



Laboratoire Kastler Brossel
Université Paris VI

Fermions et bosons dégénérés au voisinage d'une résonance de Feshbach

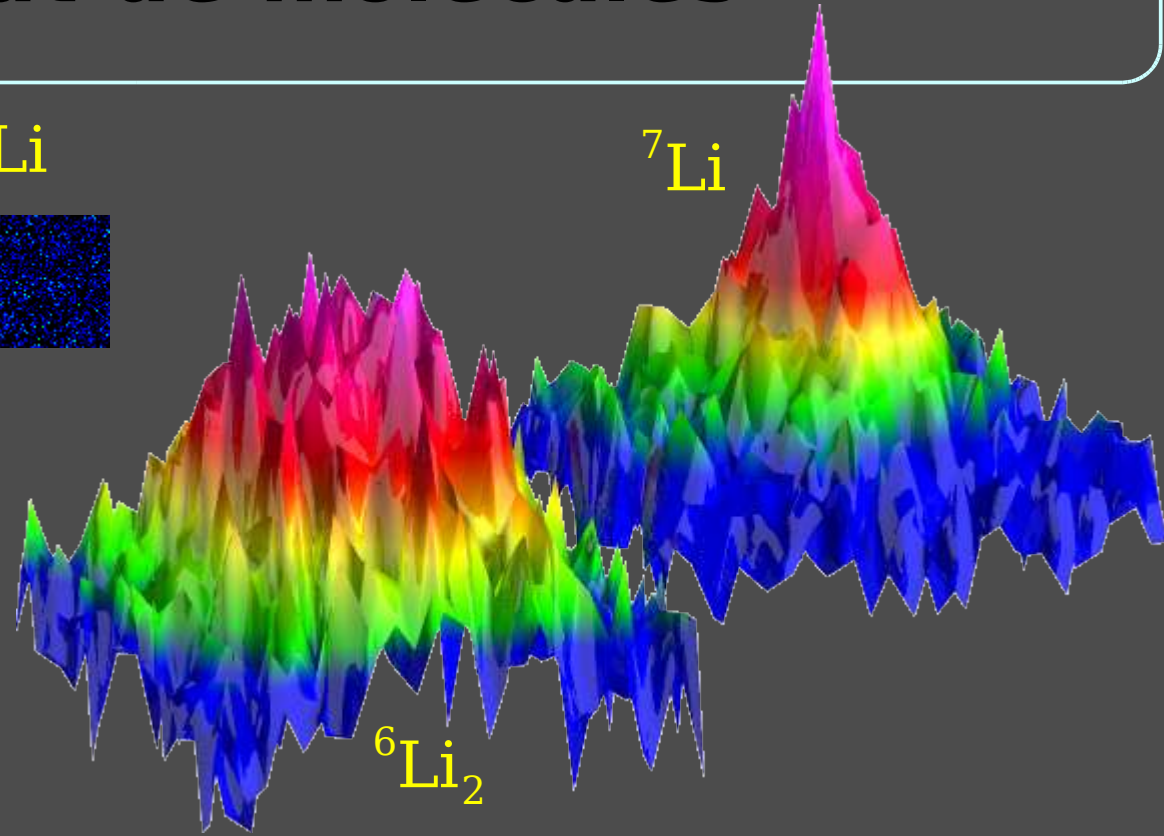
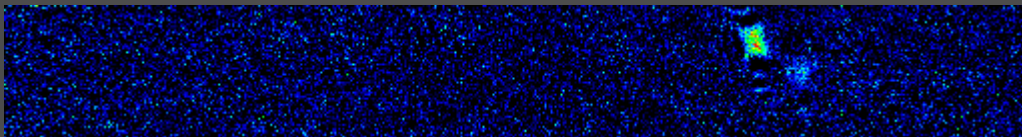
Solitons d'ondes de matière et condensat de molécules

Julien Cubizolles

${}^6\text{Li}$

${}^7\text{Li}$

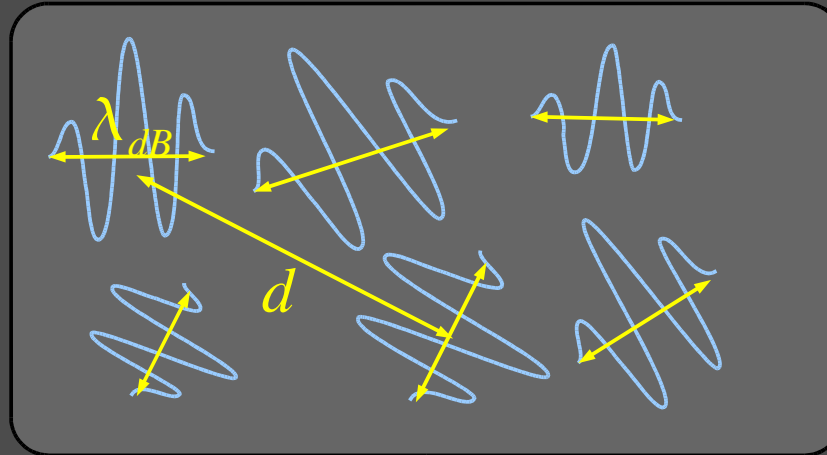
${}^6\text{Li}_2$



Systemes quantiques dégenérés

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{\sqrt{2 \pi m k_B T}}$$

$$d \approx n^{-1/3}$$



$$\lambda_{dB} \approx d$$

Bosons ${}^7\text{Li}$

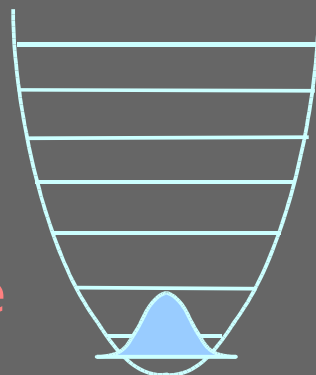
Fermions ${}^6\text{Li}$

symétrisation de la fonction d'onde à N corps



amplification bosonique

$T=0$



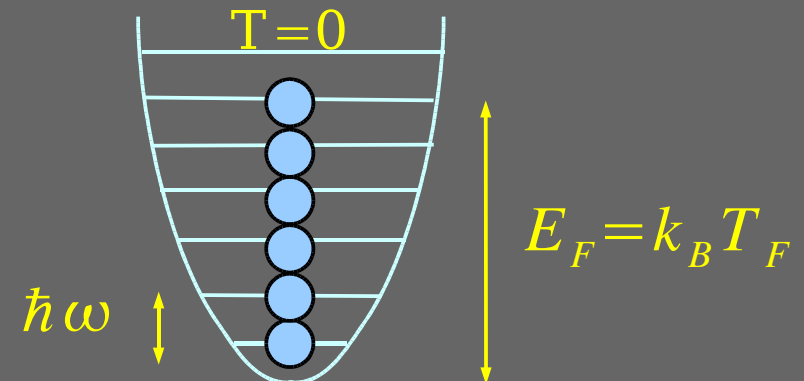
Condensation de Bose-Einstein : transition de phase

antisymétrisation de la fonction d'onde à N corps



principe d'exclusion de Pauli

$T=0$



Mer de Fermi

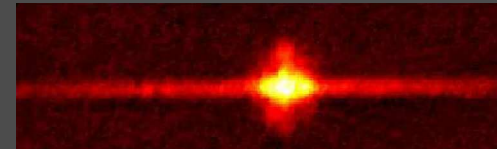
Objectifs

Bosons : Condensats de Bose Einstein (CBE)

- utilisés depuis 1995
- interaction attractive 3D \Rightarrow effondrement



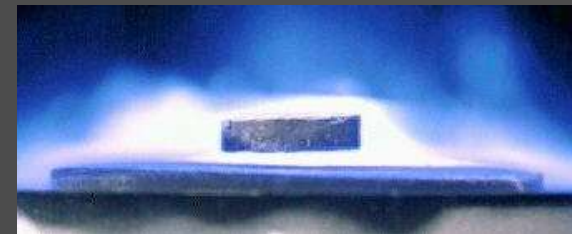
Cornell, Wieman, Ketterle



I Système 1D en interaction attractive : Soliton

Fermions

- théorie de la superfluidité fermionique supraconducteurs



- $\frac{T}{T_F} = 0,2$ mélange bosons/fermions dégénérés JILA, ENS

II Gaz de fermions en interaction forte

Contrôle des interactions

Interaction dans les gaz ultra-froids

À basse température, seulement diffusion en onde s



Pas d'interaction entre fermions identiques

Longueur de diffusion : a

- section efficace de collision élastique
- signe gouverne l'énergie d'interaction

