

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

Hélène Perrin

Laboratoire de physique des lasers, CNRS-Université Paris Nord

séminaire du M2 de matière condensée – 30 novembre 2011



1995 : premiers condensats de gaz dilués



Rb

E. Cornell



Na

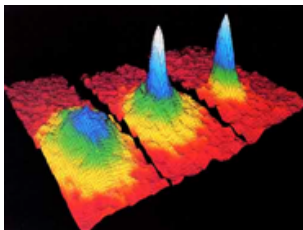
C. Wieman



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	2009		2004												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												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														

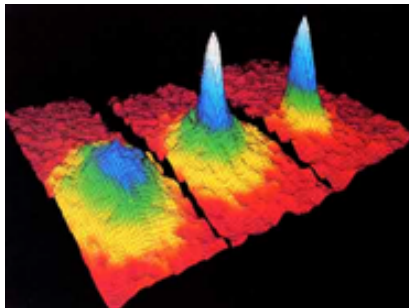
- + BEC de molécules : deux fermions (K_2 , Li_2) ou deux bosons (CS_2)
- + gaz de Fermi moléculaire, fermion+boson (KRb)

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...

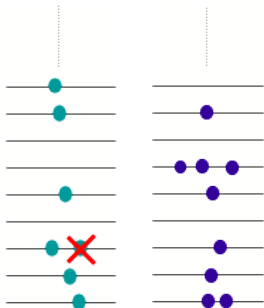
bosons : photons, composés d'un nb pair de fermions... ; spin 0, 1, 2...

Loi de **Fermi-Dirac**

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

$$0 < f < 1$$

Principe de Pauli



Loi de **Bose-Einstein**

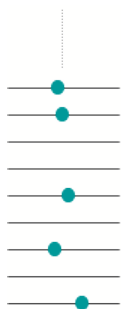
$$f(E) = \frac{1}{e^{\beta(E-\mu)} - 1}$$

f n'est pas bornée

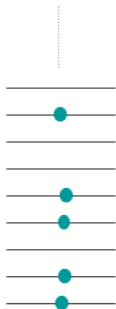
$$\beta = 1/k_B T ; \mu : \text{potentiel chimique}$$

Fermions à basse température

Fermions dégénérés : mer de Fermi



$T > T_F$



$T \sim T_F$

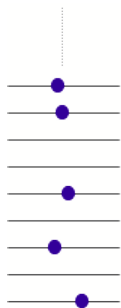


$T < T_F$

E_F

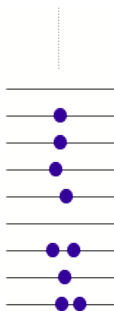
Bosons à basse température

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

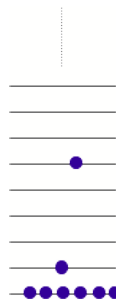


$$T > T_C$$

$$N_0 \ll N$$



$$T \sim T_C$$



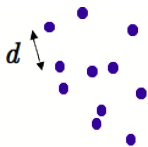
$$T < T_C$$

$$N_0 \sim N$$

Température critique

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

Taille d'un état : $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2\pi mk_B T}}$ 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

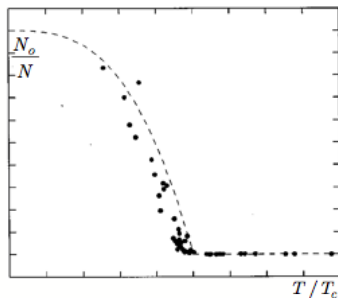
A $T = T_C$ tel que $n\lambda^3 \sim 1$: **transition de phase**
condensation dans l'état fondamental du système.

