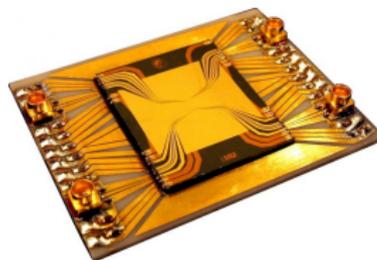
- pièges laser

potentiel \propto intensité ; répulsifs
ou attractifs selon la valeur de
la fréquence laser



Pièges conservatifs

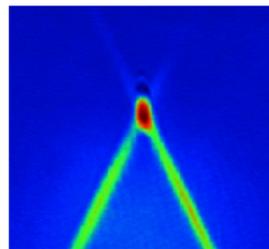
- pièges magnétiques : bobines macroscopiques...



... ou puce à atomes

- pièges laser

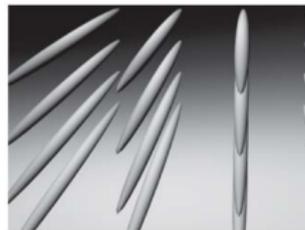
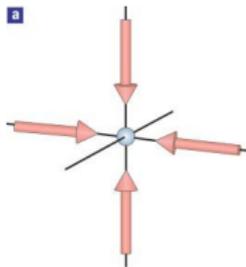
potentiel \propto intensité ; répulsifs
ou attractifs selon la valeur de
la fréquence laser



- potentiels adiabatiques (pièges RF)

Géométries de piégeage

- piège harmonique : 3D, 2D, 1D

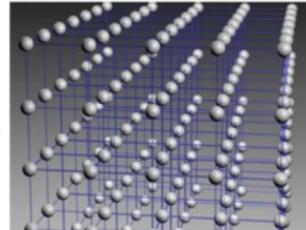
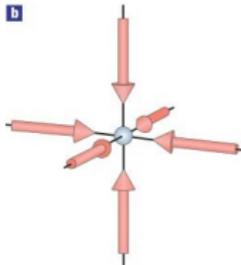


Ex : série de tubes 1D

Géométries de piégeage

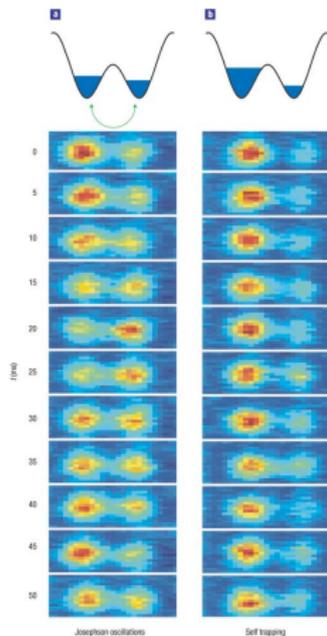
- piège harmonique : 3D, 2D, 1D
- réseaux optiques

un réseau 3D est analogue à un solide cristallin



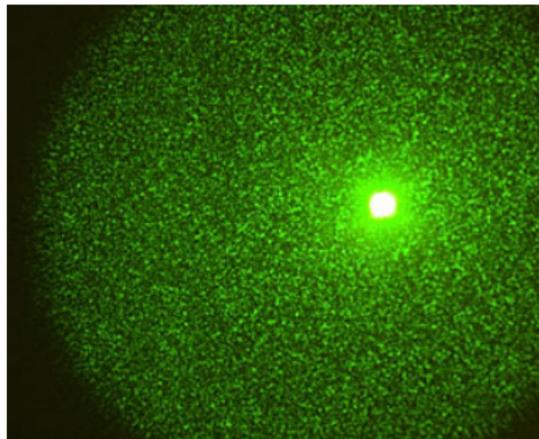
Géométries de piégeage

- piège harmonique : 3D, 2D, 1D
- réseaux optiques
- **double puits** :
M. Oberthaler 2005
oscillations Josephson



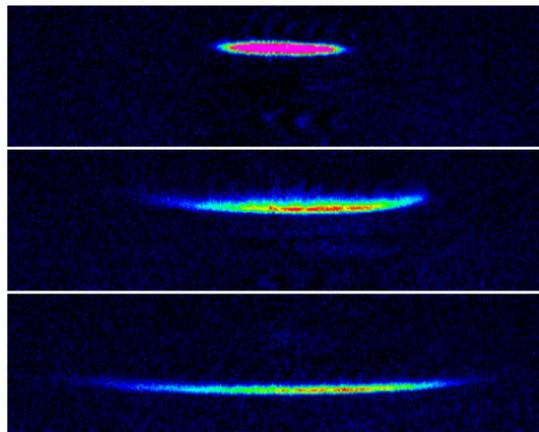
Géométries de piégeage

- piège harmonique : 3D, 2D, 1D
- réseaux optiques
- double puits
- **potentiels désordonnés**