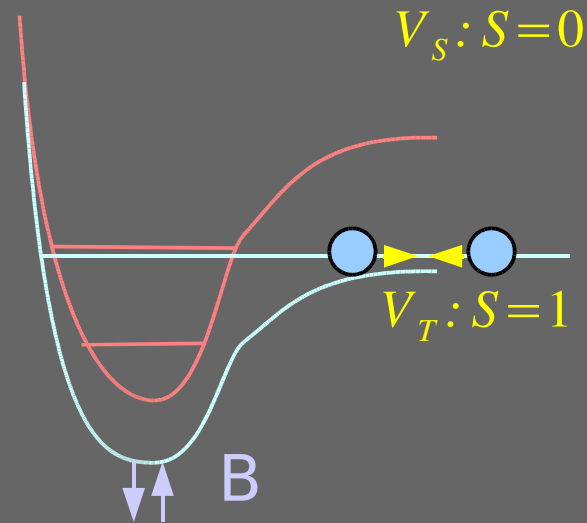
$$\begin{aligned} \sigma &= 8\pi a^2 \text{ bosons} \\ \sigma &= 0 \text{ fermions} \\ a &> 0 \text{ répulsive} \\ a &< 0 \text{ attractive} \end{aligned}$$

Résonances de Feshbach

Variation de l'interaction avec B

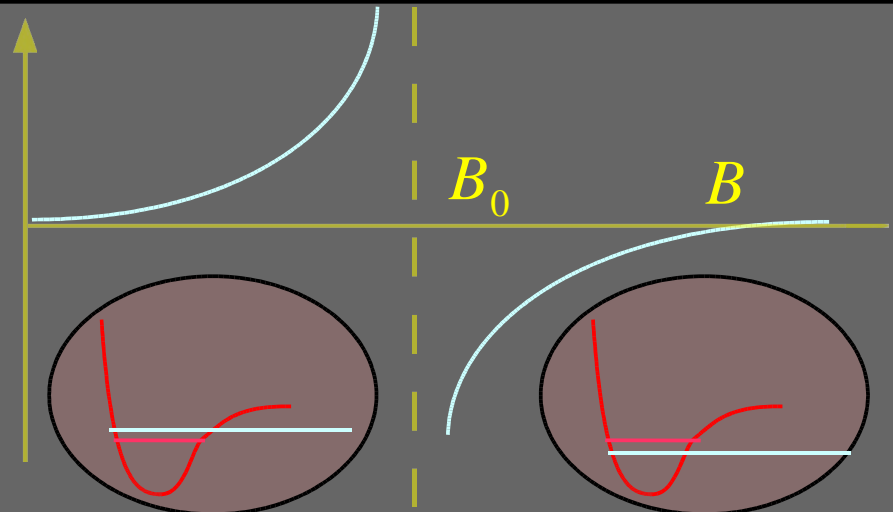
- 2 potentiels V_S et V_T
- couplage entre canal ouvert et canal fermé
- décalage dépend de B

Résonance pour $B = B_0$



Modification de a

- amplitude
- signe

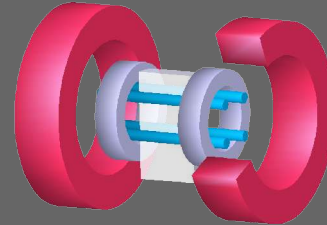


Contrôle expérimental des interactions

Techniques Expérimentales

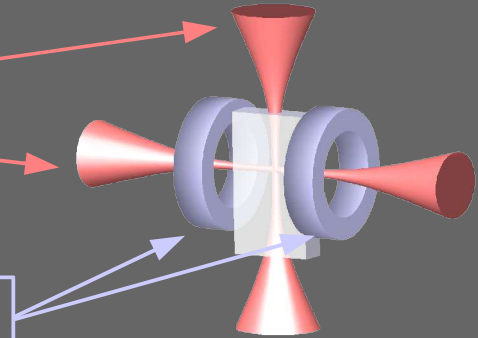
Refroidissement de ${}^7\text{Li}$ et ${}^6\text{Li}$

- 1000 K : four
- 1 mK : refroidissement laser
- 10 μK : refroidissement évaporatif



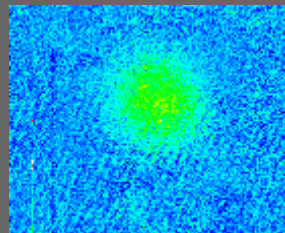
Exploration des résonances

- piège optique
- évaporation par diminution de la profondeur
- bobines de champ magnétique



Imagerie par absorption

- nombre d'atomes
- distribution de position
- distribution d'impulsion après expansion



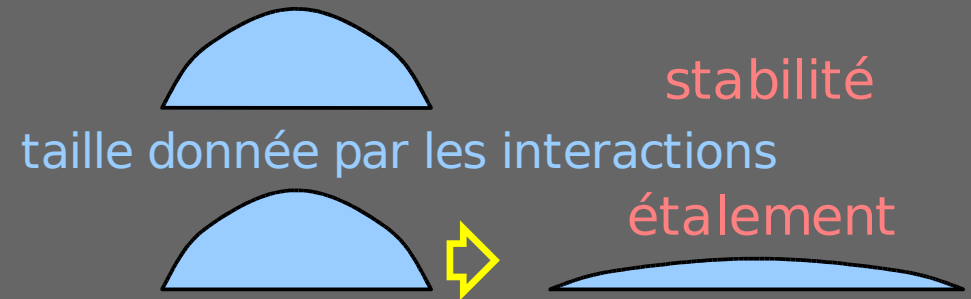
10^5 fermions
 $T \approx 0,2 T_F$

Bosons : Solitons d'ondes de matière

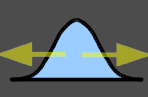
Bosons dégénérés en interaction : $a > 0$

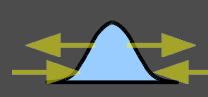
$a > 0$

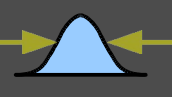
- interaction répulsive
- coupure du confinement



Bosons dégénérés en interaction : $a < 0$

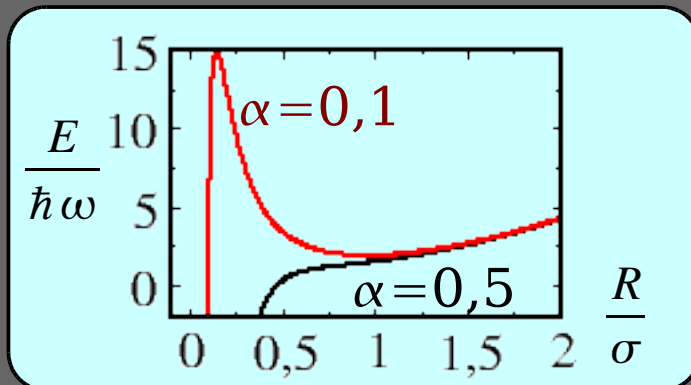
$$E_c \propto \frac{\hbar^2}{m R^2}$$


$$E_{inter} \propto \frac{g_d N}{R^d}$$


$$E_{pot} \propto m \omega^2 R^2$$


$a < 0$ 3D

- confinement : $\alpha = \frac{N|a|}{\sigma}$ limité
avec $\sigma = \sqrt{\frac{\hbar}{m \omega}}$
effondrement



- expansion : étalement

$a < 0$ 1D

1D : compensation

- dispersion naturelle
- interaction attractive

stabilité sans confinement

$$E_c \propto \frac{\hbar^2}{m R^2} \quad \text{et} \quad E_{inter} \propto -\frac{N |g_{1D}|}{R}$$



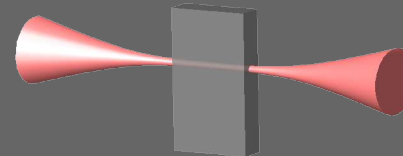
$$R = \frac{\hbar^2}{N m |g_{1D}|}$$

Solitons d'ondes de matière

Comment réaliser un système 1D ?