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

$\implies T_C = 250$ 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

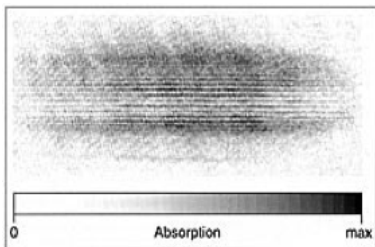
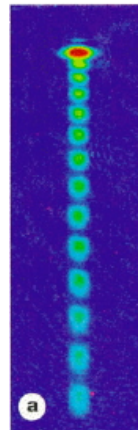


photo MIT 1996

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

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

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

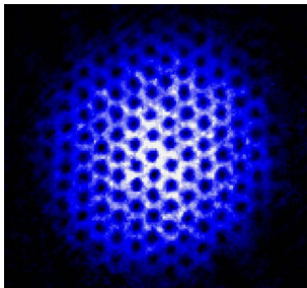
(2) équation d'Euler

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

Hydrodynamique et superfluidité

Les équation hydrodynamiques décrivent

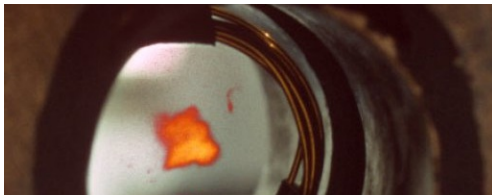
- L'expansion d'un condensat
- Les modes propres (respiration, quadrupolaire...)
- Les excitations : phonons, solitons, particules libres...
- La formation de vortex en présence de rotation



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

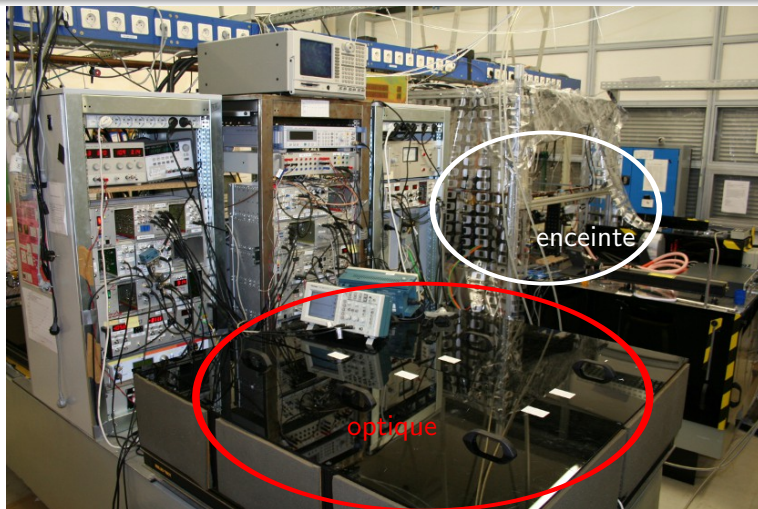
Que signifie « basse température » ? :

froid : $T < 1$ mK

ultra froid : $T < 1$ μ K

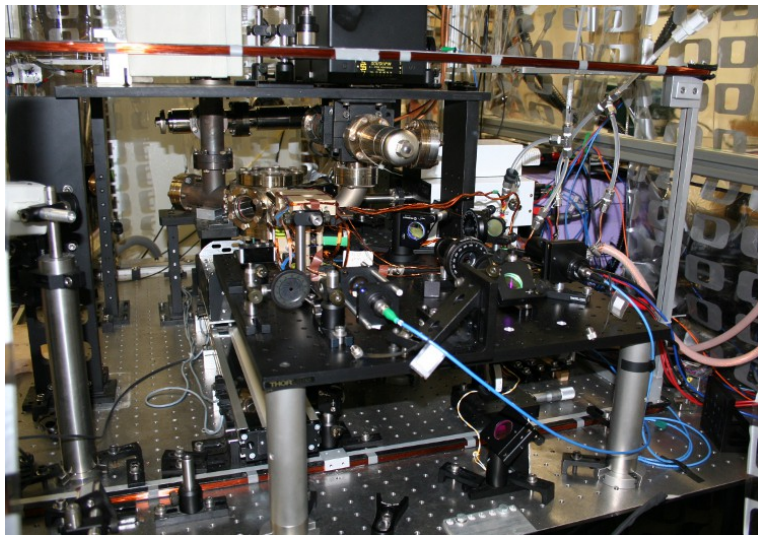
ingrédients : lasers, ultravide, champs magnétiques et RF, électronique et pilotage par ordinateurs...