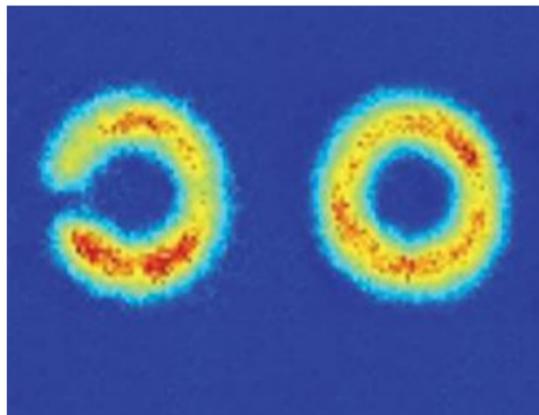
Géométries de piégeage

- piège harmonique : 3D, 2D, 1D
- réseaux optiques
- double puits
- potentiels désordonnés
- piège avec courbure : LPL



Géométries de piégeage

- piège harmonique : 3D, 2D, 1D
- réseaux optiques
- double puits
- potentiels désordonnés
- piège avec courbure
- **pièges annulaires** :
NIST 2011 / LPL



Ces potentiels peuvent être modifiés dynamiquement.

Diagnostics

- **Imagerie par absorption**
- Temps de vol
- Fluo haute résolution
- spectroscopie de Bragg
- spectroscopie RF
- mesures locales de corrélation
- ...

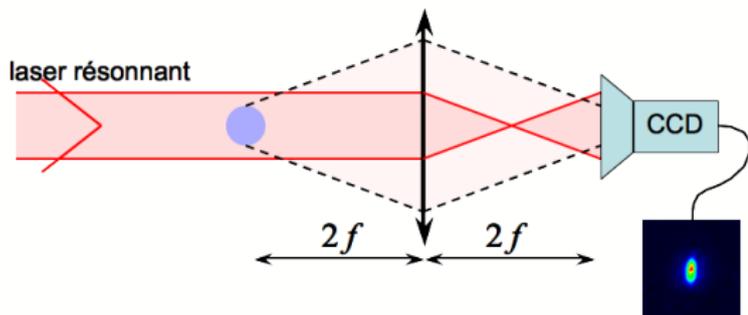
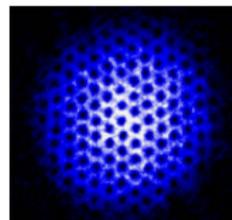
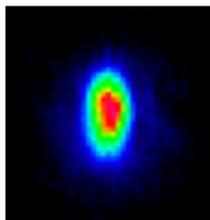


image 2D de la densité intégrée

Diagnostics

- Imagerie par absorption
- **Temps de vol**
- Fluo haute résolution
- spectroscopie de Bragg
- spectroscopie RF
- mesures locales de corrélation
- ...

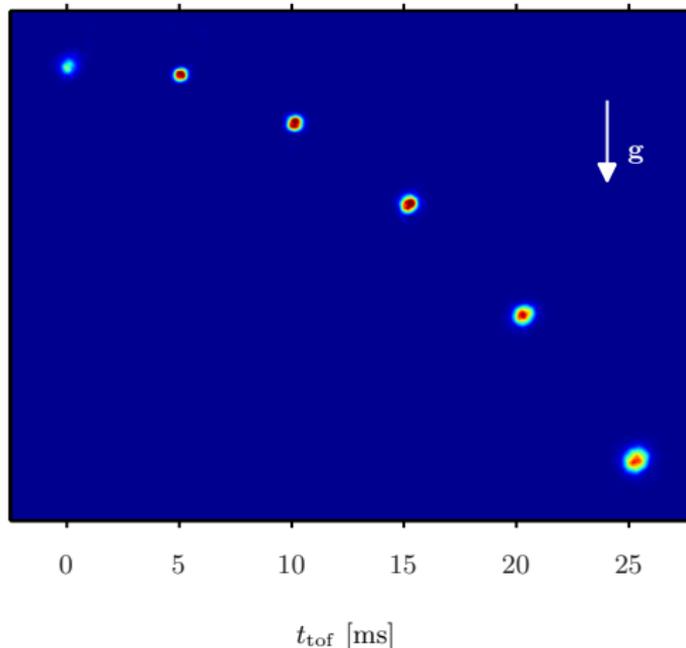
distribution de vitesse...
... ou zoom sur l'état initial



