

# Fermions ultrafroids et problèmes à quelques corps

Xavier LEYRONAS, LPS-ENS



## Collaborateurs :



- Roland COMBESCOT



- Florent ALZETTO



- Sébastien GIRAUD

# Plan :

1. Introduction
2. Fermions ultrafroids et transition BEC-BCS
3. Equation d'état : expérience/théorie
  - 3.1 Limite unitaire
  - 3.2 Limite BEC
4. Conclusion

# I. Introduction

Gaz ultrafroids : alcalins (mais aussi He ..)

Li, Na, Rb, K ...

Densité :  $n \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

Température : 1  $\mu\text{K}$ -10 nK

Méca. Q. : longueur d'ondes de de Broglie  $\Lambda = \frac{h}{m v}$

MQ importante si  $\Lambda \sim n^{-1/3}$

$$\frac{1}{2} m v^2 \sim k_B T$$

$$k_B T \ll \frac{\hbar^2}{m} n^{2/3}$$

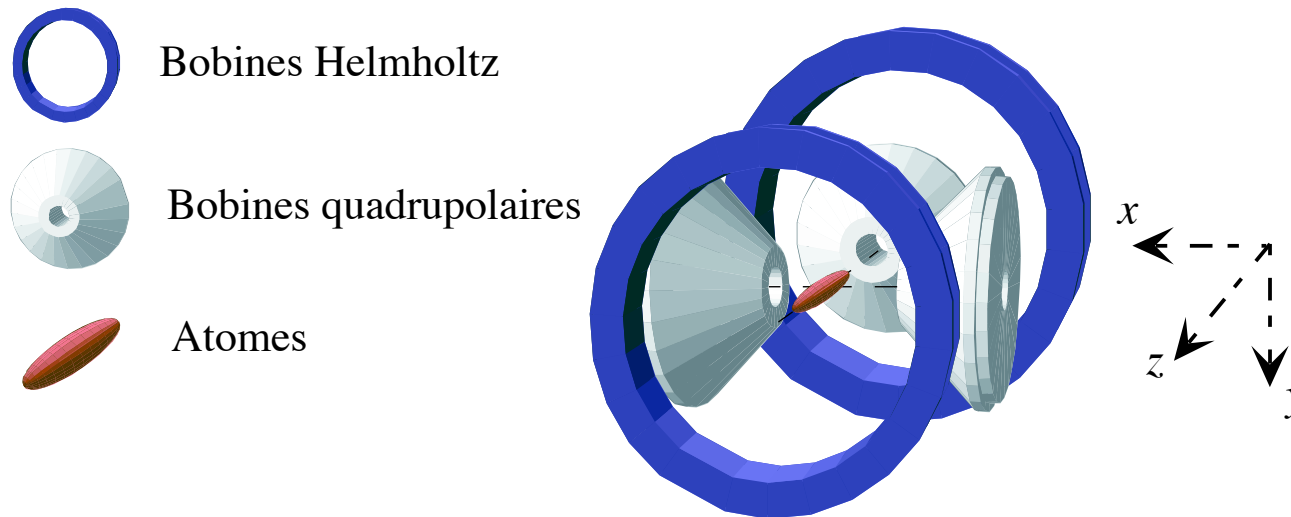


FIG. 2.2 – Géométrie du piège magnétique utilisé dans l'expérience. Le piège résultant est allongé selon l'axe des bobines Helmholtz. La raideur verticale du piège est importante pour empêcher les atomes de tomber sous l'effet de la gravité.

F. Chevy

# Bosons :

Condensation de Bose-Einstein :  $T < T_c$   
“(presque) tous les atomes dans le même état”

(Fonction d'ondes)<sup>2</sup>  
du condensat

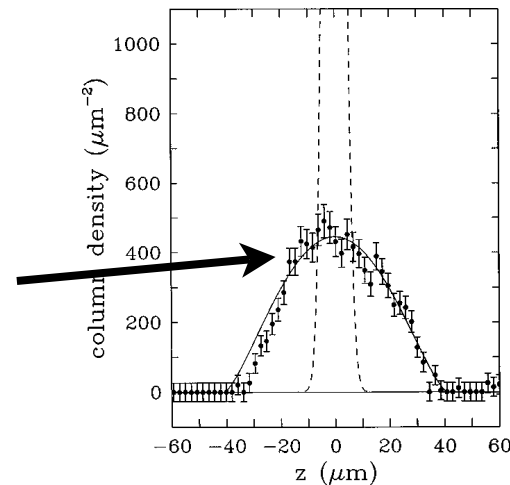
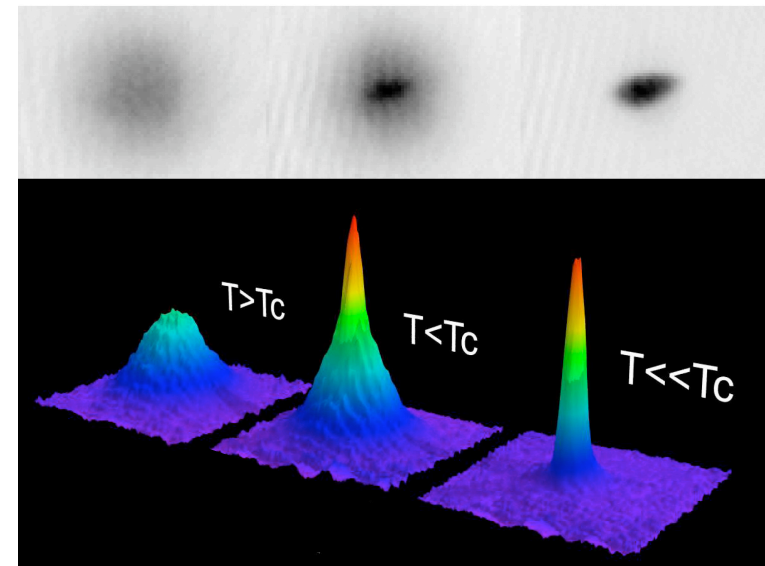


FIG. 3. Density distribution of 80 000 sodium atoms in the trap of Hau *et al.* (1998) as a function of the axial coordinate. The experimental points correspond to the measured optical density, which is proportional to the column density of the atom cloud along the path of the light beam. The data agree well with the prediction of mean-field theory for interacting atoms (solid line) discussed in Sec. III. Conversely, a noninteracting gas in the same trap would have a much sharper Gaussian distribution (dashed line). The same normalization is used for the three density profiles. The central peak of the Gaussian is

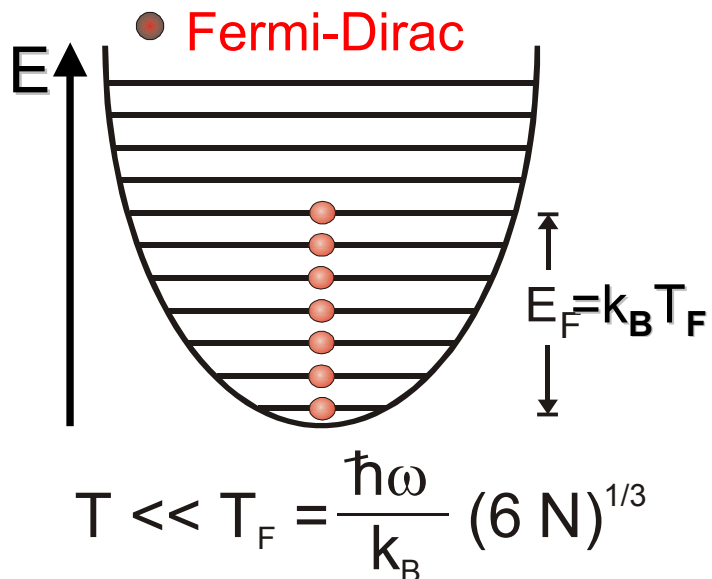


MIT

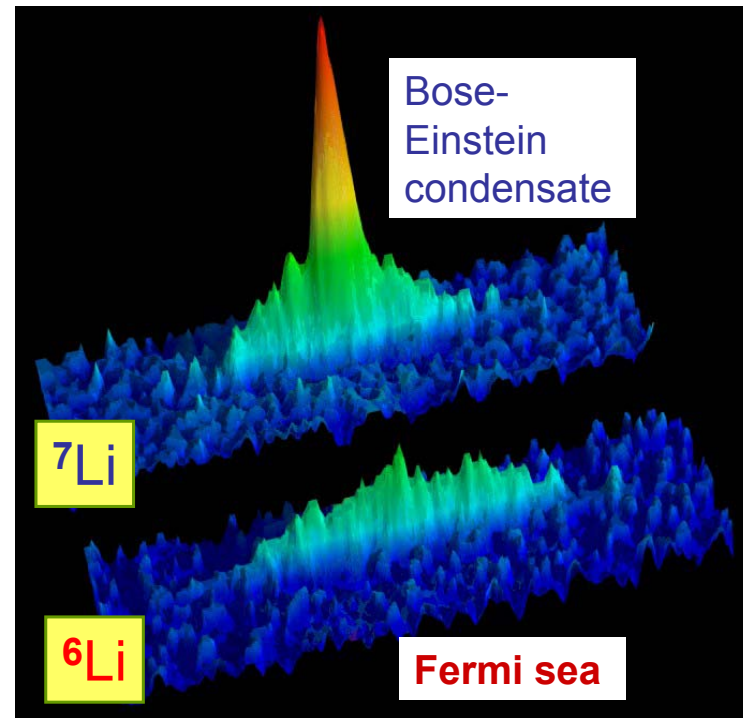
# Fermions :

( $^{40}\text{K}$ ,  $^6\text{Li}$ , ...)