Aperçu d'un montage typique



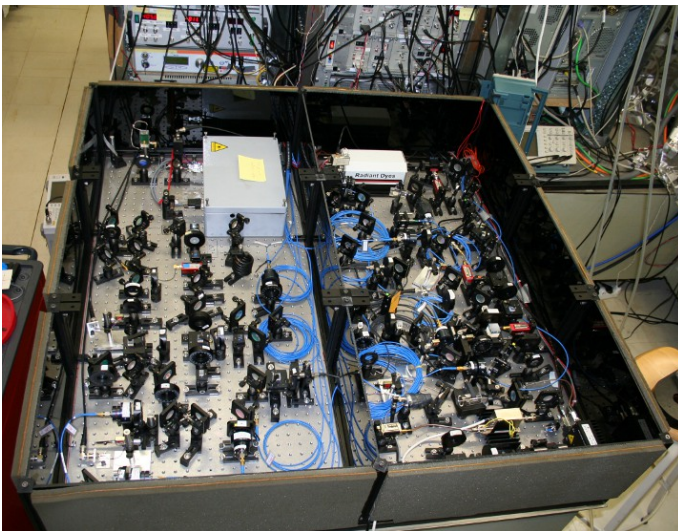
vue d'ensemble du montage de condensation du rubidium du LPL

Aperçu d'un montage typique



l'enceinte à vide

Aperçu d'un montage typique

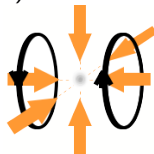


les sources laser

Production d'un condensat

La recette traditionnelle du condensat

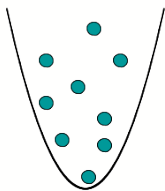
- Très peu d'atomes, beaucoup de **vide** (10^{-11} mbar)
 $n\lambda^3 \sim 10^{-20}$
- pré-refroidissement dans un **piège magnéto-optique** :
 $10^8 - 10^{10}$ atomes @ 1–100 μK ; $n\lambda^3 \sim 10^{-7}$
- transfert dans un **piège conservatif** (magnétique, optique, hybride...)
- refroidissement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



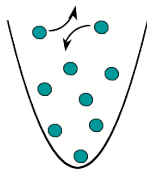
Refroidissement par évaporation

...ou comment souffler sur son café le refroidit

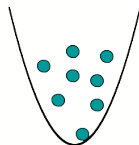
On réduit la profondeur d'un piège conservatif.
L'énergie est redistribuée grâce aux **collisions élastiques**.



équilibre à T_1



on baisse les bords

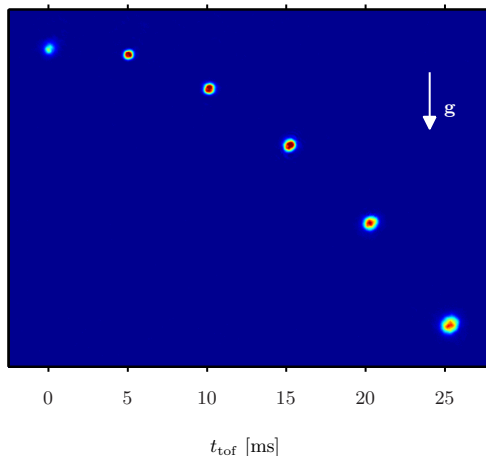


équilibre à $T_2 < T_1$

Observation de l'expansion d'un condensat

Temps de vol

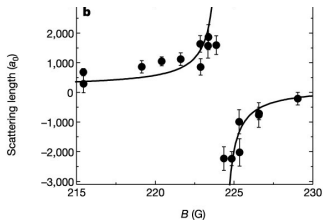
Temps de vol : expansion libre d'un condensat sous l'effet des interactions répulsives et de la dispersion en vitesse initiale.