Diagnostics

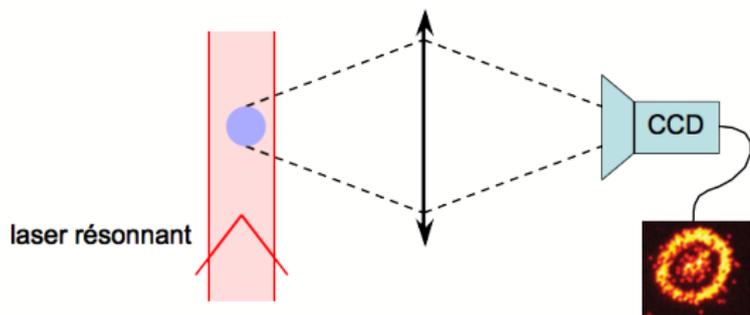
- Imagerie par absorption
- **Temps de vol**
- Fluo haute résolution
- spectroscopie de Bragg
- spectroscopie RF
- mesures locales de corrélation
- ...

expansion et chute d'un BEC (LPL)



Diagnostics

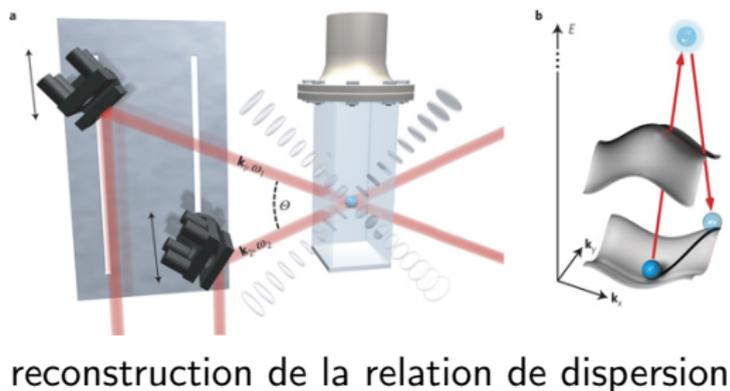
- Imagerie par absorption
- Temps de vol
- **Fluo haute résolution**
- spectroscopie de Bragg
- spectroscopie RF
- mesures locales de corrélation
- ...



S. Kuhr, Munich

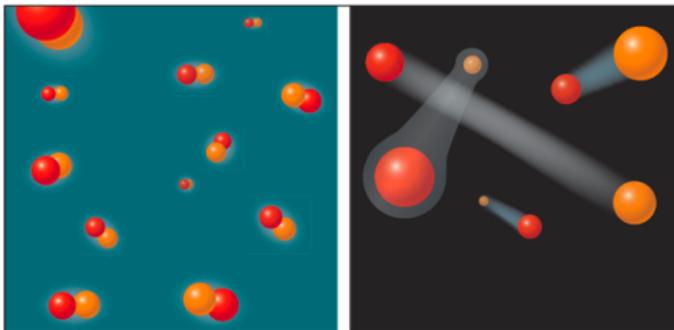
Diagnosics

- Imagerie par absorption
- Temps de vol
- Fluo haute résolution
- **spectroscopie de Bragg**
- spectroscopie RF
- mesures locales de corrélation
- ...



Les atomes froids comme systèmes modèles

Un système modèle pour la physique du solide



Tango or twist? In a magnetic field, atoms in different spin states can form molecules (left). Vary the field, and they might also form loose-knit Cooper pairs.