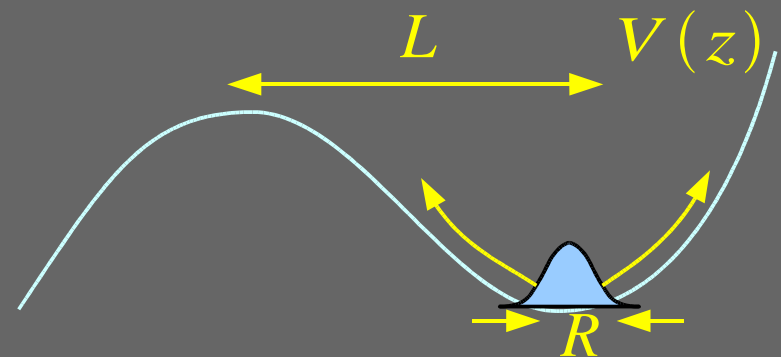
- pas de confinement axial
- confinement harmonique radial $\omega_{\perp} \Rightarrow g_{1D} = 2 a \hbar \omega_{\perp}$
- énergie totale : $E_{tot} \leq \hbar \omega_{\perp} N |a|$ limité

piège optique



propagation dans un potentiel extérieur $V(z)$ avec : $R \ll L$

propagation sans déformation

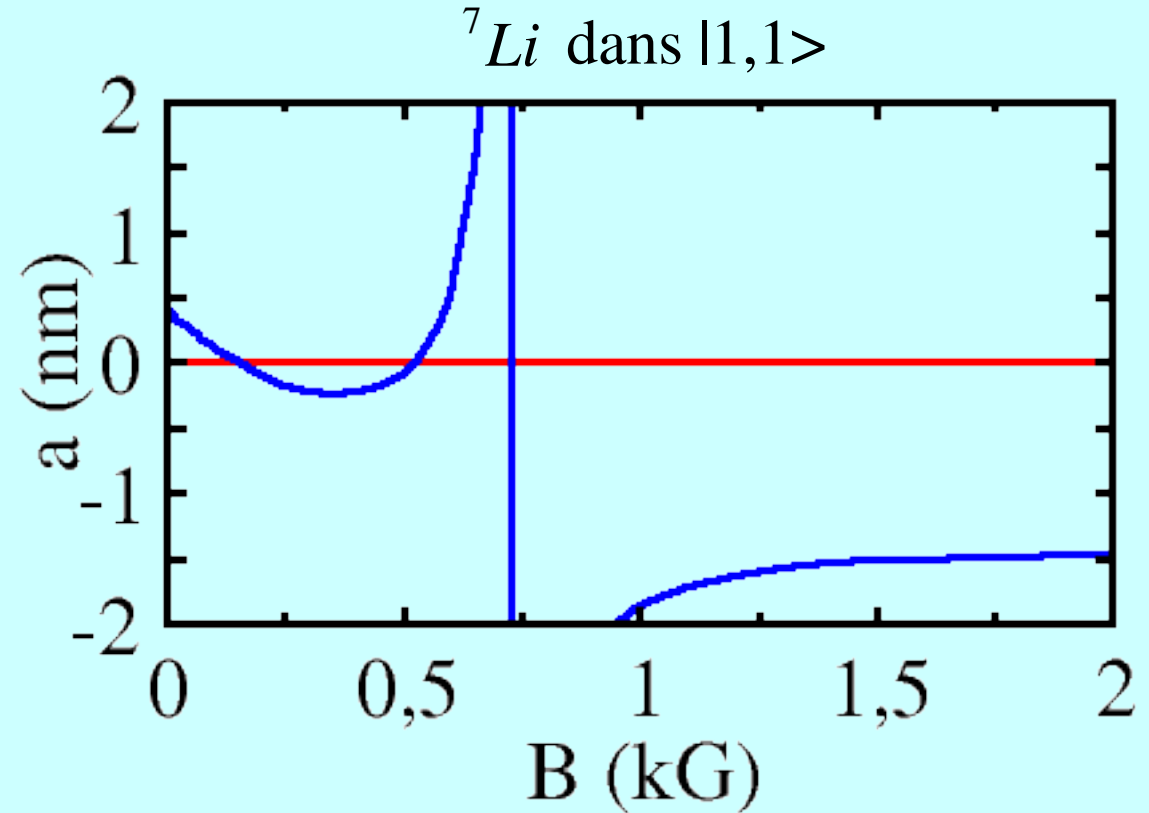
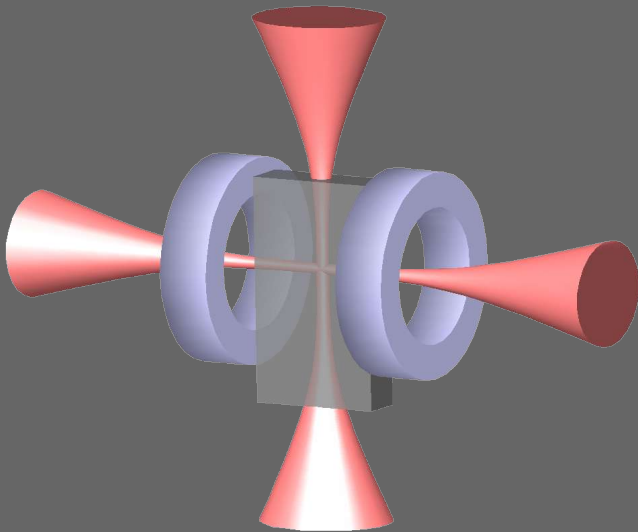


Production d'un soliton

Stratégie

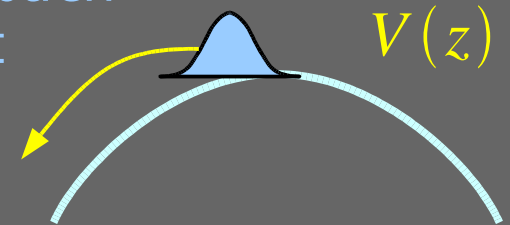
- 1 CBE 3D avec $a > 0$
- de $a > 0$ à $a < 0$
- de 3D à 1D

Piège optique croisé de géométrie variable

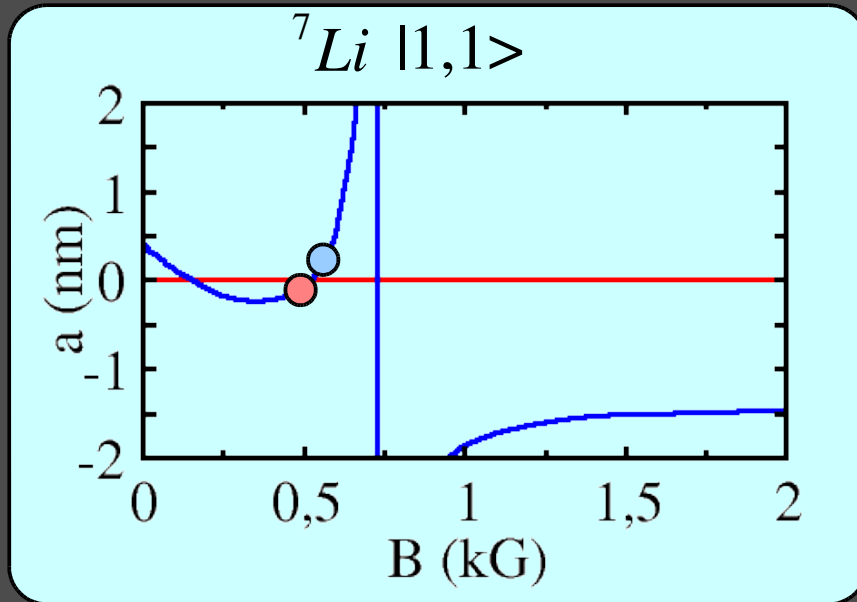


Bobines

- résonance de Feshbach
- potentiel expulsant



Propagation du soliton

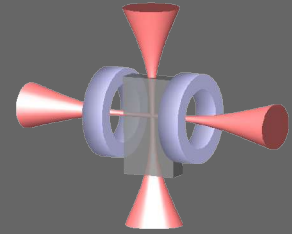
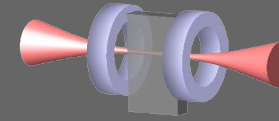