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

Les atomes froids comme systèmes contrôlables

Un système largement accordable



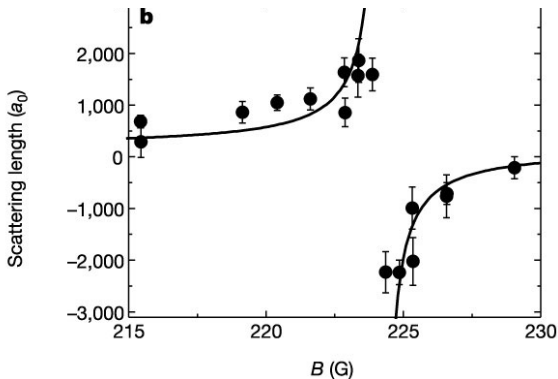
Les atomes froids comme systèmes modèles

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

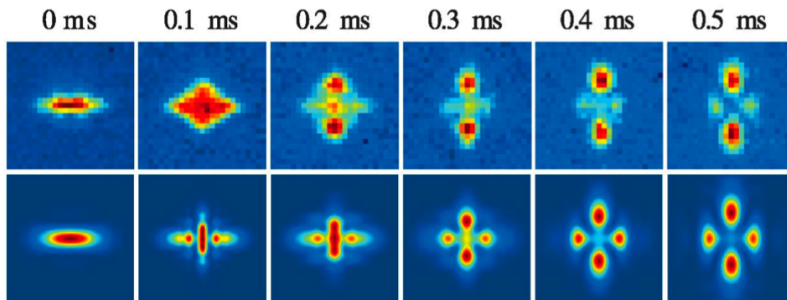
- collisions dans l'onde s : modélisées par une interaction de contact $g\delta(r)$
- $g = \frac{4\pi\hbar^2 a}{M}$ a : longueur de diffusion
- les résonances de Feshbach permettent d'accorder la longueur de diffusion avec un champ magnétique



Contrôle des interactions

Exemple d'application : effondrement d'un gaz dipolaire

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

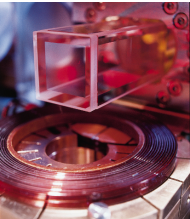


Pfau (Stuttgart), 2008

Voir aussi l'expérience chrome au LPL

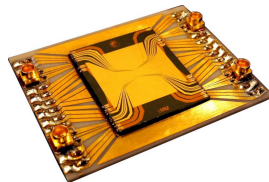
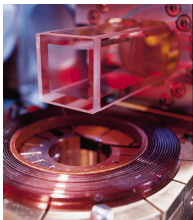
Pièges conservatifs

- pièges magnétiques : bobines macroscopiques...



Pièges conservatifs

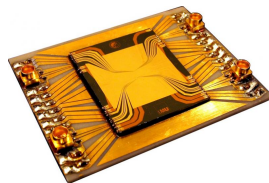
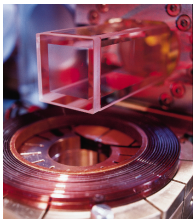
- pièges magnétiques : bobines macroscopiques...



... ou puce à atomes

Pièges conservatifs

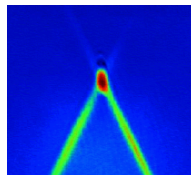
- pièges magnétiques : bobines macroscopiques...



... ou puce à atomes

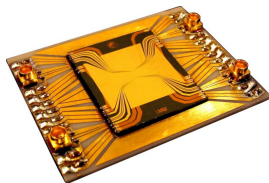
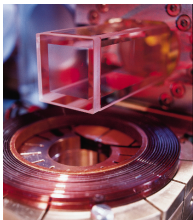
- pièges laser

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



Pièges conservatifs

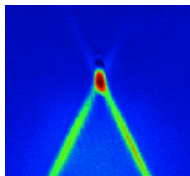
- pièges magnétiques : bobines macroscopiques...



... ou puce à atomes

- pièges laser

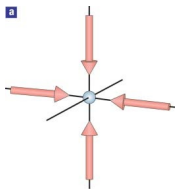
potentiel \propto intensité ; répulsifs
ou attractifs selon la valeur de
la fréquence laser



- potentiels adiabatiques (pièges RF)

Géométries de piégeage

- piège harmonique : 3D, 2D, 1D

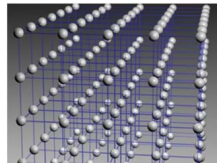
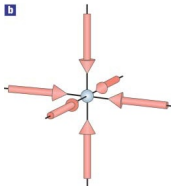