Science

Un système modèle pour la physique du solide

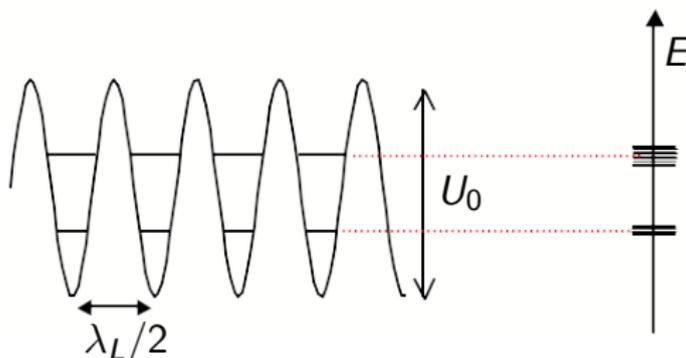
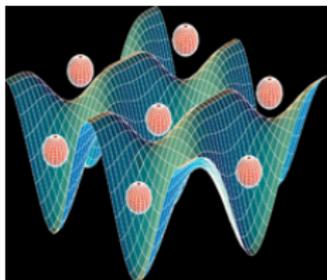
- oscillations de Bloch
- transition métal - isolant de Mott
- oscillations Josephson
- localisation d'Anderson
- spins sur réseau
- superfluidité des bosons ou des paires de fermions (BCS)
- réseau d'Abrikosov de vortex dans un superfluide / un supraconducteur de type II
- physique en dimensions réduites (2D : transition BKT, effet Hall quantique; 1D : gaz de Tonks-Girardeau et liquides de Luttinger)
- ...

Un système modèle pour la physique du solide

- **oscillations de Bloch**
- **transition métal - isolant de Mott**
- oscillations Josephson
- **localisation d'Anderson**
- spins sur réseau
- **superfluidité des bosons ou des paires de fermions (BCS)**
- réseau d'Abrikosov de vortex dans un superfluide / un supraconducteur de type II
- physique en dimensions réduites (2D : transition BKT, effet Hall quantique; 1D : gaz de Tonks-Girardeau et liquides de Luttinger)
- ...

Les réseaux optiques

Réseaux optiques : ondes stationnaires loin de résonance.



Paramètres importants :

- période $\lambda_L/2$; 1ere zone de Brillouin $-\hbar k_L < q < \hbar k_L$
- écart entre bandes $\sim \hbar\omega_{\text{osc}} = 2\sqrt{U_0 E_{\text{rec}}}$ avec $E_{\text{rec}} = \frac{\hbar^2 k_L^2}{2M}$
- largeur de la bande fondamentale / effet tunnel :

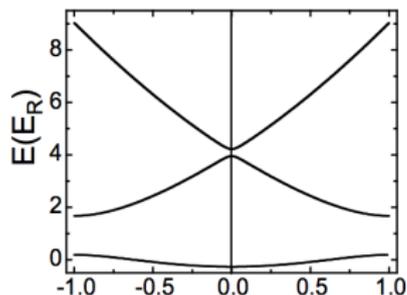
$$J \propto \delta E \propto e^{-2\sqrt{U_0/E_{\text{rec}}}} \quad \text{peut être rendu très faible}$$

- masse effective dans la bande fondamentale :

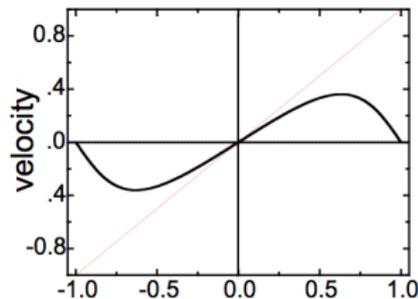
$$M_{\text{eff}} \propto 1/\delta E \quad \text{peut être rendue très grande}$$

Les oscillations de Bloch dans la première bande

Structure de la bande fondamentale :



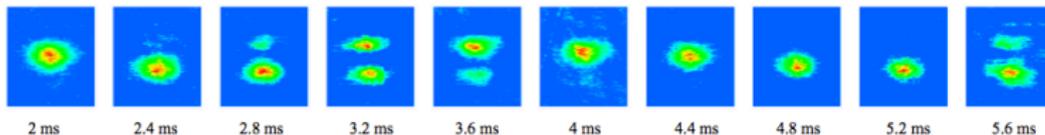
quasimomentum (q)



quasimomentum (q)

La vitesse oscille sous l'action d'une force extérieure constante :

$$\dot{q} = \frac{1}{\hbar} F \Rightarrow q(t) = F \frac{t}{\hbar} \quad \dot{r} = v(t) = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E}{\partial q}(q(t))$$



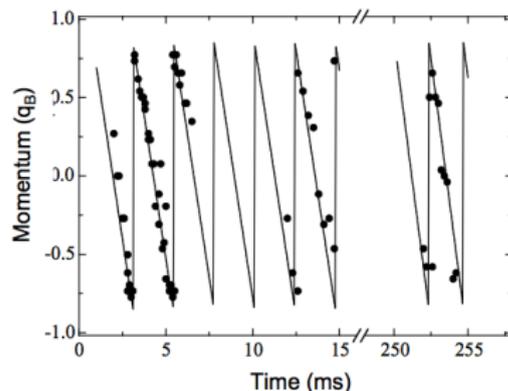
Les oscillations de Bloch pour mesurer la gravité

$F = Mg$. Oscillations de Bloch avec du potassium fermionique

période de Bloch :

$$\tau = \frac{2h}{Mg\lambda_L}$$

LENS (Florence) 2004



On peut observer plus de 20000 oscillations (Innsbruck 2007)... On obtient une mesure de g .