- évaporation $a=6,5$ nm

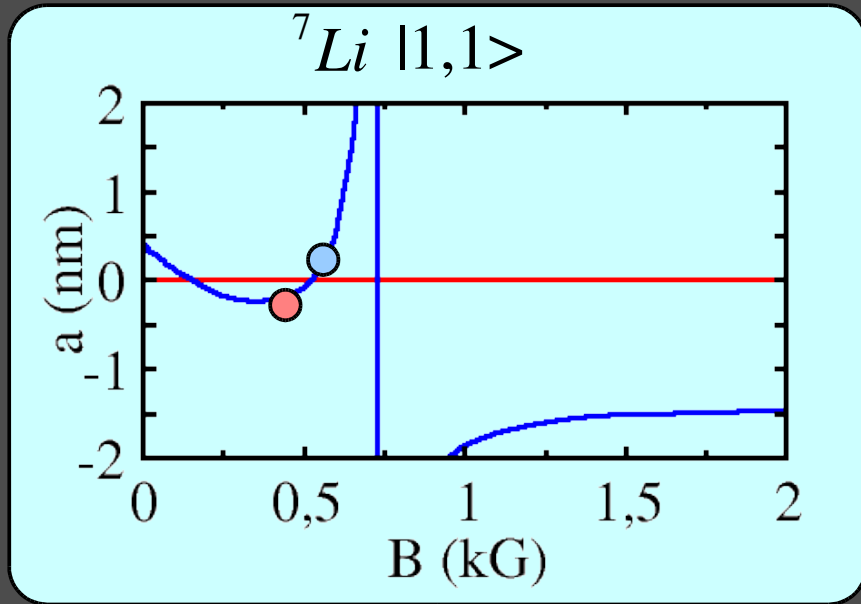
- ajustement de a



- lâcher 1D



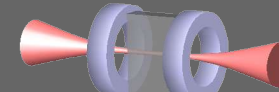
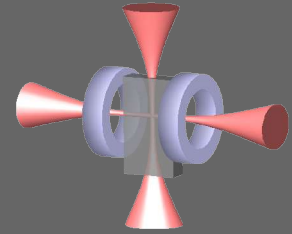
Propagation du soliton



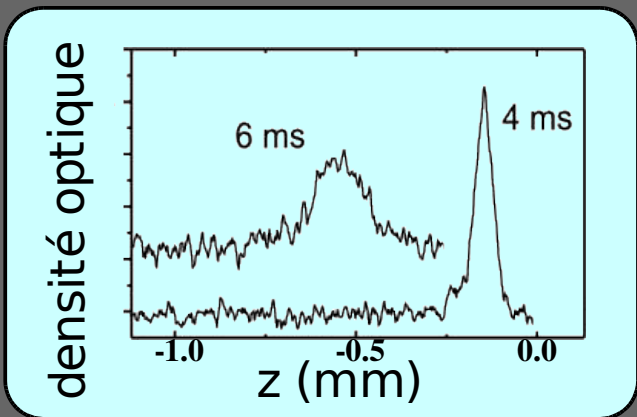
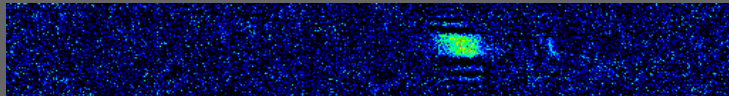
- évaporation $a=6,5$ nm

- ajustement de a

- lâcher 1D

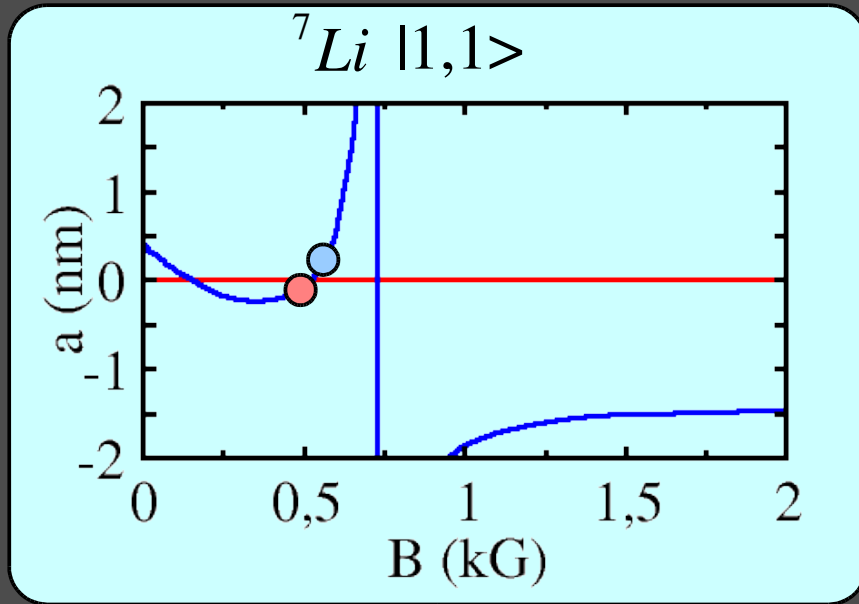


$a = +0,1$ nm



dispersion naturelle
taille multipliée par 5

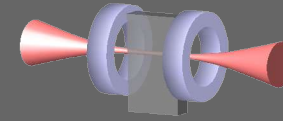
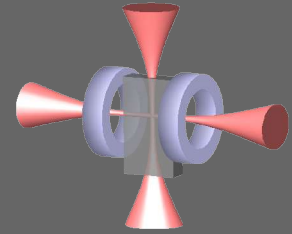
Propagation du soliton



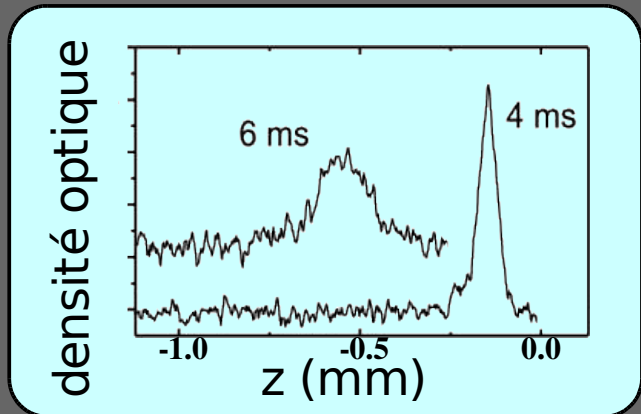
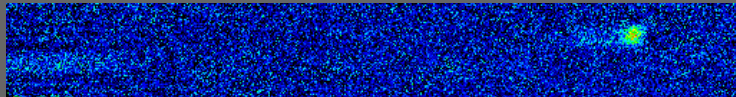
- évaporation $a=6,5$ nm

- ajustement de a

- lâcher 1D

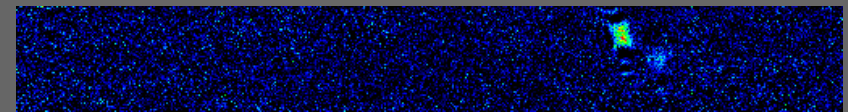


$a=+0,1$ nm



dispersion naturelle
taille multipliée par 5

$a=-0,2$ nm



↑ 8ms

Soliton de 6000 atomes

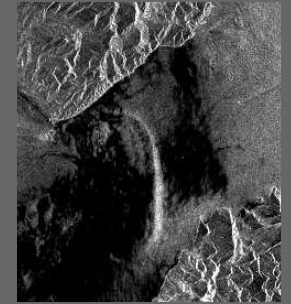
se propage sur 500 fois
sa taille sans déformation