Ex : série de tubes 1D

Géométries de piégeage

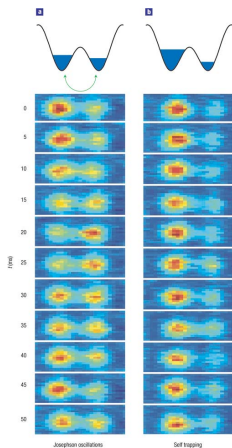
- piège harmonique : 3D, 2D, 1D
- réseaux optiques

un réseau 3D est analogue à un solide cristallin



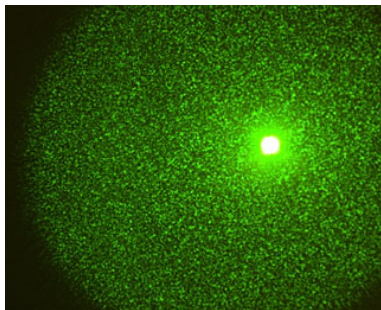
Géométries de piégeage

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



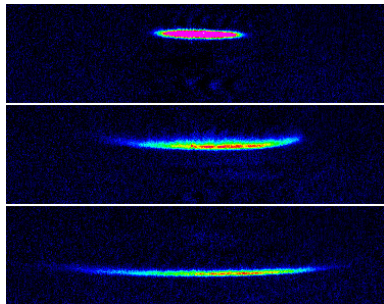
Géométries de piégeage

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



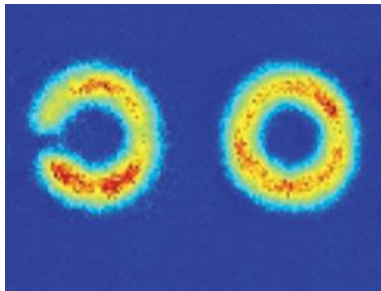
Géométries de piégeage

- 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
- ...

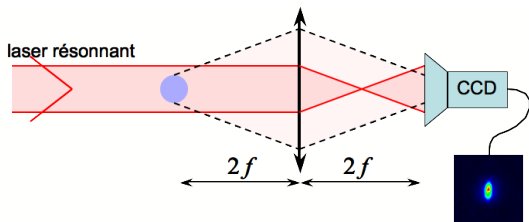
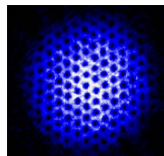
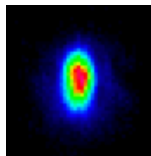


image 2D de la densité intégrée

Diagnostics

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

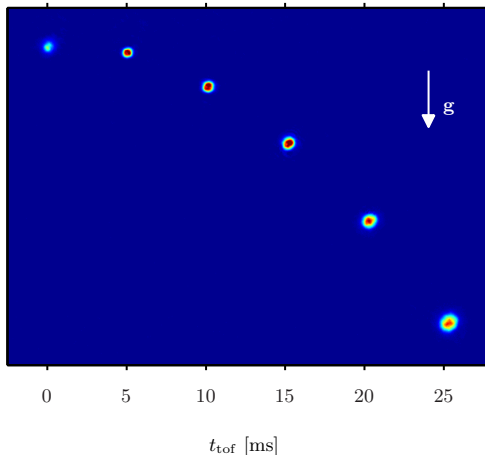
distribution de vitesse...
... ou zoom sur l'état initial



Diagnostics

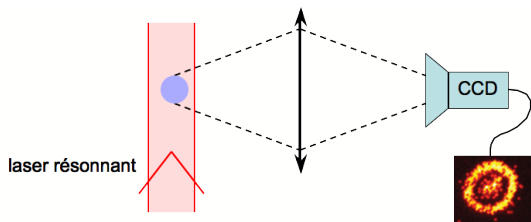
- Imagerie par absorption
- **Temps de vol**
- Fluo haute résolution
- spectroscopie de Bragg
- spectroscopie RF
- mesures locales de corrélation
- ...

expansion et chute d'un BEC (LPL)



Diagnostics

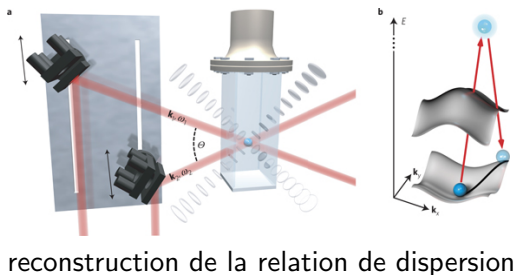
- Imagerie par absorption
- Temps de vol
- **Fluo haute résolution**
- spectroscopie de Bragg
- spectroscopie RF
- mesures locales de corrélation
- ...