La transition de Mott

Une transition de phase quantique

J : échelle d'énergie pour le **couplage tunnel**

U énergie d'**interaction**

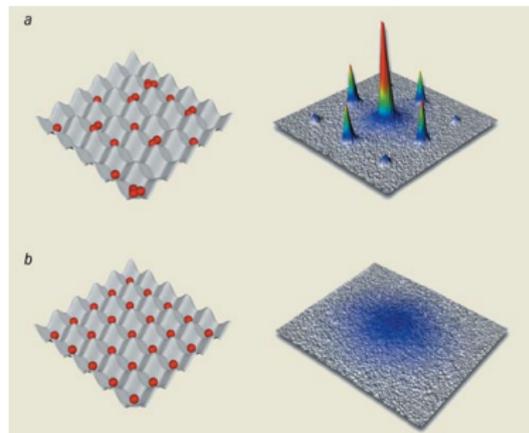
$U < J$ **superfluide**

état cohérent $|\phi\rangle$

(fonction d'onde délocalisée)

$U > J$ **isolant de Mott**

état de Fock $|N\rangle$



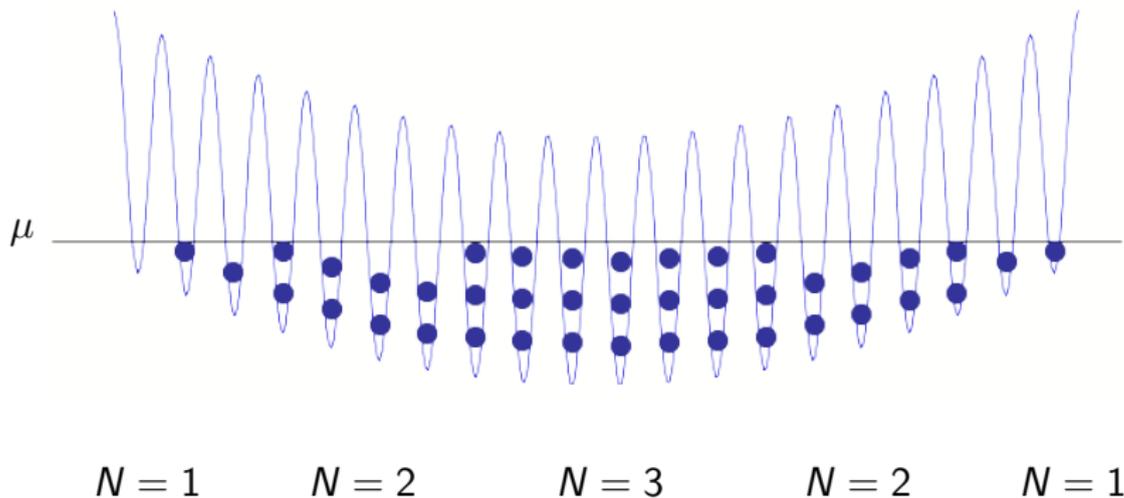
I. Bloch 2002

L'isolant de Mott est un état fortement corrélé. Application :
production de molécules, intrication pour calcul quantique...

L'état de Mott dans un piège

Densité inhomogène

Remplissage variable des couches d'isolant de Mott.



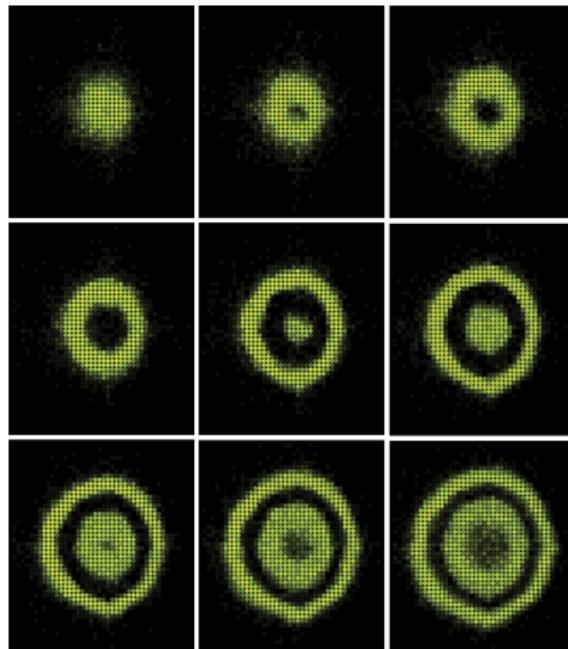
On s'attend à une structure de densité échelonnée (wedding cake).