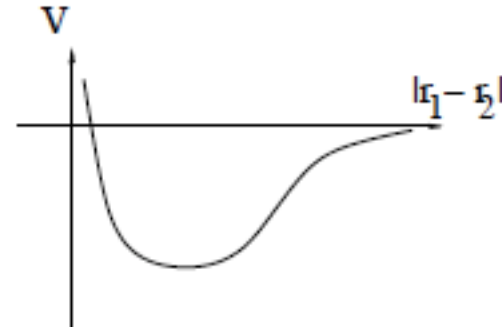
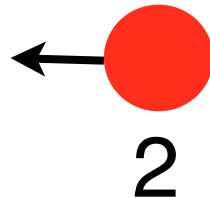
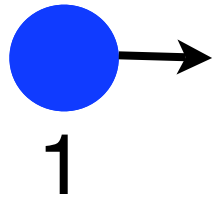
Principe d'exclusion de Pauli :  
pas de condensation de Bose-Einstein (“Mer de Fermi”)



Cours S. Stringari



## INTERACTIONS entre atomes :



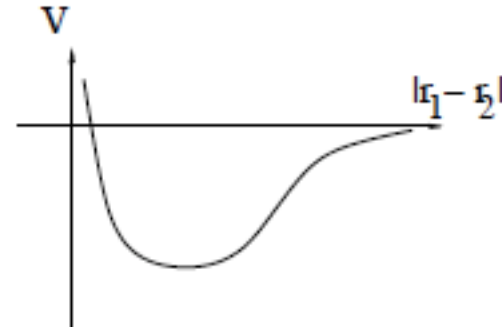
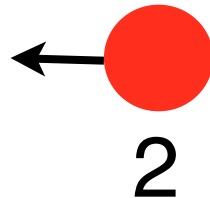
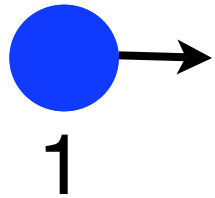
$$\psi_{rel}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \sim e^{i\mathbf{k}\cdot(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)} + f \frac{e^{i k |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}$$

$$\partial\sigma/\partial\Omega = |f|^2$$

- Basse énergie  $\Rightarrow$  onde  $s$  :  $f(k)$
- pas d'interaction 1-1 ou 2-2 (fermions)

## 2. Fermions ultrafroids et transition BEC-BCS

INTERACTIONS entre atomes :



$$\psi_{rel}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \sim e^{i\mathbf{k}\cdot(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)} + f \frac{e^{i k |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}$$

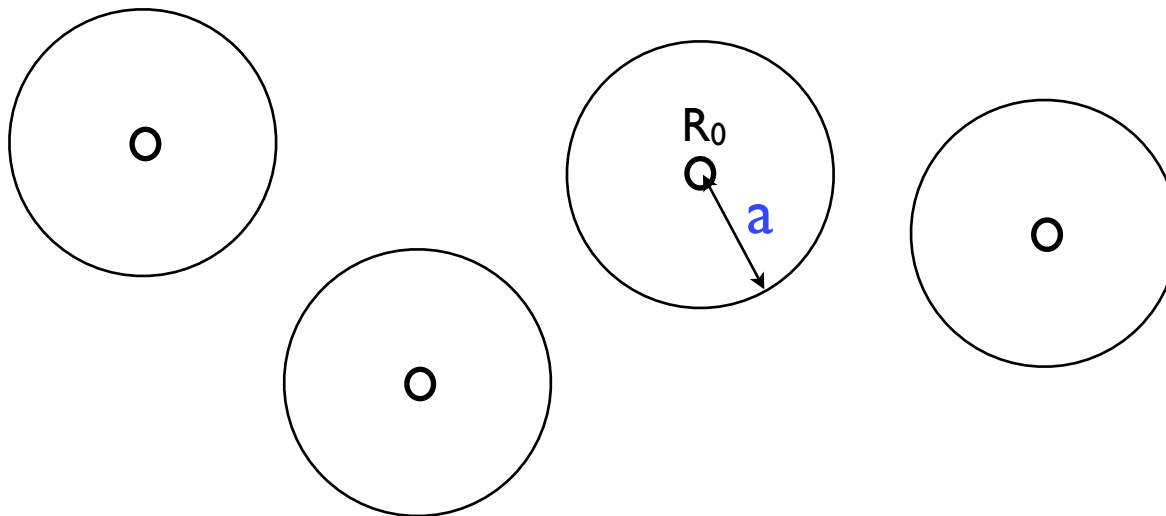
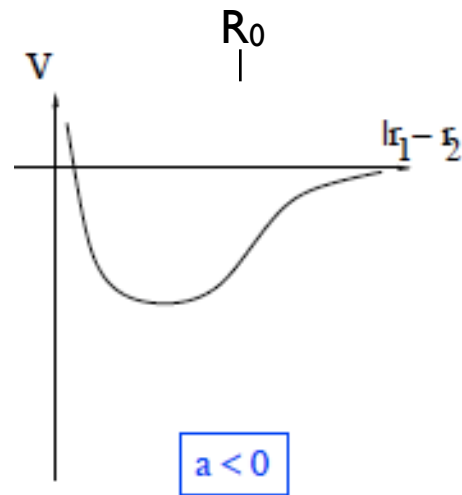
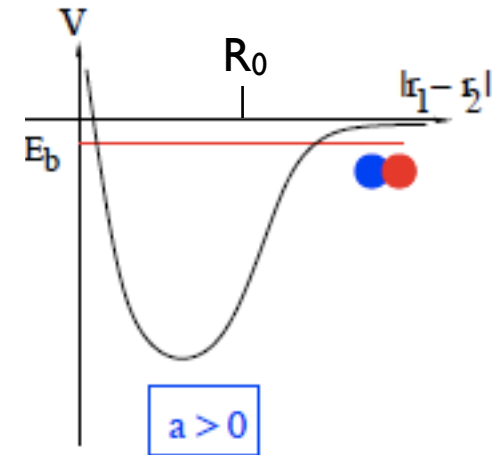
$$\partial\sigma/\partial\Omega = |f|^2$$

- Basse énergie  $\Rightarrow$  onde  $s$  :  $f(k)$
- pas d'interaction 1-1 ou 2-2 (fermions)

Longueur de diffusion  $a$  :  $f = -\frac{1}{a^{-1} + ik}$   $|a| \gg R_0$

●  $a > 0$  : un état lié (une **molécule**, ou "dimère")  $E_b = -\frac{\hbar^2}{m a^2}$

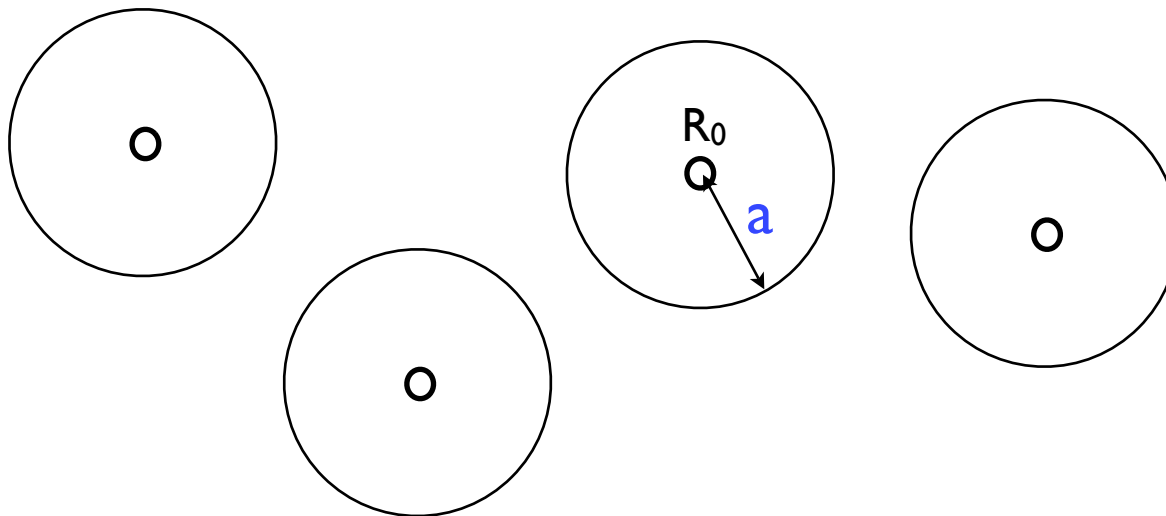
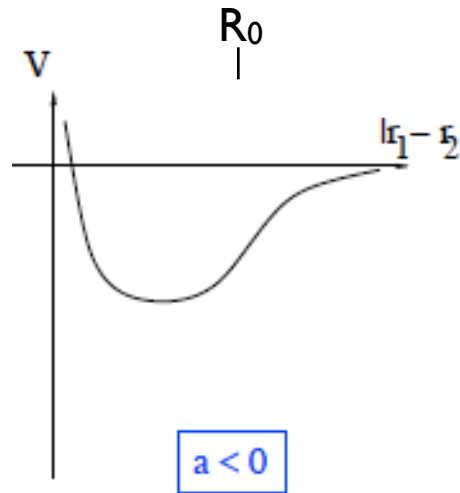
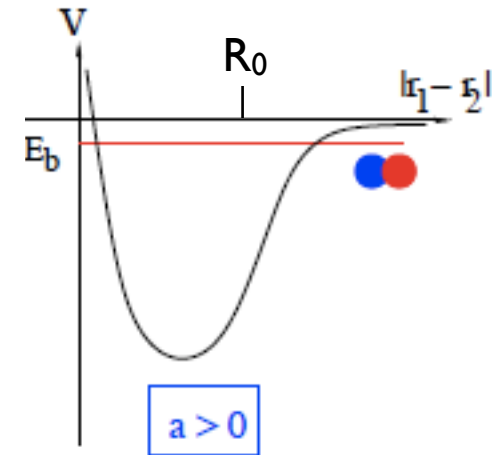
●  $a < 0$  : pas de molécule



# Longueur de diffusion

Longueur de diffusion  $a$  :  $f = -\frac{1}{a^{-1} + ik}$   $|a| \gg R_0$

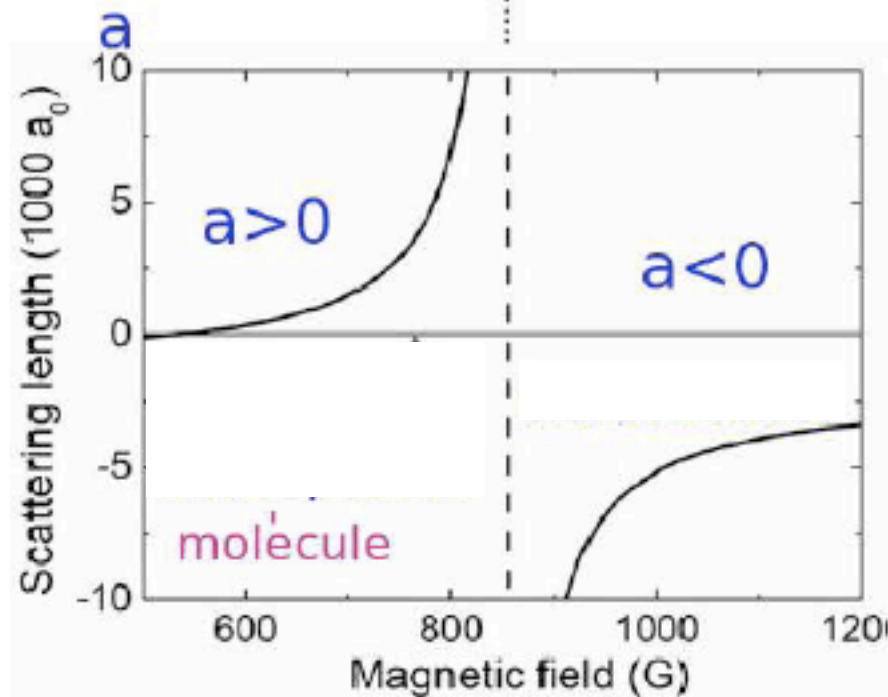
- $a > 0$  : un état lié (une molécule, ou "dimère")  $E_b = -\frac{\hbar^2}{m a^2}$
- $a < 0$  : pas de molécule