S. Kuhr, Munich

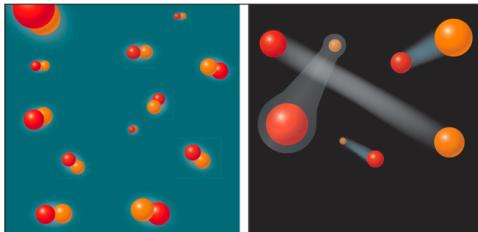
Diagnostics

- 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

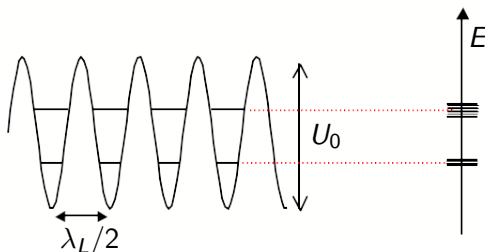
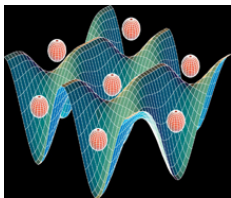
- oscillations de Bloch
- transition métal - isolant de Mott
- oscillations Josephson
- localisation d'Anderson
- spins sur réseau
- superfluidité des bosons ou des paires de fermions (BCS)
- réseau d'Abrikosov de vortex dans un superfluide / un supraconducteur de type II
- physique en dimensions réduites (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 :

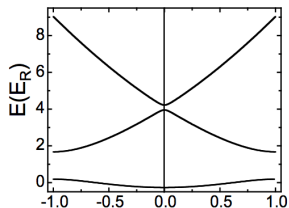
$$J \propto \delta E \propto e^{-2\sqrt{U_0/E_{\text{rec}}}} \quad \text{peut être rendu très faible}$$

- masse effective dans la bande fondamentale :

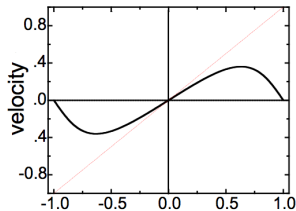
$$M_{\text{eff}} \propto 1/\delta E \quad \text{peut être rendue très grande}$$

Les oscillations de Bloch dans la première bande

Structure de la bande fondamentale :



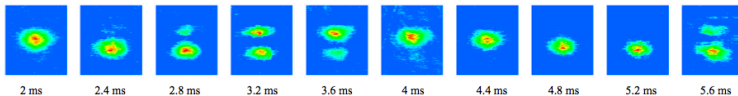
quasimomentum (q)



quasimomentum (q)

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

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



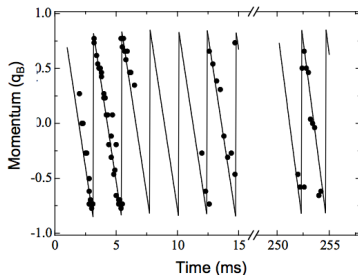
Les oscillations de Bloch pour mesurer la gravité

$F = Mg$. 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**

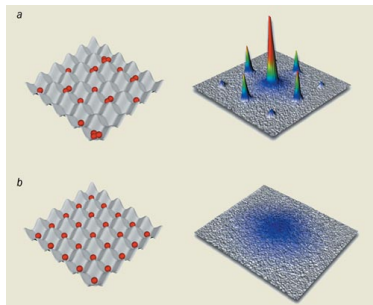
$U < J$ **superfluide**

état cohérent $|\phi\rangle$

(fonction d'onde délocalisée)