La transition de Mott revisitée

Imagerie par fluorescence
 haute résolution : les couches
 à $N = 1, 2, 3$ atomes par puits
 sont identifiables atome par
 atome.

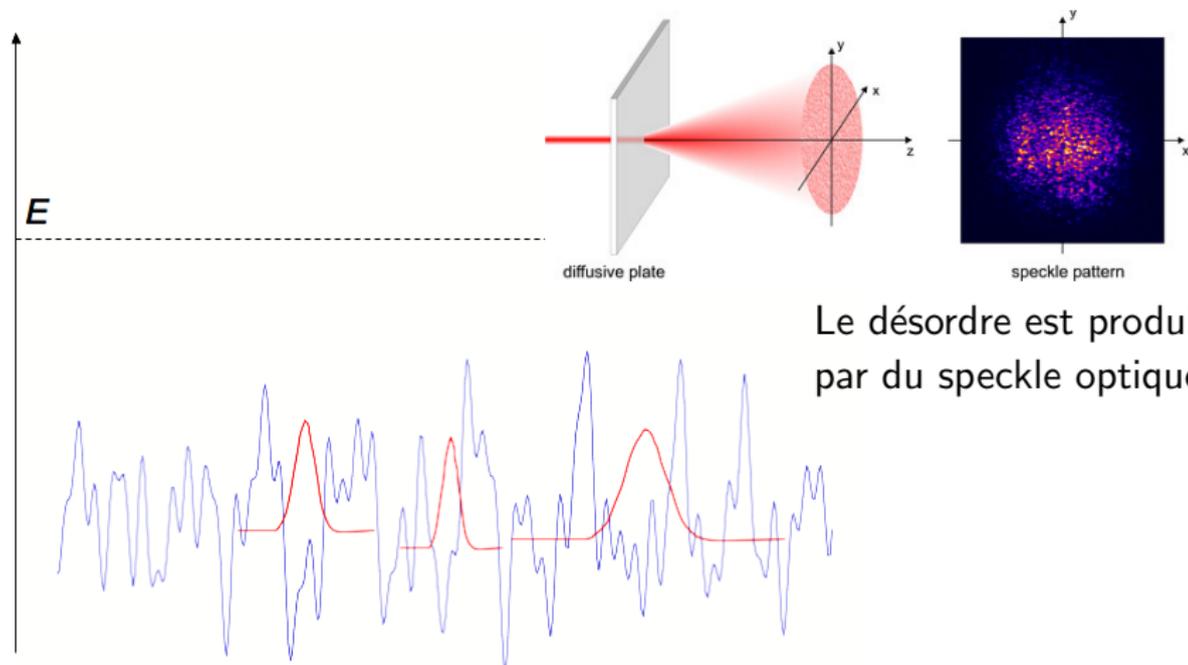
M. Greiner 2011

S. Kuhr et I. Bloch 2011



Localisation d'Anderson

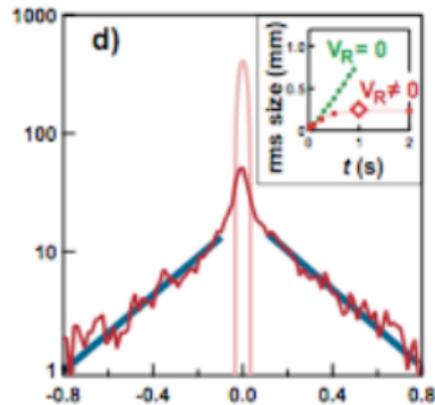
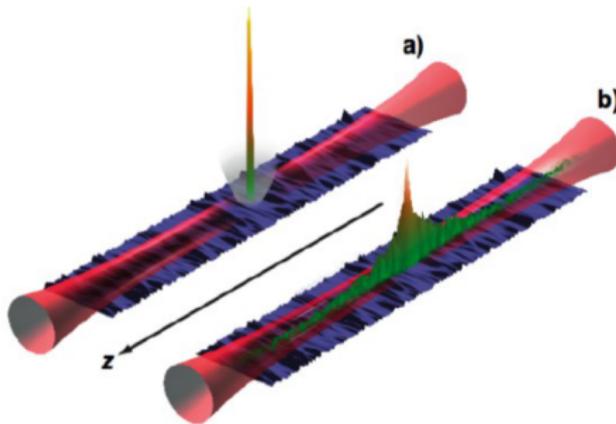
Effet de localisation non triviale due aux interférences. $E > V_D$



Le désordre est produit par du speckle optique.