(aussi trains de solitons à RICE University)

Le monde des solitons

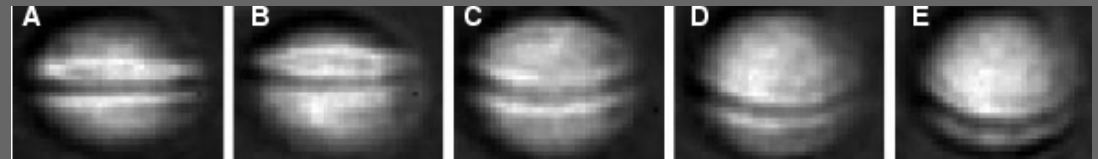
ondes de perturbation

- hydrodynamique



- solitons noirs ou gris dans des condensats

$$a > 0$$

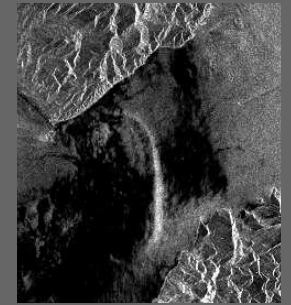


NIST, Hannovre

Le monde des solitons

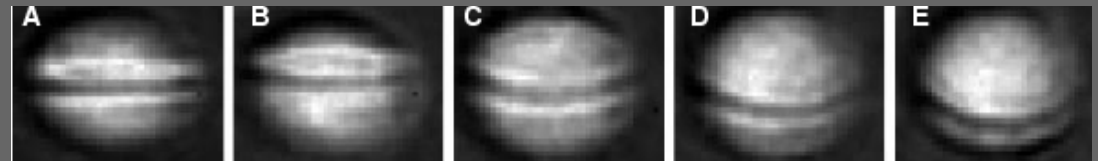
ondes de déformation

- hydrodynamique



- solitons noirs ou gris dans des condensats

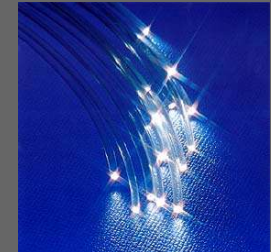
$$a > 0$$



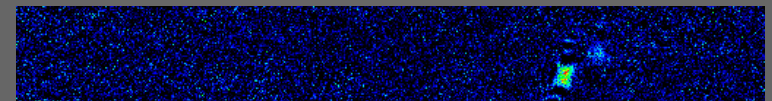
NIST, Hannovre

ondes de particules

paquets d'ondes lumineuses : fibres optiques



1^{ers} paquets d'ondes de matière



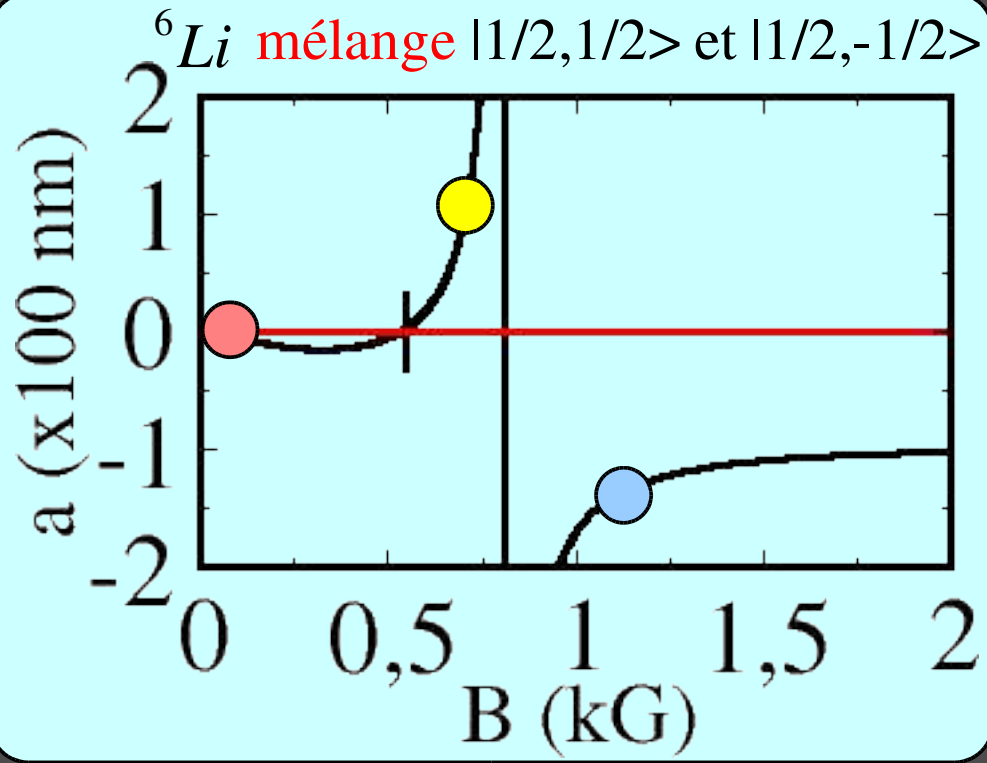
- solitons d'ordre supérieur
- interactions entre solitons



restent à étudier

Fermions en régime d'interaction forte

Résonance de Feshbach entre fermions



⁶Li dans deux états de spin
fermions en interaction forte

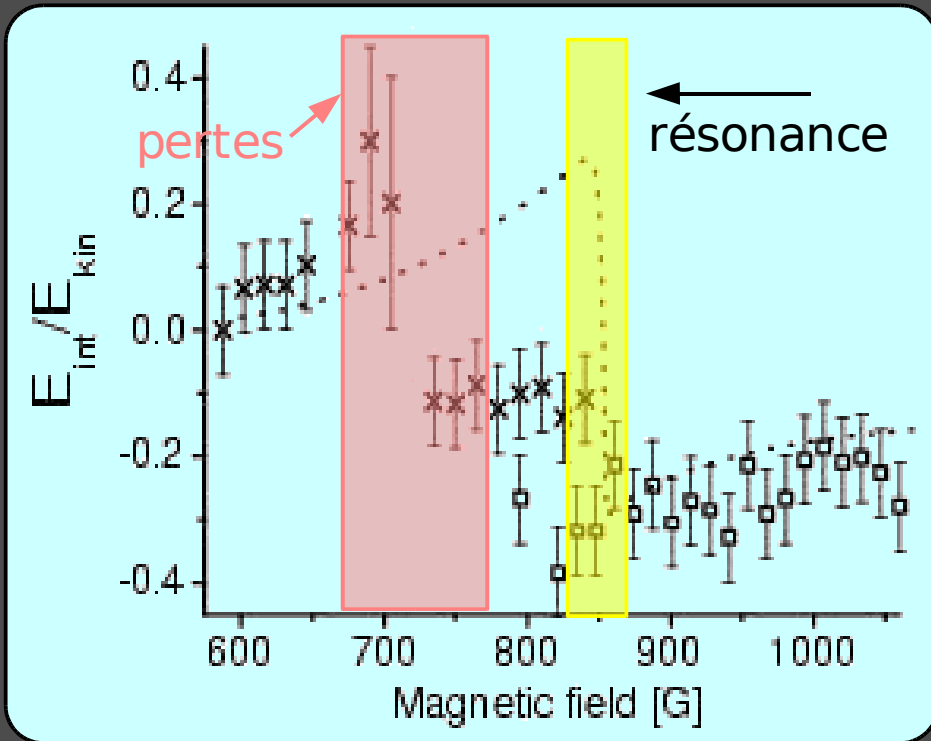
Stratégie $E = \cancel{E}_{inter} + E_{cin} + \cancel{E}_{pot}$

- coupure du piège \times $\Rightarrow E_{inter} + E_{cin}$
- \times et bobines \times $\Rightarrow E_{cin}$

Energie d'interaction

- mélange 1/2,-1/2 à B=1060 G (a<0) ●
ou B≈0 G (a≈0) ● $\frac{T}{T_F} \approx 0,2 - 0,5$
- on amène B au voisinage de la résonance ●

Énergie d'interaction



- loin de résonance : champ moyen
- stabilité à résonance
- interaction attractive à

résonance limite unitaire $a \rightarrow \pm\infty$

$$E_{tot} \propto (1 + \beta) E_F \quad (\text{Heiselberg})$$

$\beta < 0$ interaction attractive

$|\beta| < 1$ système stable

- pertes loin de résonance \neq cas des bosons
- changement de signe dans la zone de pertes

⇒ molécules ?