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

état de Fock $|N\rangle$



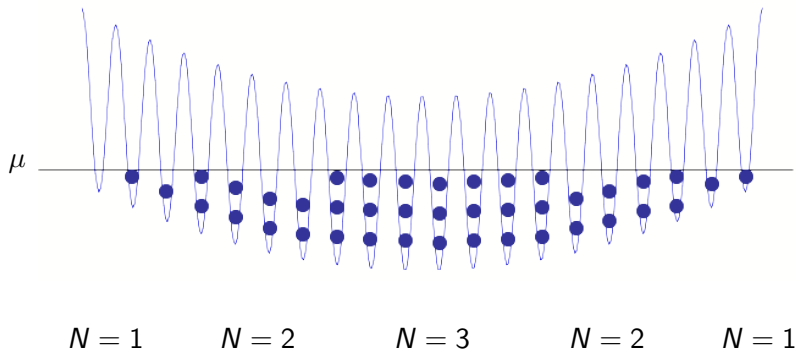
I. Bloch 2002

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.



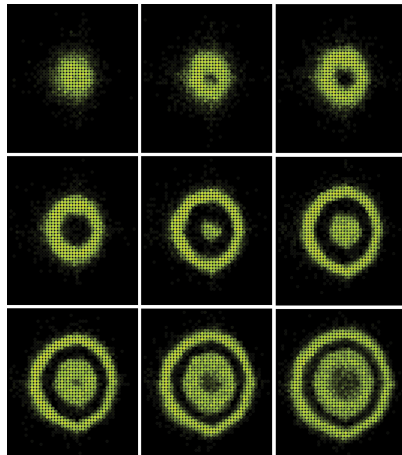
On s'attend à une structure de densité échelonnée (wedding cake).

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.

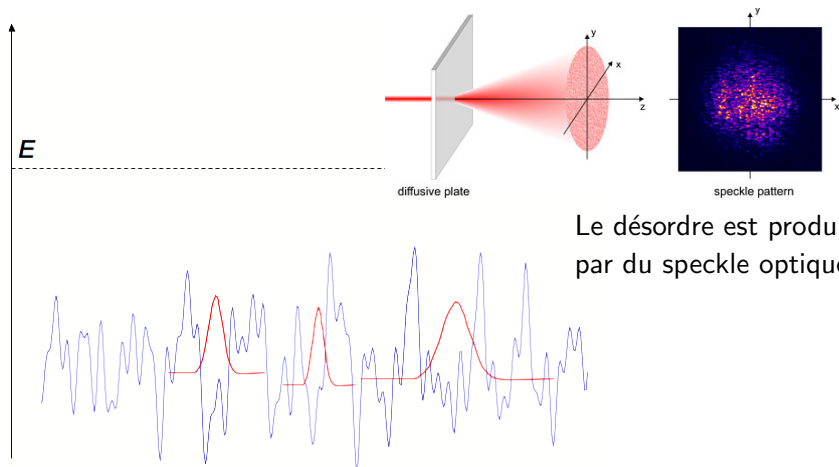
M. Greiner 2011

S. Kuhr et I. Bloch 2011



Localisation d'Anderson

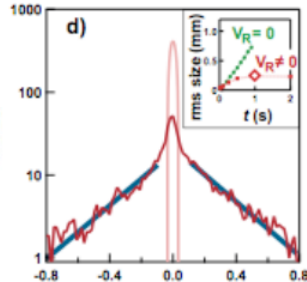
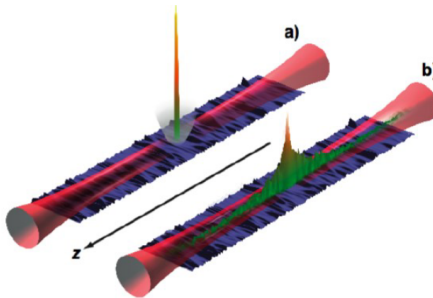
Effet de localisation non triviale due aux interférences. $E > V_D$



Le désordre est produit
par du speckle optique.

Localisation d'Anderson à 1D

Localisation exponentielle de la distribution des atomes.