Localisation d'Anderson à 1D

Localisation exponentielle de la distribution des atomes.

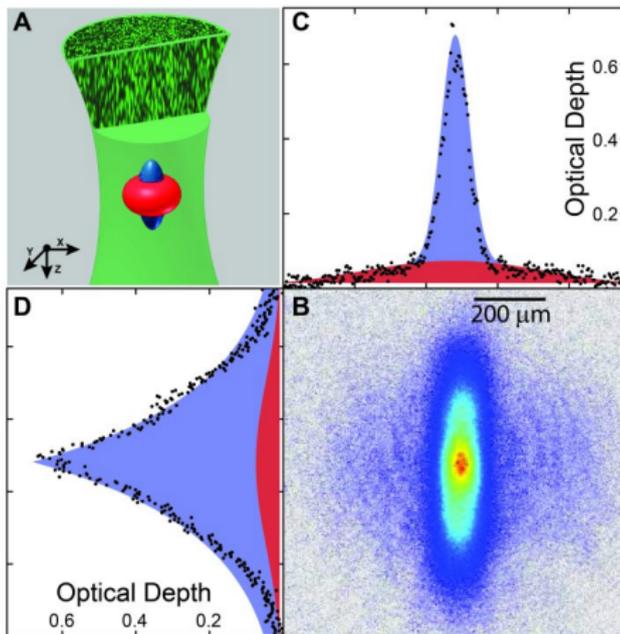


V. Josse / P. Bouyer / A. Aspect 2008

C. Fort / M. Inguscio 2008

Localisation d'Anderson à 3D

Observé à 3D en 2011 ! B. DeMarco (Illinois) & Josse / Aspect

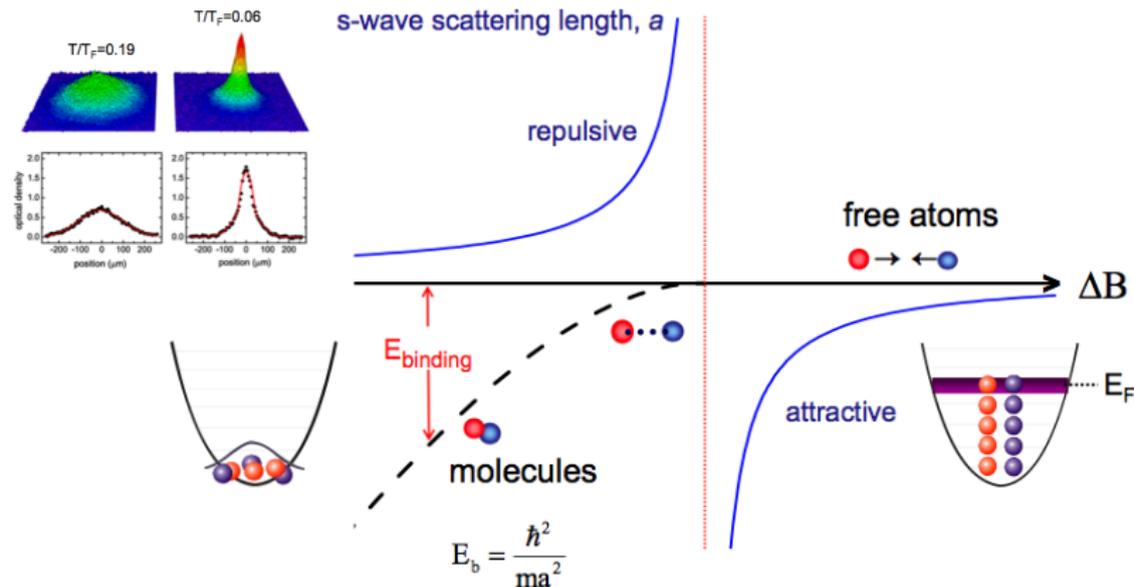


Fermions dégénérés : état BCS

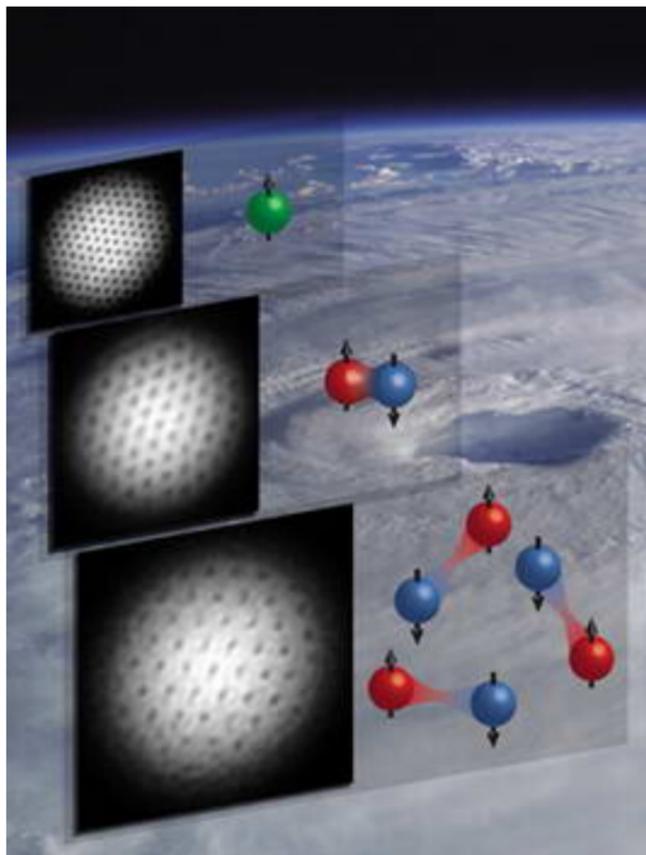
Paires de fermions de spin opposé

Interactions répulsives : état **BEC de molécules** bosoniques

Interactions attractives : état **superfluide BCS** de paires de Cooper