Un exemple : l'atome de  ${}^6\text{Li}$

Résonance de Feshbach

Bartenstein et al., cond-mat/0401109



$\Rightarrow$  permet de changer la force et le signe des interactions !  
Un seul paramètre : la longueur de diffusion  $a$

# Modèles d'interaction

i) “Puits carré” :  $V_{\text{eff}}(r) = \begin{cases} -V_0 & (r < R_0), \\ 0 & (r > R_0). \end{cases}$   $K_0 = \sqrt{2m_r V_0 / \hbar^2}.$

$$a = R_0 [1 - \tan(K_0 R_0) / (K_0 R_0)] \quad \underline{a \gg R_0}$$

ii) Potentiel delta “régularisé” :

$$V(\mathbf{r}) = g \delta_\Lambda(\mathbf{r}), \quad g < 0 \quad \tilde{V}(\mathbf{k}) = g \text{ si } |\mathbf{k}| < \Lambda, \quad 0 \text{ sinon} \quad \underline{\text{attraction}}$$

$\Lambda$  coupure (“cut-off”)

$$\underline{a \gg \Lambda^{-1}} \quad \Lambda^{-1} \sim R_0$$

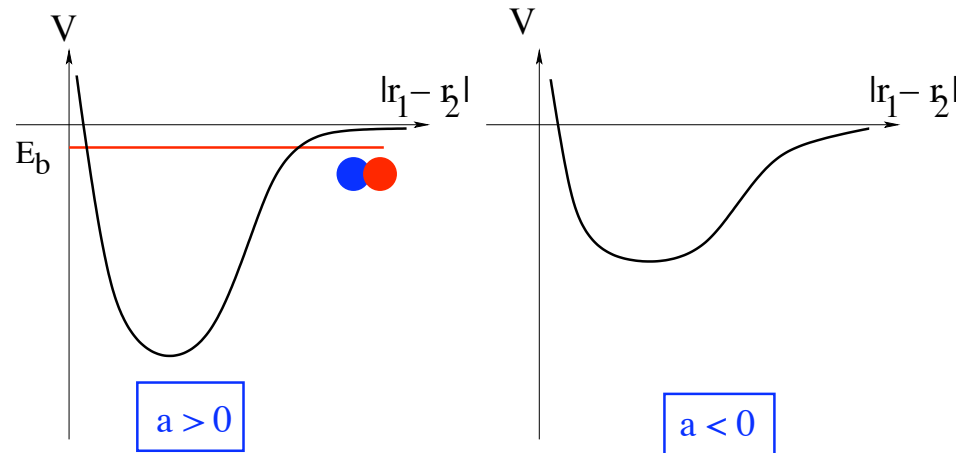
$$\frac{m}{4\pi\hbar^2 a} = \frac{1}{g} + \sum_{|\mathbf{k}| < \Lambda} \frac{m}{k^2}$$



# Transition BEC-BCS

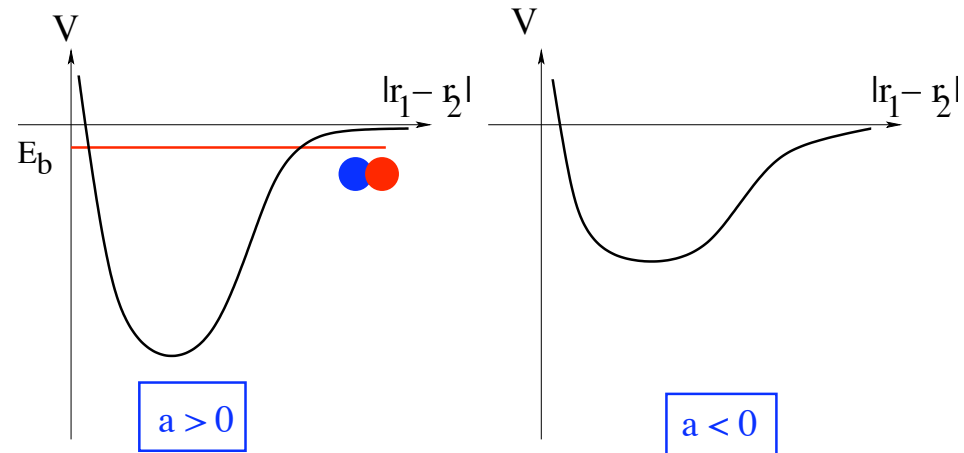
# Transition BEC-BCS

Fermions  $\uparrow, \downarrow$   
(1,2)



# Transition BEC-BCS

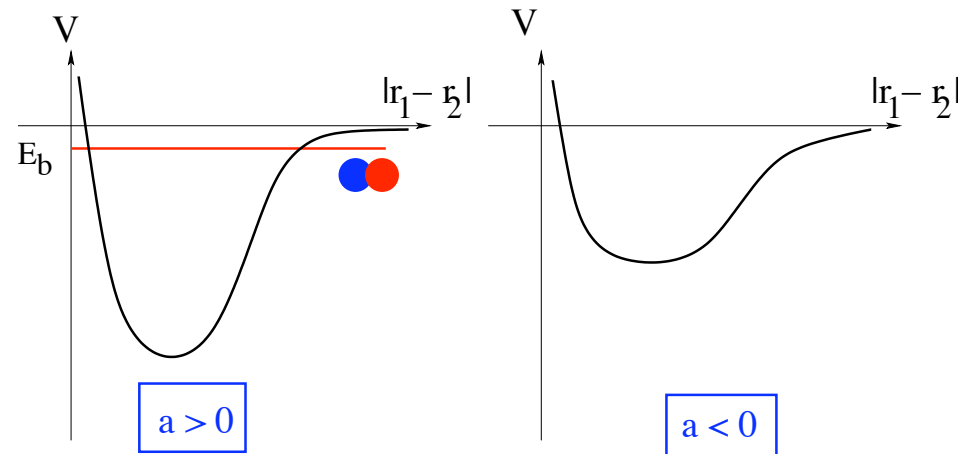
Fermions  $\uparrow, \downarrow$   
(1,2)



Leggett 1979 :  $\psi(1, 2, \dots, N) = A [\varphi(1, 2)\varphi(3, 4) \dots \varphi(N - 1, N)]$

# Transition BEC-BCS

Fermions  $\uparrow, \downarrow$   
(1,2)

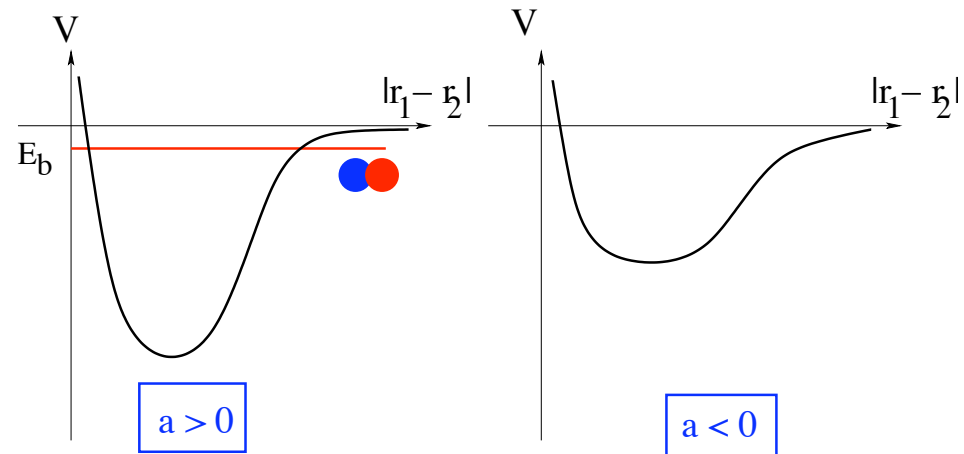


Leggett 1979 :  $\psi(1, 2, \dots, N) = A [\varphi(1, 2)\varphi(3, 4) \dots \varphi(N-1, N)]$

Condensats de molécules "BEC" :  $k_F a \rightarrow 0^+$ ,  $\varphi = \varphi_{mol}$ ,  $\varphi_{mol}(r) \sim \frac{1}{r} e^{-r/a}$   $n = \frac{k_F^3}{6\pi^2}$

# Transition BEC-BCS

Fermions  $\uparrow, \downarrow$   
(1,2)



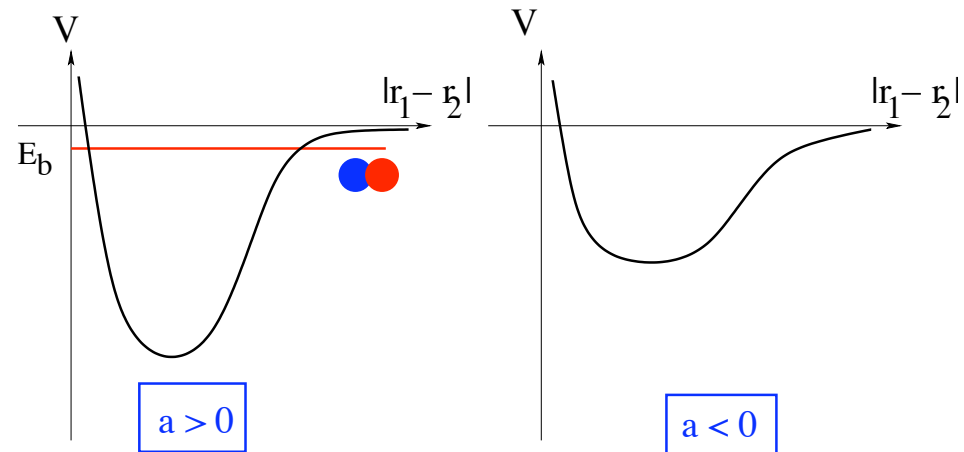
**Leggett 1979** :  $\psi(1, 2, \dots, N) = A [\varphi(1, 2)\varphi(3, 4) \dots \varphi(N-1, N)]$

Condensats de molécules “BEC” :  $k_F a \rightarrow 0^+$ ,  $\varphi = \varphi_{mol}$ ,  $\varphi_{mol}(r) \sim \frac{1}{r} e^{-r/a}$   $n = \frac{k_F^3}{6\pi^2}$

Superfluide “à la BCS” :  $k_F a \rightarrow 0^-$ ,  $\varphi = \varphi_{BCS}$   
 $\varphi_{BCS}(r) \sim e^{-r/\xi}$ ,  $k_F \xi \sim e^{\frac{\pi}{2k_F|a|}} \gg 1$