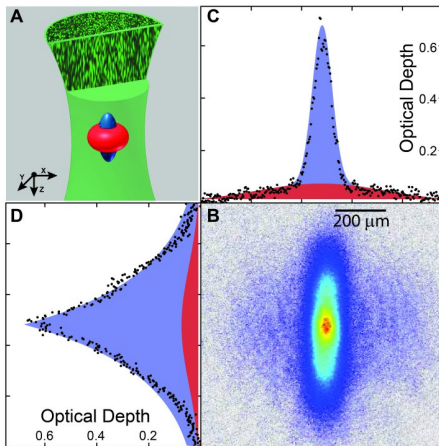


V. Josse / P. Bouyer / A. Aspect 2008

C. Fort / M. Inguscio 2008

Localisation d'Anderson à 3D

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

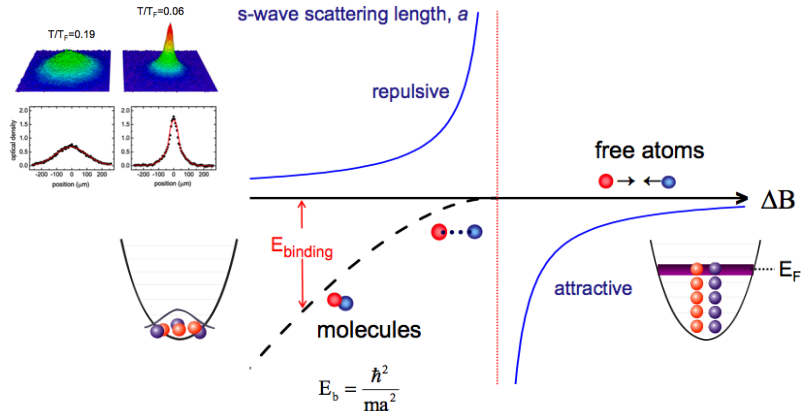


Fermions dégénérés : état BCS

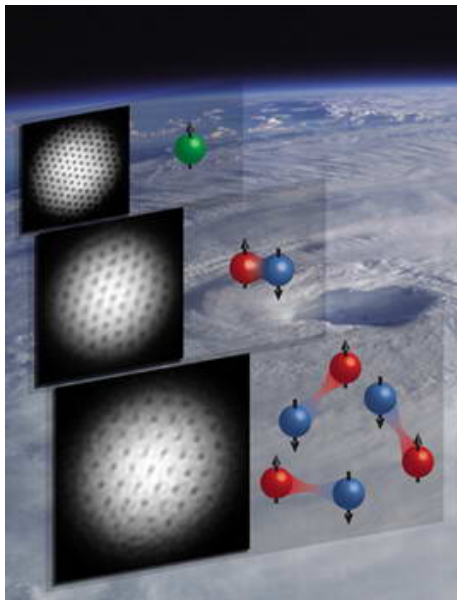
Paires de fermions de spin opposé

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

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



Superfluidité de paires de fermions



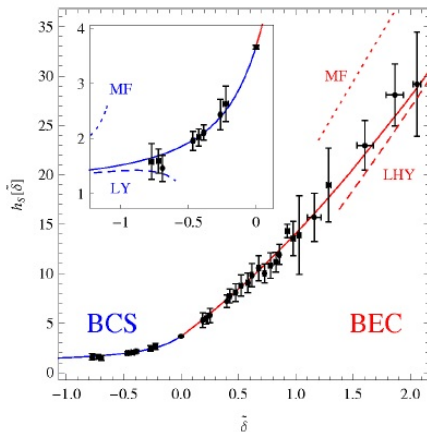
BEC d'atomes

BEC de molécules

Paires de Cooper

W. Ketterle 2006

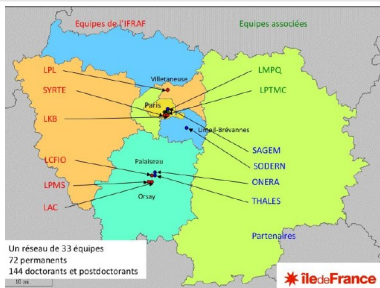
L'équation d'état du gaz de Fermi en interaction



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 !