Superfluidité de paires de fermions



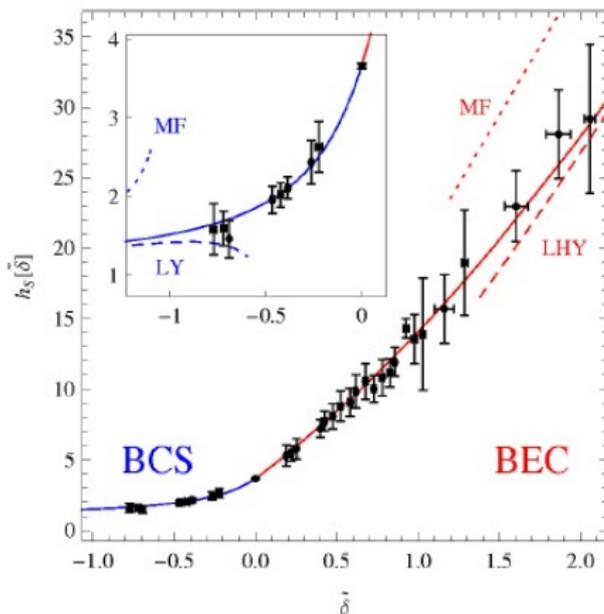
BEC d'atomes

BEC de molécules

Paires de Cooper

W. Ketterle 2006

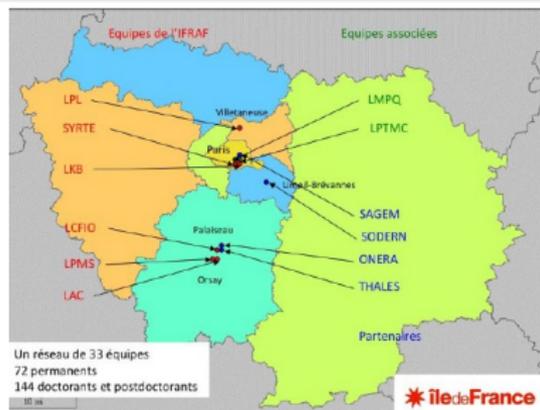
L'équation d'état du gaz de Fermi en interaction



F. Chevy / C. Salomon 2010

Des labos à visiter autour de Paris !

6 laboratoires membres de l'**IFRAF** :
LPL (Villetaneuse), LKB, SYRTE
(Paris), LCFIO (Palaiseau), LAC,
LPTMS (Orsay)



A Villetaneuse : 3 expériences :

- rubidium superfluide dans un anneau
- sodium sur puce
- chrome dipolaire

www-lpl.univ-paris13.fr/bec

Venez visiter !