# Transition BEC-BCS

Fermions  $\uparrow, \downarrow$   
(1,2)

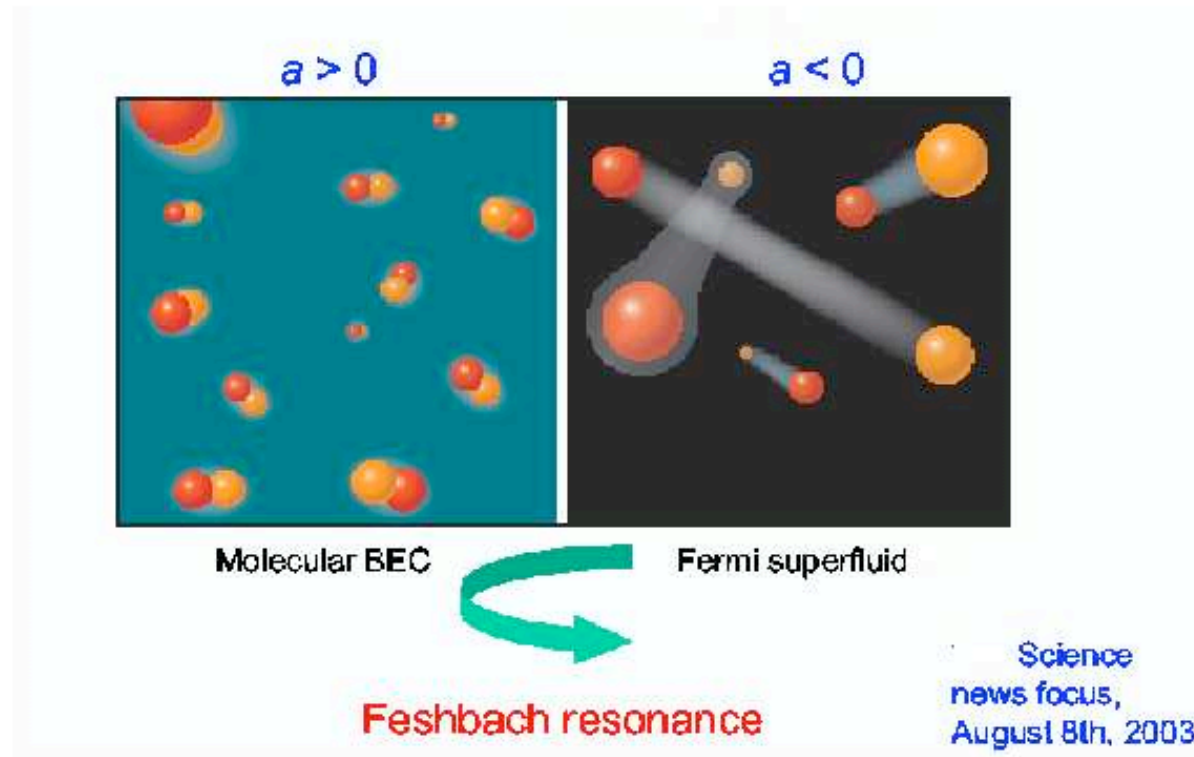


Leggett 1979 :  $\psi(1, 2, \dots, N) = A [\varphi(1, 2)\varphi(3, 4) \dots \varphi(N-1, N)]$

Condensats de molécules "BEC" :  $k_F a \rightarrow 0^+$ ,  $\varphi = \varphi_{mol}$ ,  $\varphi_{mol}(r) \sim \frac{1}{r} e^{-r/a}$   $n = \frac{k_F^3}{6\pi^2}$

Superfluide "à la BCS" :  $k_F a \rightarrow 0^-$ ,  $\varphi = \varphi_{BCS}$   
 $\varphi_{BCS}(r) \sim e^{-r/\xi}$ ,  $k_F \xi \sim e^{\frac{\pi}{2k_F|a|}} \gg 1$

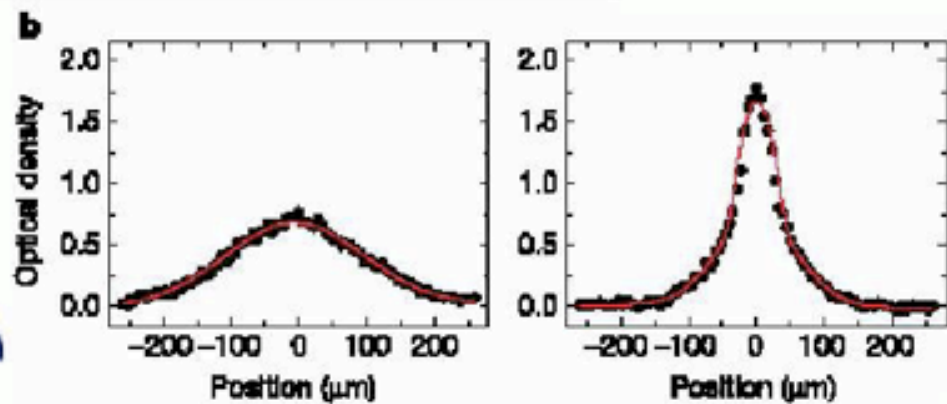
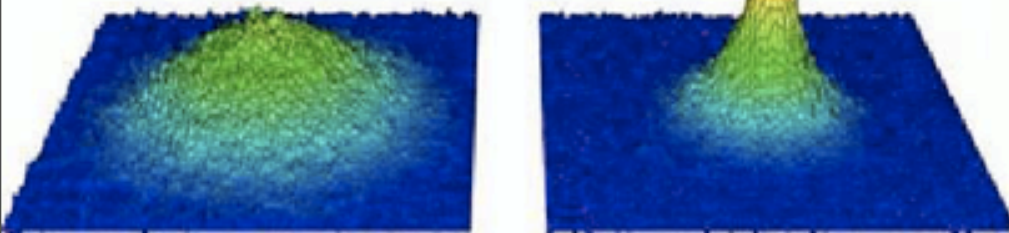
Entre les deux : transition "douce" ! **Crossover BEC-BCS.**



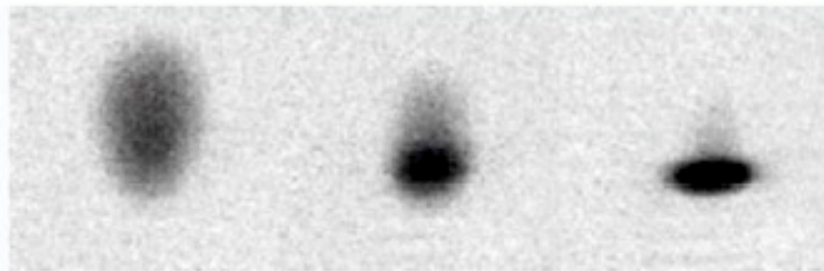
Dessin illustrant le crossover BEC-BCS

# Condensates of molecules

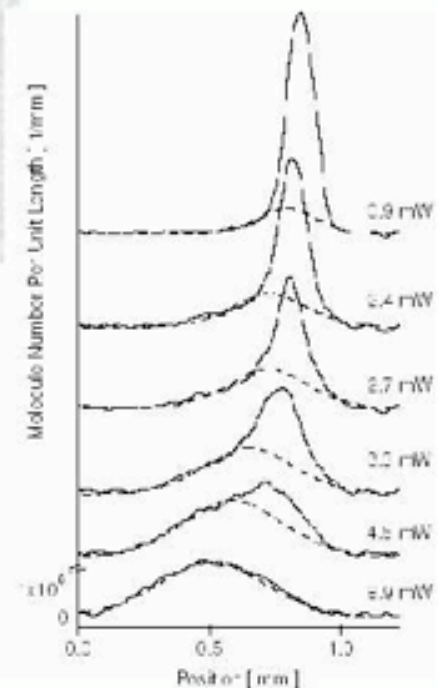
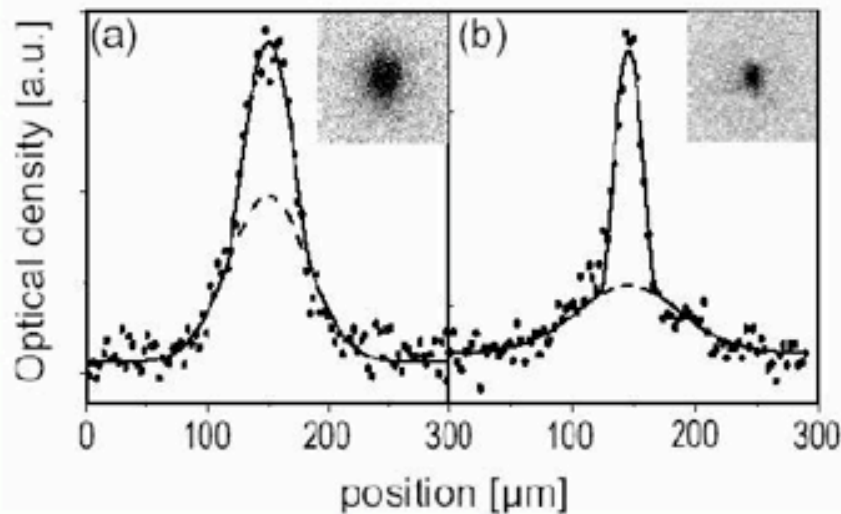
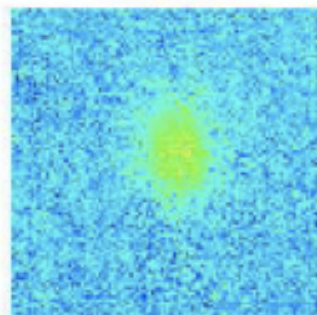
JILA:  $^{40}\text{K}_2$



$^6\text{Li}_2$ : Innsbruck,  
MIT



ENS



MIT

C. Salomon

### 3. Equation d'état : expérience/théorie

- Q.:  $P(\mu_1, \mu_2, T)$  ou  $\mu_1(n_1, n_2, T)$  et  $\mu_2(n_1, n_2, T)$  ?

$$n_1 = \frac{\partial P}{\partial \mu_1} \quad n_2 = \frac{\partial P}{\partial \mu_2} \quad \frac{S}{V} = \frac{\partial P}{\partial T}$$

Pb : mesures  $n_1(\mathbf{r})$  et  $n_2(\mathbf{r})$

# MIT : mesures $n_1(r)$ , $n_2(r)$

PRL 101, 070404 (2008)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
15 AUGUST 2008