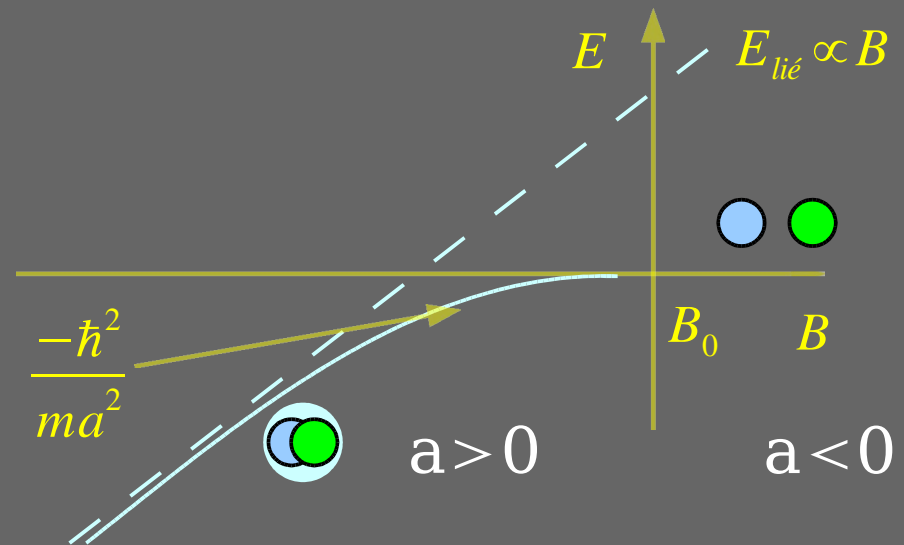
Résonances de Feshbach et molécules

Problème à 2 corps

- état lié pour $a > 0$
- de taille $\propto a$

Formation

- recombinaison à 3 corps amplifiée à la résonance



- molécules piégées
- «cachées» par E_i ; pertes pour $B < 750$ G

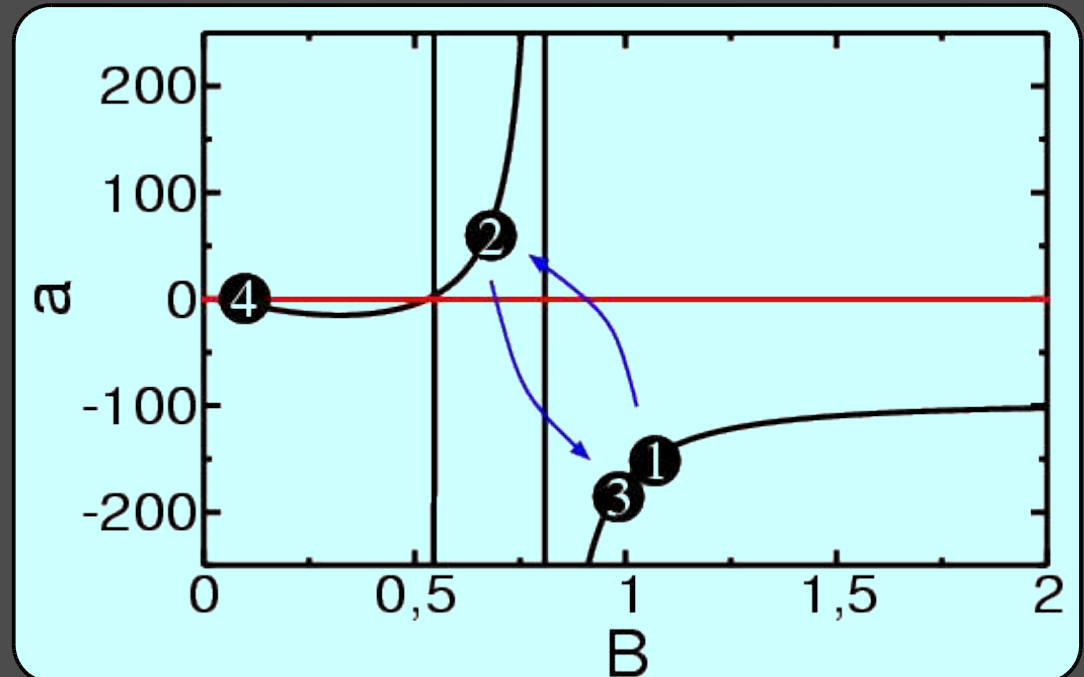
- mélange en **1**: N_1

- **1** \rightarrow **2** : $N_2 < N_1$

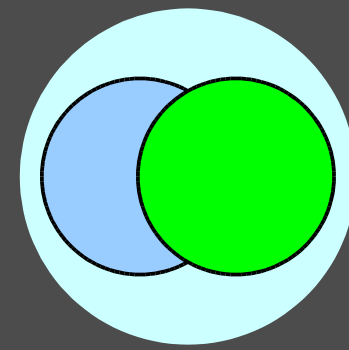
- **2** \rightarrow **3** : $N_3 > N_2$?

- **4** détection

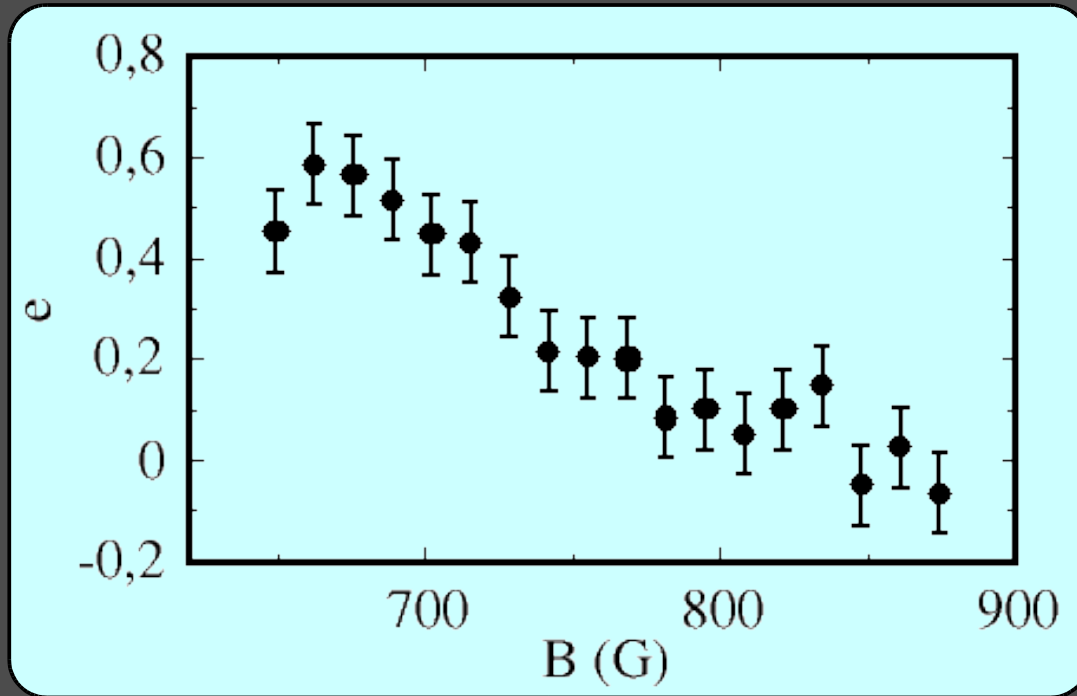
efficacité $1 - \frac{N_2}{N_3}$ (aussi JILA)



Molécules !