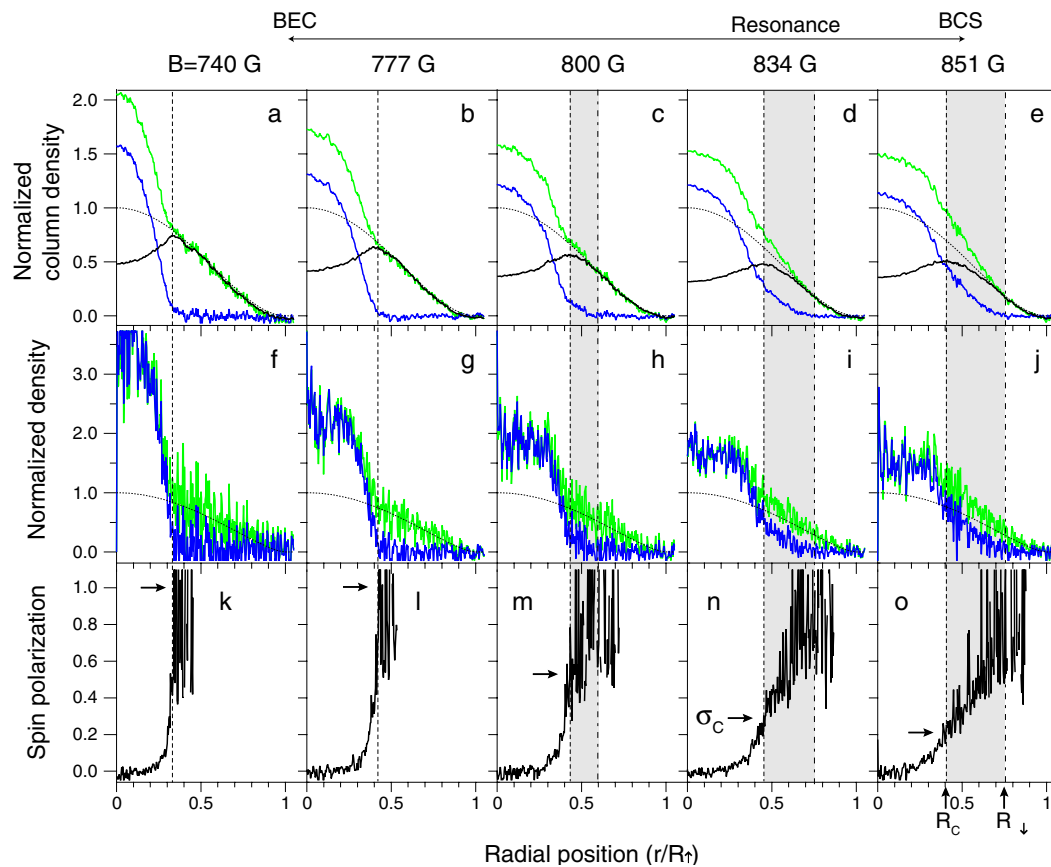


FIG. 1 (color online). Density profiles of imbalanced Fermi mixtures in a harmonic trap. The top row (a)–(e) shows the averaged column-density profiles for various magnetic fields [gray (green): majority, dark gray (blue): minority, black: difference]. The black dotted line is a zero-temperature Thomas-Fermi distribution fit to the majority wing ( $r > R_↑$ ). The middle row (f)–(j) and the bottom row (k)–(o) show the reconstructed three-dimensional density distributions and the spin polarizations obtained from the profiles in the top row. The critical polarizations  $\sigma_c$  at the phase boundary  $r = R_c$  are indicated by the right arrows. The values for  $R_↑$  (in  $\mu\text{m}$ ),  $R_c/R_↑$ , and  $R_↓/R_↑$  were respectively: for (a), (f), (k), 381, 0.33, 0.33; for (b), (g), (l), 380, 0.33, 0.33; for (c), (h), (m), 362, 0.35, 0.59; for (d), (i), (n), 371, 0.44, 0.72; for (e), (j), (o), 367, 0.41, 0.76.  $T/T_{F0} \leq 0.05$ , and  $T_{F0} \approx 1.0 \mu\text{K}$  (see the text for definitions).

# Approximation de la densité locale (LDA)

- Potentiel de piégeage :

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

$$\mu_i(n_1(\mathbf{r}), n_2(\mathbf{r}), T) + V(\mathbf{r}) = \mu_i^0 \quad i = 1, 2$$



Equation d'état à partir de la  
densité intégrée :

# Equation d'état à partir de la densité intégrée :

$T$  constante (une composante)

$$\begin{aligned}\frac{m\omega_{\perp}^2}{2\pi} \bar{n}(z) &= \int \frac{m\omega_{\perp}^2}{2\pi} dx dy n \\ &= \int m\omega_{\perp}^2 r_{\perp} dr_{\perp} n\end{aligned}$$

or à  $z$  fixé  $d\mu = -m\omega_{\perp}^2 r_{\perp} dr_{\perp}$  (LDA) et  $n = \partial P / \partial \mu$  ( $dP = n d\mu$ , Gibbs-Duhem).

D'où

$$\begin{aligned}\frac{m\omega_{\perp}^2}{2\pi} \bar{n}(z) &= \int d\mu \frac{\partial P}{\partial \mu} \\ &= P(\mu(z), T)\end{aligned}$$

$\mu(z) = \mu^0 - \frac{1}{2}m\omega_z^2 z^2$ , potentiel chimique "sur l'axe".

Pour deux états 1 et 2 :

$$P(\mu_1(z), \mu_2(z), T) = \frac{m\omega_r^2}{2\pi} [\bar{n}_1(z) + \bar{n}_2(z)]$$

$$\bar{n}_i(z) = \int dx dy n_i$$

# Equation d'état à partir de la densité intégrée :

$T$  constante (une composante)

$$\begin{aligned}\frac{m\omega_{\perp}^2}{2\pi} \bar{n}(z) &= \int \frac{m\omega_{\perp}^2}{2\pi} dx dy n \\ &= \int m\omega_{\perp}^2 r_{\perp} dr_{\perp} n\end{aligned}$$

or à  $z$  fixé  $d\mu = -m\omega_{\perp}^2 r_{\perp} dr_{\perp}$  (LDA) et  $n = \partial P / \partial \mu$  ( $dP = n d\mu$ , Gibbs-Duhem).

D'où

$$\begin{aligned}\frac{m\omega_{\perp}^2}{2\pi} \bar{n}(z) &= \int d\mu \frac{\partial P}{\partial \mu} \\ &= P(\mu(z), T)\end{aligned}$$

$\mu(z) = \mu^0 - \frac{1}{2}m\omega_z^2 z^2$ , potentiel chimique "sur l'axe".

Pour deux états 1 et 2 :

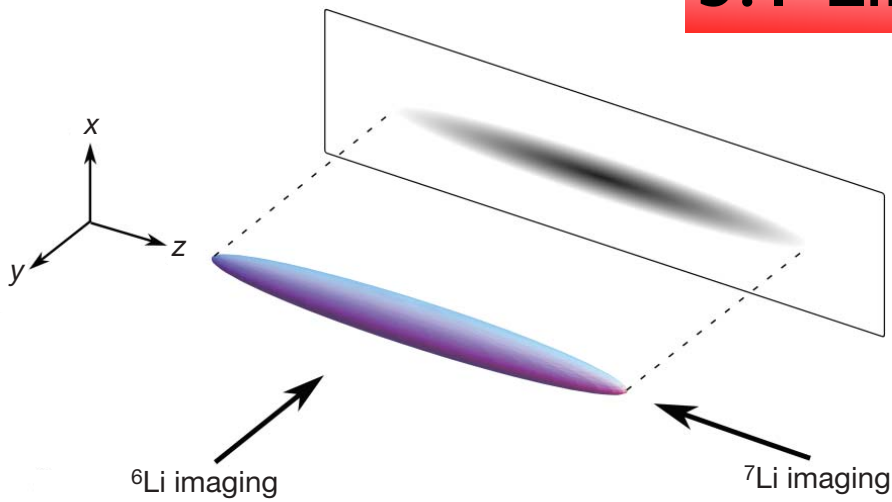
$$P(\mu_1(z), \mu_2(z), T) = \frac{m\omega_r^2}{2\pi} [\bar{n}_1(z) + \bar{n}_2(z)]$$

$$\bar{n}_i(z) = \int dx dy n_i$$

(voir aussi T. Ho, Q. Zhou '09)

### 3.1 Limite unitaire

$(a \rightarrow \pm \infty)$



LKB équipe  ${}^6\text{Li}$  :

Nascimbène et al.  
Nature 2010

**Figure 2 | Schematic representation of our atomic sample.** The  ${}^6\text{Li}$  atomic cloud is imaged in the direction  $y$ ; the column density is then integrated along the direction  $x$  to give  $\bar{n}(z)$ . The  ${}^7\text{Li}$  atoms are imaged after a time of flight along the  $z$  direction.

Thermomètre :  ${}^7\text{Li}$

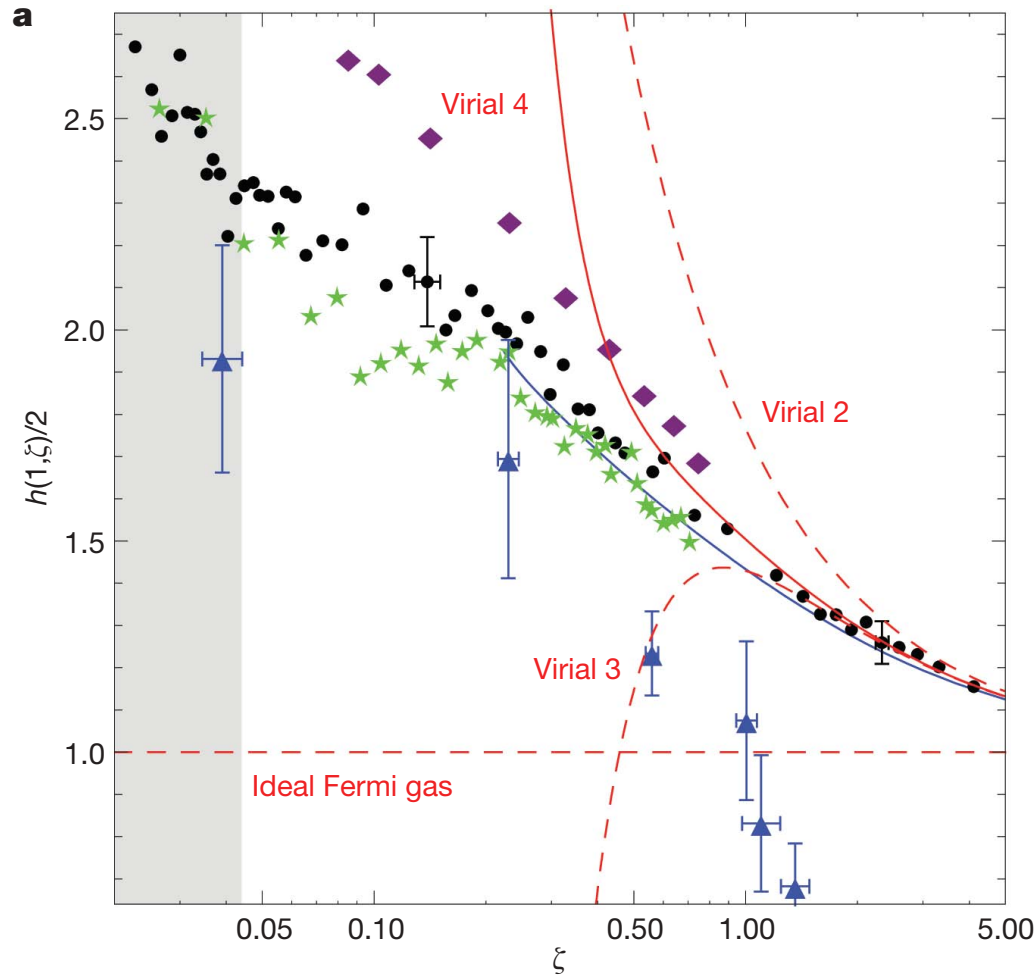
$$\mu_1(z), \mu_2(z) \quad ?$$

$$\mu_1(z) = \mu_1^0 - \frac{1}{2}m\omega_z^2 z^2$$

$\mu_1^0$  : comportement haute T

# Résultats : limite unitaire

$$\frac{P(\mu_1, \mu_2, T)}{P_{libre}(\mu_1, T)}$$



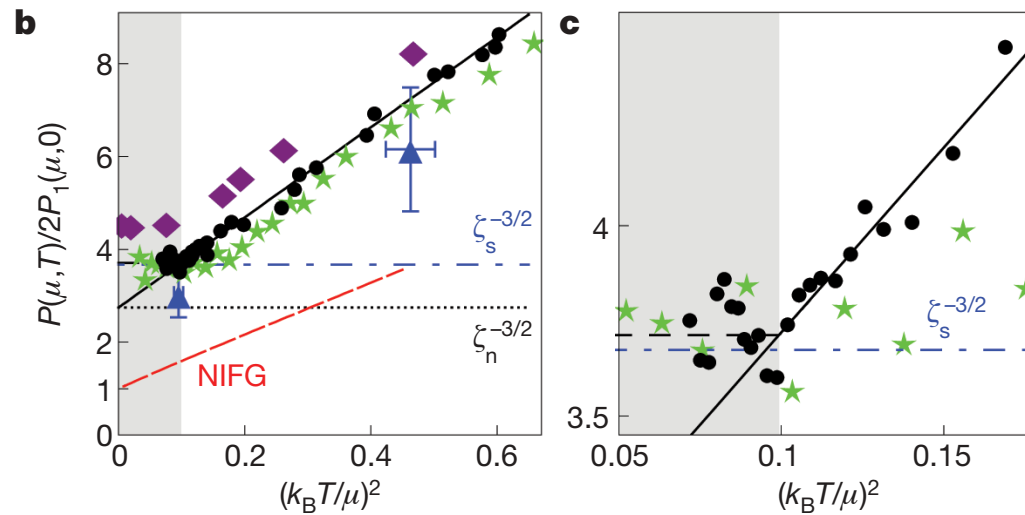
Nascimbène et al.  
Nature 2010

$$n_1 = n_2$$

$$\zeta = \exp\left(-\frac{\mu_1}{k_B T}\right)$$

- ▲ Burovski, Prokofev, Svistunov, Troyer (DiagMC '06)
- ★ Bulgac, Drut, Magieski (MC '06)
- ◆ Haussmann, Rantner, Cerrito, Zwerger (Diag. selfconsistent '07)
- ▮ Combescot, Alzetto, Leyronas (Diag. '09)

# Limite unitaire-Comportement Liquide de Fermi :



$$P(\mu, T) = 2P_1(\mu, 0) \left( \xi_n^{-3/2} + \frac{5\pi^2}{8} \xi_n^{-1/2} \frac{m^*}{m} \left( \frac{k_B T}{\mu} \right)^2 \right)$$

Scaling :  $E/V = \frac{3}{2} P$  (limite unitaire)

Masse effective quasiparticule :  $m^*/m = 1.13(3)$

“Paramètre de Landau” :  $F_0^S = \xi_n m^*/m - 1 = -0.42$

## 3.2 Limite BEC-équation d'état de LHY:

>'03 BEC de molécules diatomiques (f f )  ${}^6\text{Li}_2$ ,  ${}^{40}\text{K}_2$



Dimères : bosons **composites**

Limite  $a \rightarrow 0$

$T=0$ , BEC (Lee-Huang-Yang 1959)

$$\mu(n) = \frac{4\pi\hbar^2 a}{m} n \left[ 1 + \frac{32}{3} \left( \frac{na^3}{\pi} \right)^{1/2} + \dots \right]$$

$a$  : longueur de diffusion atome-atome

Q : vrai pour des bosons **composites** aussi ?

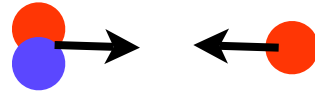
La difficulté :  $a_m$  problème à 4 corps

⇒ du 4 (ou 3) corps dans le  $N$  corps

⇒ diagrammes de Feynman : 4 (ou 3) corps et  $N$  corps

## Problèmes à 3 et 4 corps :

Collisions (ou états liés) molécule-atome : 3 corps



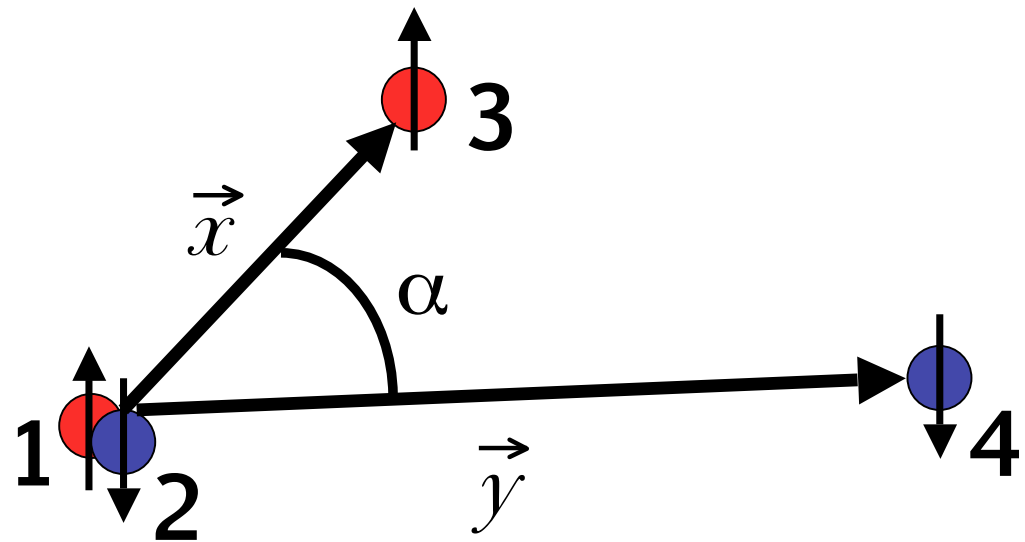
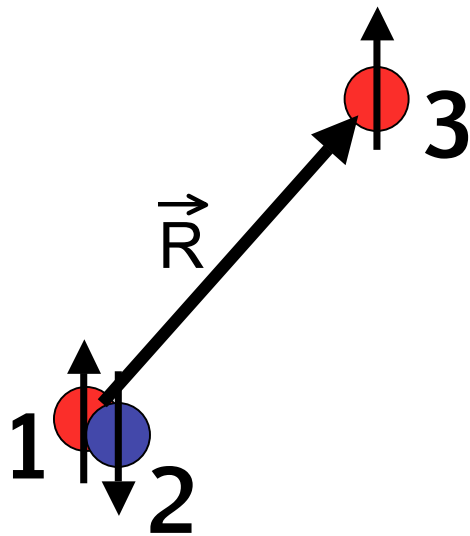
Collisions (ou états liés) molécule-molécule : 4 corps



Q. : comment est-ce possible ?

R. : le potentiel à 2-corps est à courte portée :

$$V(|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|) \approx \frac{4\pi \hbar^2 a}{m} \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)$$



3 atomes : *une* variable

4 atomes : *trois* variables !



# Pb à 3 et 4 corps

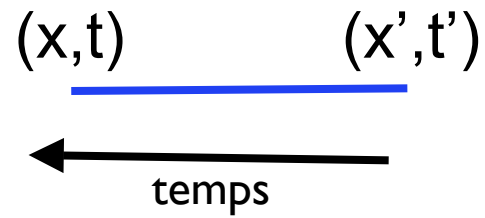
Pb à 3 et 4 corps

Méthode (pas habituelle) : diagrammes de Feynman

## Pb à 3 et 4 corps

Méthode (pas habituelle) : diagrammes de Feynman

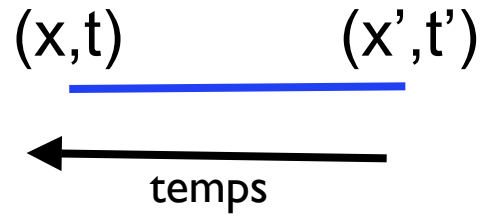
1 atome :



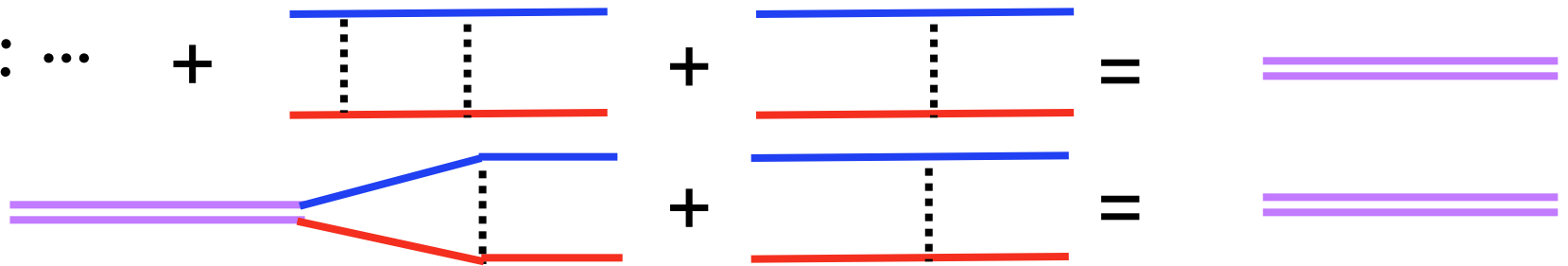
# Pb à 3 et 4 corps

Méthode (pas habituelle) : diagrammes de Feynman

1 atome :