Fraction moléculaire

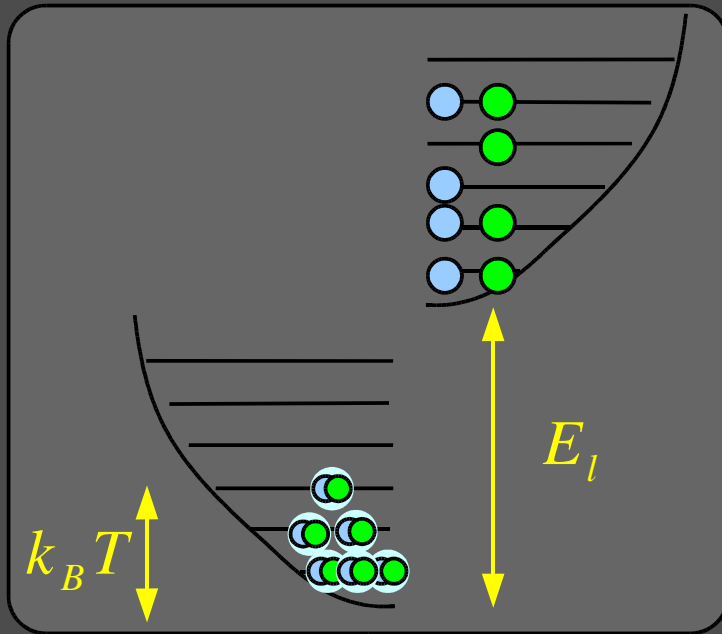


- N3 comparable à N1 : réversible
- conversion d'une fraction macroscopique
- e augmente avec $E_l = h^2 l (ma^2)$

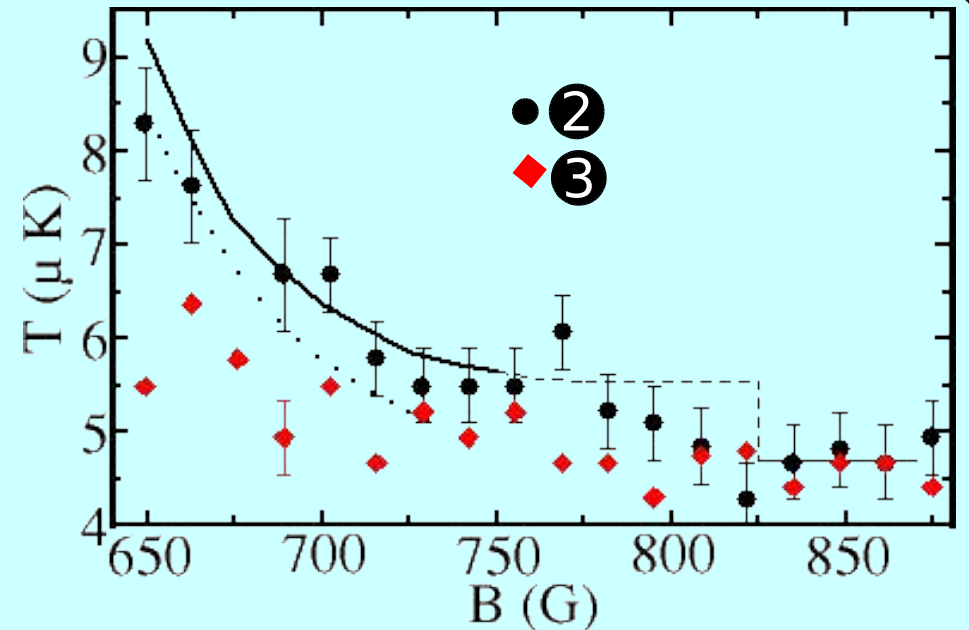
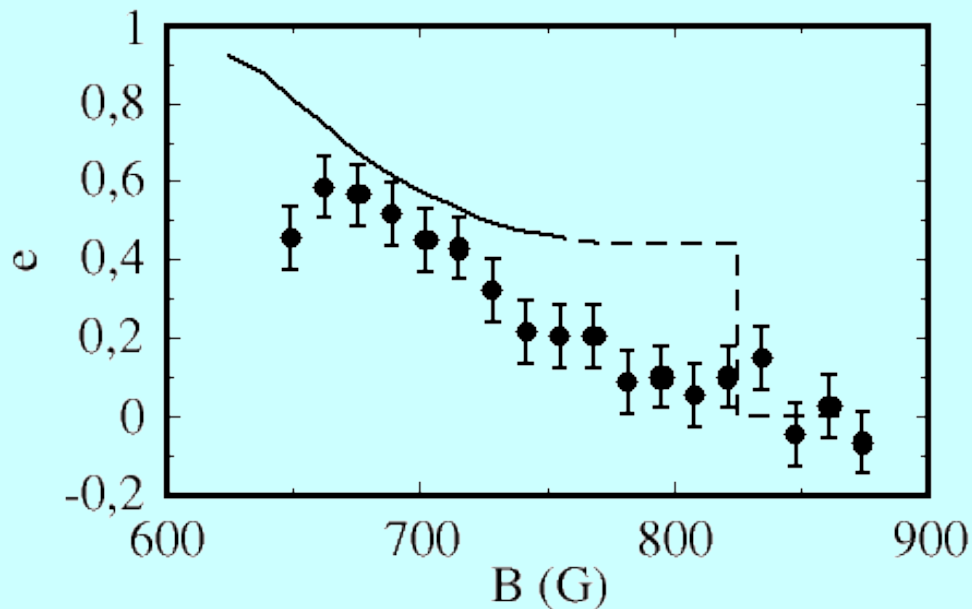


Formation thermodynamique

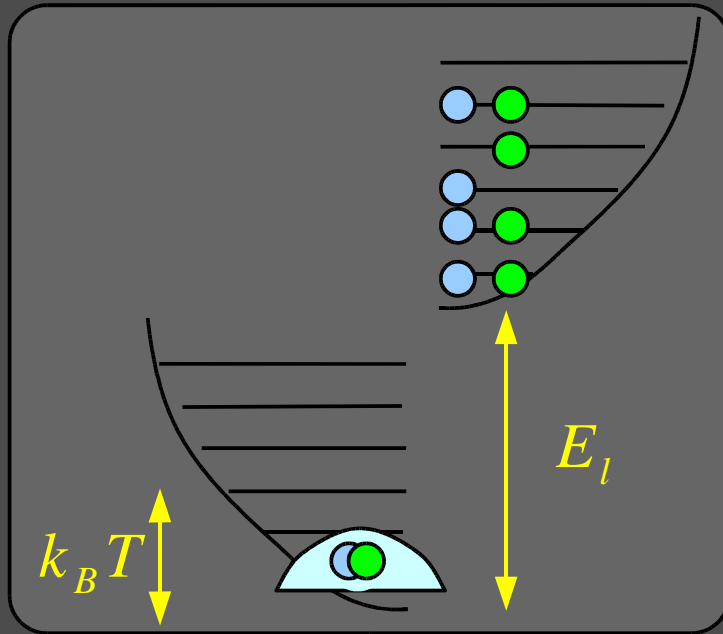
Efficacité de formation



- équilibre thermo assuré par les collisions à 2 et 3 corps
- à B donné un grand $\frac{E_l}{k_B T}$ favorise les molécules
- conservation de l'entropie fixe e et T au point **2**