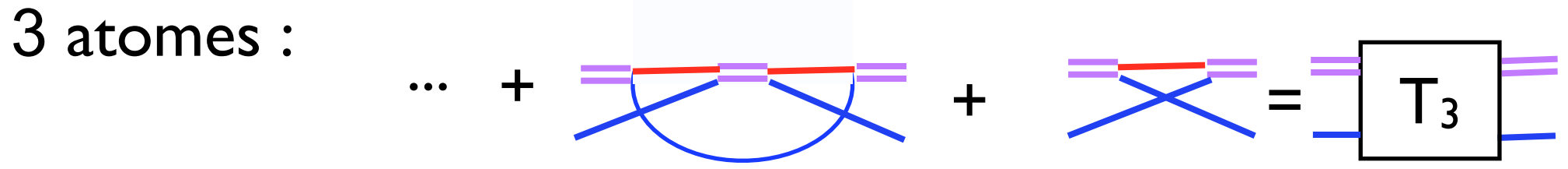
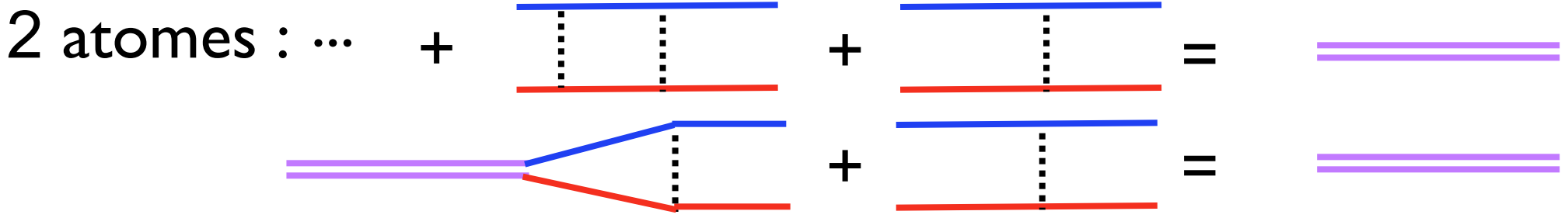


2 atomes : ...



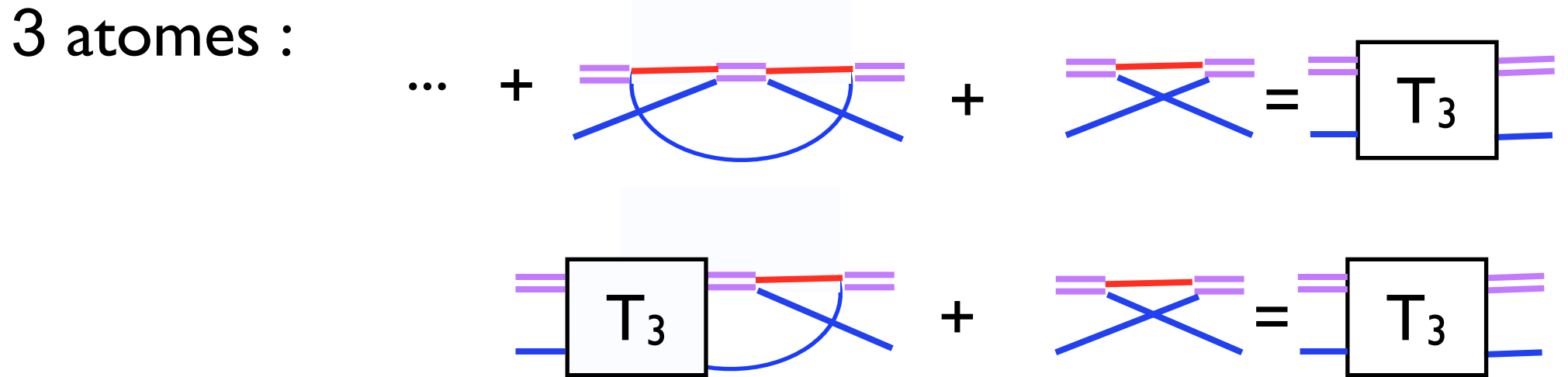
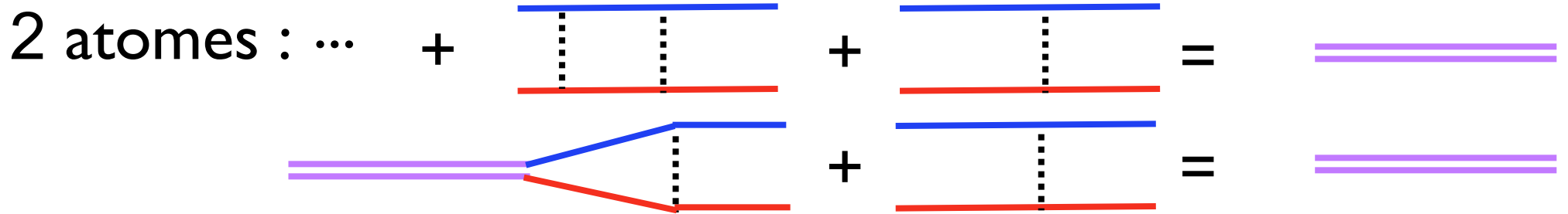
# Pb à 3 et 4 corps

Méthode (pas habituelle) : diagrammes de Feynman



# Pb à 3 et 4 corps

Méthode (pas habituelle) : diagrammes de Feynman

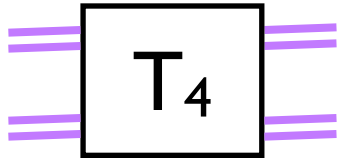


Equation (intégrale) pour  $T_3$  !



4 atomes : plus compliqué !

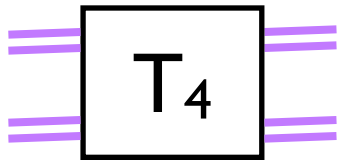
# 4 atomes : plus compliqué !



$$\left(\frac{8\pi}{a m^2}\right)^2 T_4 = \frac{4\pi}{m} a_m$$

$a_m$  : longueur de diffusion **moléculaire**

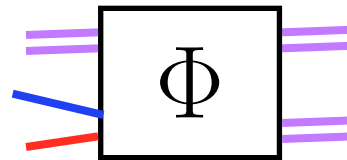
# 4 atomes : plus compliqué !



$$\left(\frac{8\pi}{a m^2}\right)^2 T_4 = \frac{4\pi}{m} a_m$$

$a_m$  : longueur de diffusion **moléculaire**

Nouvel ingrédient :



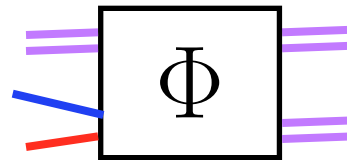
# 4 atomes : plus compliqué !



$$\left(\frac{8\pi}{a m^2}\right)^2 T_4 = \frac{4\pi}{m} a_m$$

$a_m$  : longueur de diffusion **moléculaire**

Nouvel ingrédient :



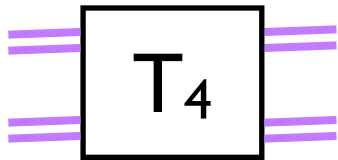
Résultat :

$$a_m \simeq 0.60 a$$

Petrov, Shlyapnikov and Salomon PRL '04

Brodsky, Klaptsov, Kagan, Combescot, XL JETP Lett. '06, PRA '06

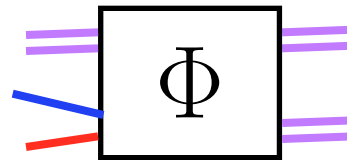
# 4 atomes : plus compliqué !



$$\left(\frac{8\pi}{a m^2}\right)^2 T_4 = \frac{4\pi}{m} a_m$$

$a_m$  : longueur de diffusion **moléculaire**

Nouvel ingrédient :



Résultat :

$$a_m \simeq 0.60 a$$

Petrov, Shlyapnikov and Salomon PRL '04

Brodsky, Klaptsov, Kagan, Combescot, XL JETP Lett. '06, PRA '06

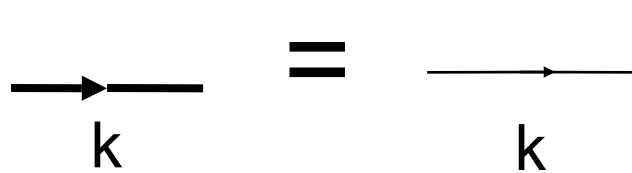
(Aussi : états liés à 2D)

Pb à N corps :

Superfluide : paramètre d'ordre  $\Delta$

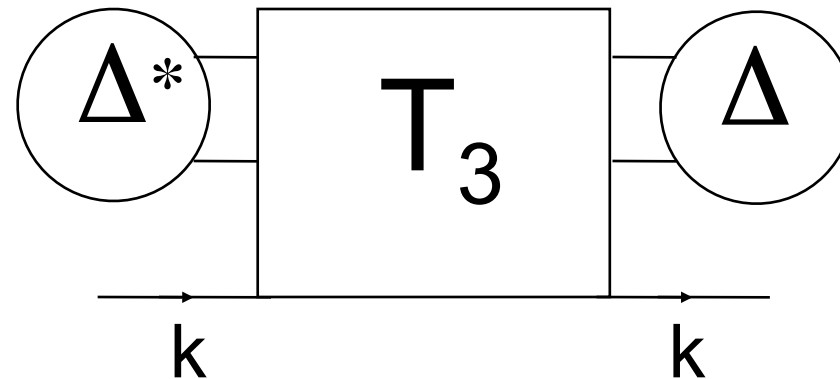
limite diluée ?  $\Delta \rightarrow 0$

Fon de Green « normale » :



$O(1)$

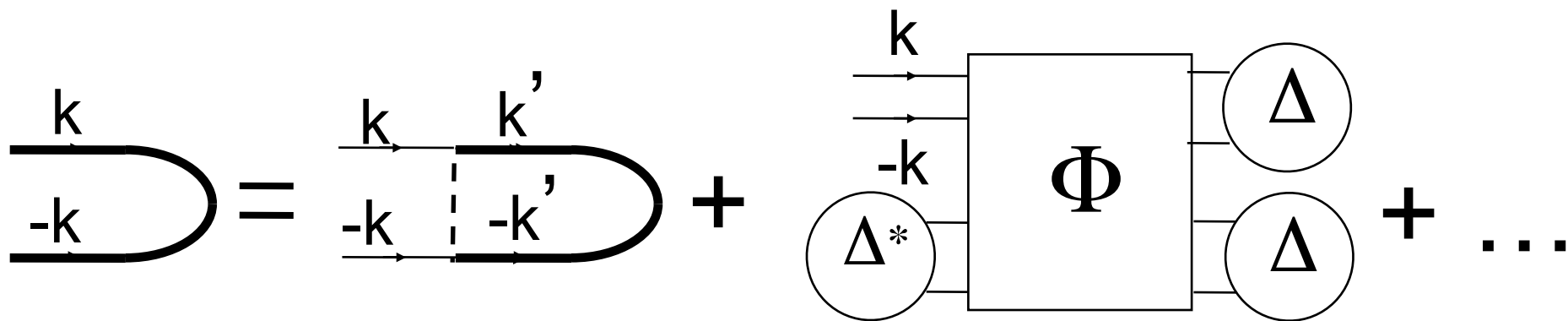
+



$O(\Delta^2)$

Pb à 3 corps !

Equation du « gap » (fon de Green « anormale ») :



$O(\Delta)$

$O(\Delta^3)$

Pb à 4 corps !

# Résultat (pas évident !):

XL, R. Combescot PRL **99** , 170402 (2007)  
PRA **78** , 053621 (2008)

$$2\mu = -\frac{\hbar^2}{ma^2} + \frac{4\pi\hbar^2 a_m}{2m} n \left( 1 + \frac{32}{3} \left( \frac{n a_m^3}{\pi} \right)^{1/2} + \dots \right)$$

Énergie de  
liaison

« champ  
Moyen »

Modes collectifs

$$\mu(n) = \frac{4\pi\hbar^2 a}{m} n \left[ 1 + \frac{32}{3} \left( \frac{na^3}{\pi} \right)^{1/2} + \dots \right]$$

T=0, BEC (Lee-Huang-Yang 1959)

# Résultat expérimental :

$$P(\mu_1, \mu_2, a) = 2P_0(\tilde{\mu})h_S\left(\tilde{\delta} \equiv \frac{\hbar}{\sqrt{2m\tilde{\mu}a}}\right).$$

$$\mu \equiv (\mu_1 + \mu_2)/2.$$

$$\tilde{\mu} = \mu - E_b/2$$

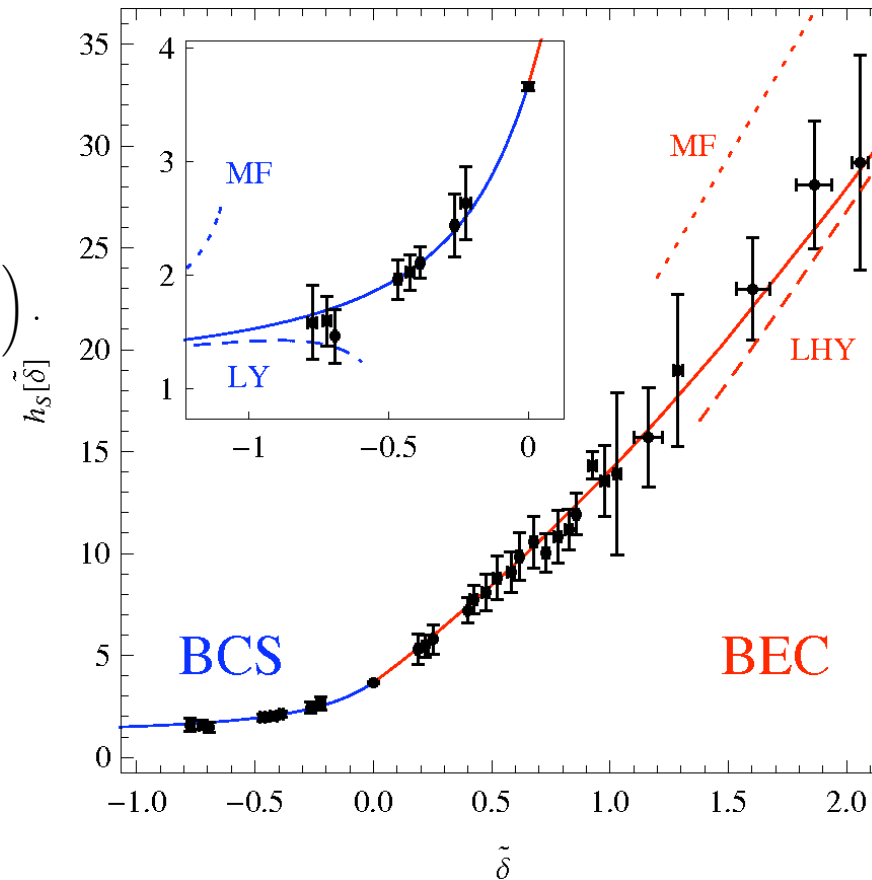


Figure 2:  $h_S(\tilde{\delta})$  of the  $T = 0$  balanced superfluid in the BEC-BCS crossover (black dots). The blue solid line is the fit  $h_S^{\text{BCS}}(\tilde{\delta})$  on the BCS side of the resonance, the red solid line is the fit  $h_S^{\text{BEC}}(\tilde{\delta})$  on the BEC side (see text). The dotted (dashed) red lines is the EoS including the mean-field (Lee-Huang-Yang) correction (32). Inset: Zoom on the BCS side. The dotted (resp. dashed) blue line is the EoS including the mean-field (resp. Lee-Yang) term. The systematic uncertainties on the  $x$  and  $y$ -axis are about 5%. The errors bars represent the standard deviation of the statistical uncertainty.

Navon et al.

Correction de LHY directement mesurée !

(autres mesures moins directes : modes collectifs)

# Gaz polarisés :

$$n_1 \geq n_2$$

$$n_1 - n_2 \equiv \frac{k_F^3}{6\pi^2}$$

Limite BEC :

$$\frac{E}{V} = -|E_b|n_2 + \frac{1}{2}g_{DD}(n_2)^2 + \frac{3}{10}\frac{k_F^5}{m_1} + g_{AD}(n_1 - n_2)n_2 \left[ 1 + \frac{k_F a_{AD}}{\pi} f(\delta) \right]$$

$$g_{DD} = \frac{4\pi}{(m_1 + m_2)} a_{DD} \quad g_{AD} = \frac{2\pi}{m_{AD}} a_{AD} \quad m_{AD} = \frac{(m_1 + m_2)(m_1)}{(2m_1 + m_2)}$$

$$\delta \equiv \frac{(m_D - m_1)}{(m_D + m_1)} = \frac{m_2}{2m_1 + m_2}$$

$$f(\delta) = \frac{3}{4} \frac{(\delta - 1)}{\delta} + \frac{3(1 + \delta)^2(1 - \delta)}{8\delta^2} \ln \left( \frac{1 + \delta}{1 - \delta} \right)$$

$a_{AD}$  : pb à **3** corps

$a_{DD}$  : pb à **4** corps

F.Alzetto, X. Leyronas accepté à PRA

# Gaz polarisés (suite):

## Limite $N_2 = 1$ “impureté”, “polaron”

Lobo, Recati, Giorgini, Stringari '06

F. Chevy '06

Combescot, Recati, Lobo, Chevy '07

Pilati, Giorgini '08

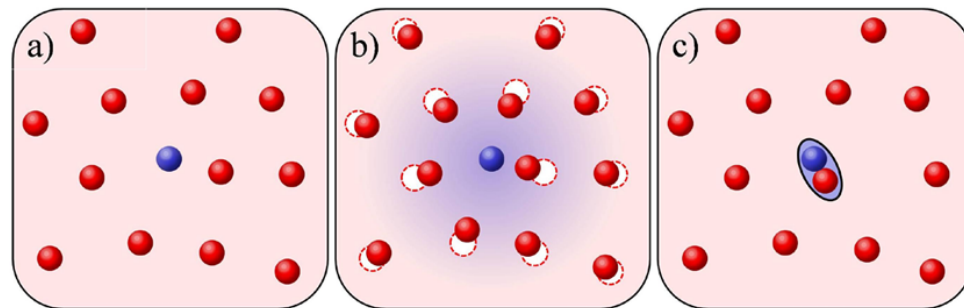
Prokof'ev, Svistunov '08

Combescot, Giraud '08

Mora, Chevy '09

Punk, Dumitrescu, Zwerger '09

Combescot, Giraud, Leyronas '09



Schirotzek et al. '09

## Limite BEC , $n_2 = 0$

$$\mu_2^{\text{imp}} = -|E_b| - \frac{k_F^2}{2m_1} + g_{AD}n_1 \left[ 1 + \frac{k_F a_{AD} f(\delta)}{\pi} \right]$$

F. Alzetto, X. Leyronas accepté à PRA

## Problème à 3 corps

## Gaz polarisés (suite):

### Limite $N_2 = 1$ “impureté”, “polaron”

Lobo, Recati, Giorgini, Stringari '06

F. Chevy '06

Combescot, Recati, Lobo, Chevy '07

Pilati, Giorgini '08

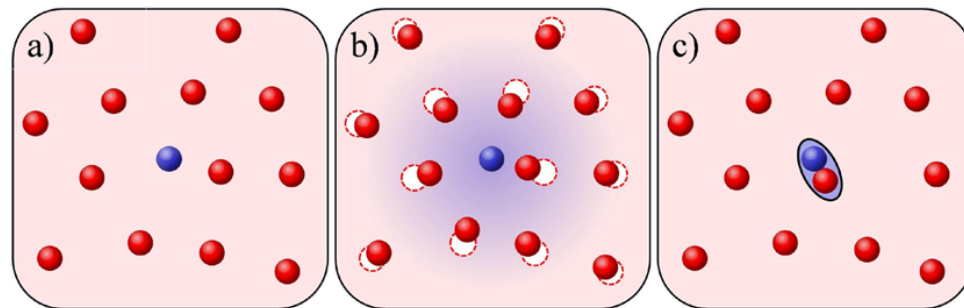
Prokof'ev, Svistunov '08

Combescot, Giraud '08

Mora, Chevy '09

Punk, Dumitrescu, Zwirger '09

Combescot, Giraud, Leyronas '09



Schirotzek et al. '09

### Limite BEC , $n_2 = 0$

$$\mu_2^{\text{imp}} = -|E_b| - \frac{k_F^2}{2m_1} + g_{\text{AD}}n_1 \left[ 1 + \frac{k_F a_{\text{AD}} f(\delta)}{\pi} \right]$$

F. Alzettto, X. Leyronas accepté à PRA

### Problème à 3 corps

(pour en savoir plus : thèse Sébastien Giraud !)

## Conclusion

- Equation d'état mesurée dans la transition BEC-BCS permet une confrontation quantitative aux théories
- Limite BEC : longueurs de diffusion dimère-dimère (pb à 4 corps), et atome-dimère (pb à 3 corps), correction LHY
- Limite unitaire ( $a \rightarrow \pm \infty$ ) comportement de Liquide de Fermi