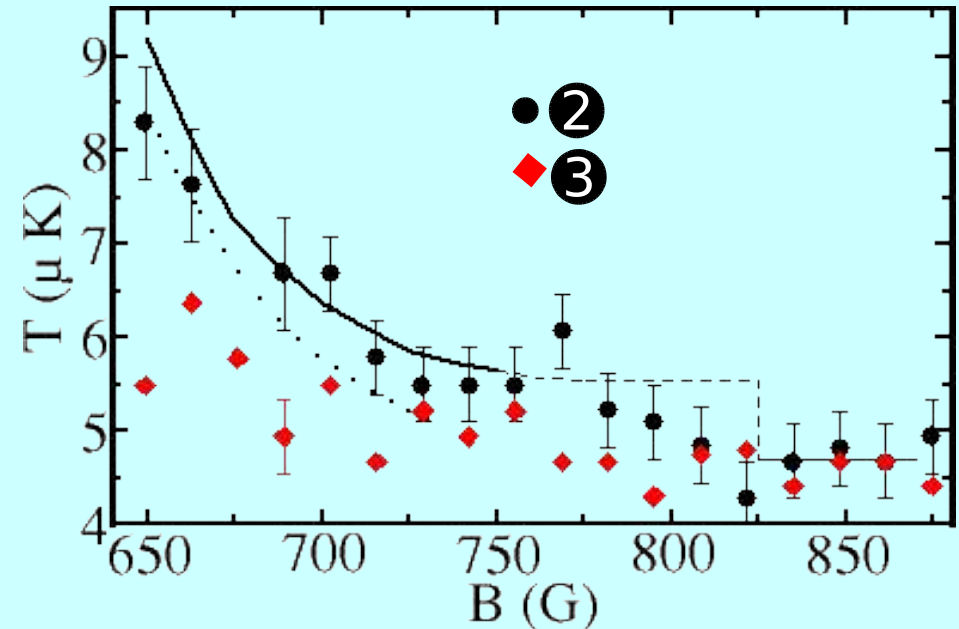
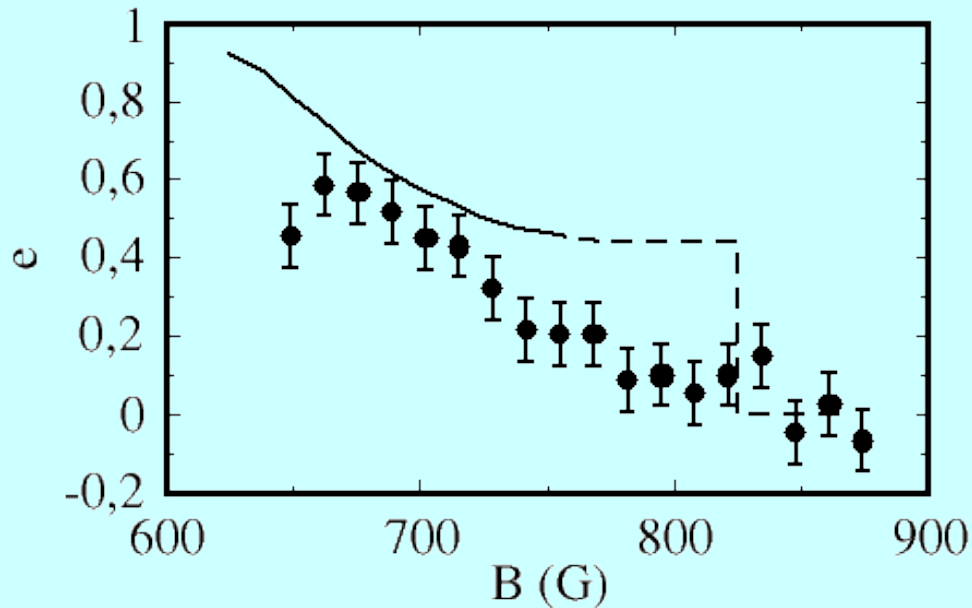
Efficacité de formation



- équilibre thermo assuré par les collisions à 2 et 3 corps

- à B donné un grand $\frac{E_l}{k_B T}$ favorise les molécules

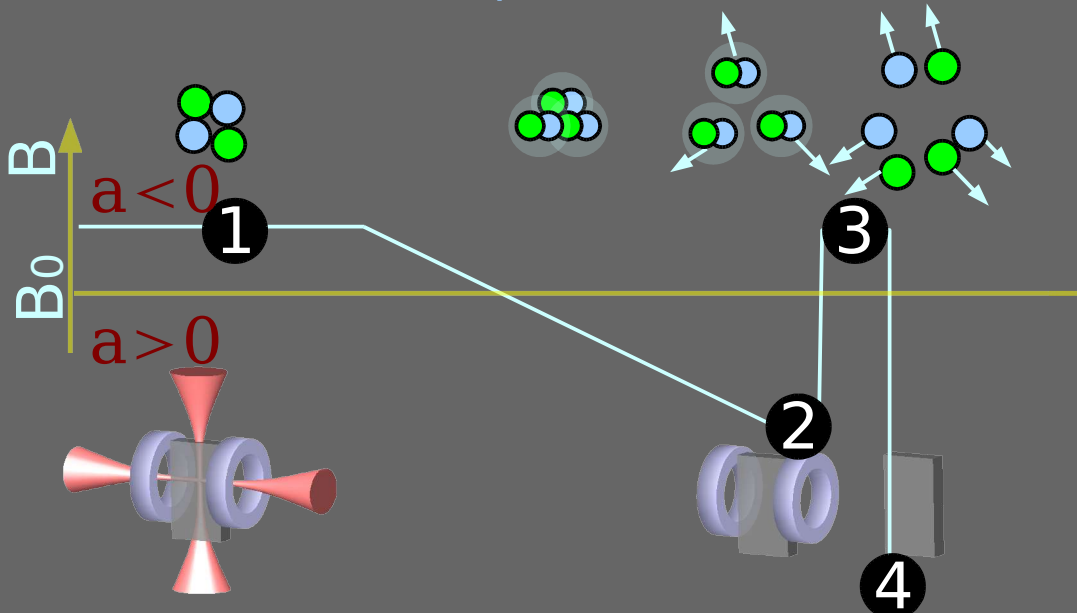
- conservation de l'entropie fixe e et T au point **2**



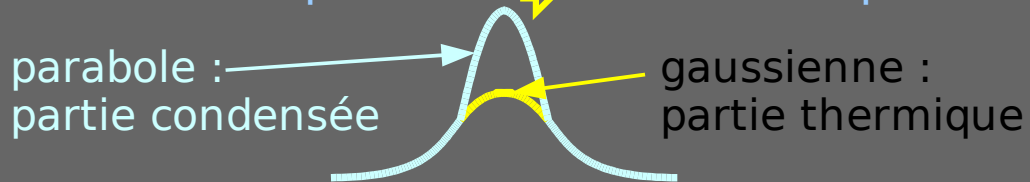
Condensat de molécules

identification

- distribution d'impulsion des molécules

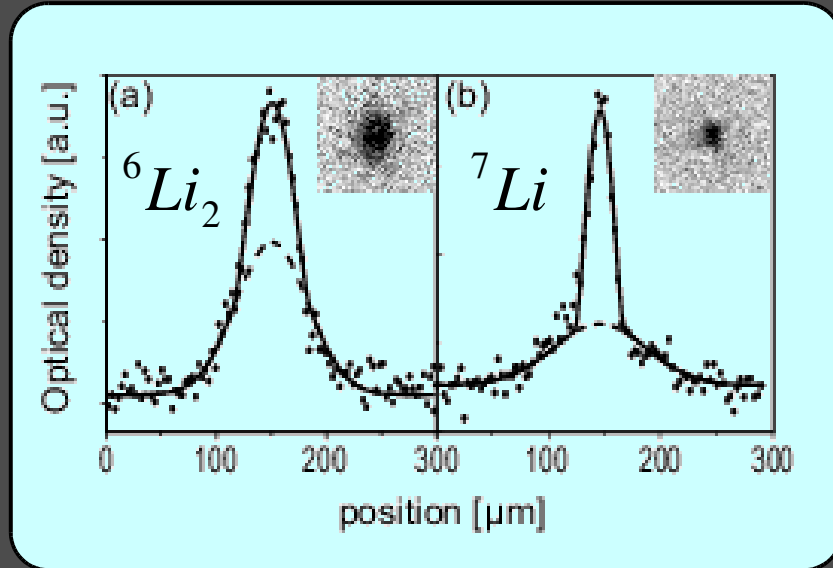


- traditionnellement : double structure de la distribution d'impulsion \Rightarrow transition de phase



$3 \cdot 10^4$ molécules

$$T \approx T_{\text{CBE}} = 2,4 \mu\text{K}$$



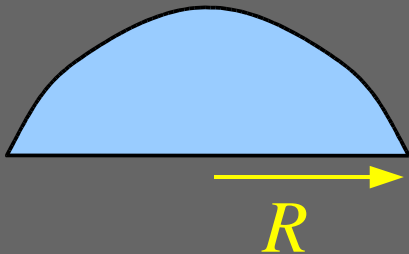
(aussi à JILA, Innsbruck, MIT, Duke)

double structure \Rightarrow CBE
 nombres comparables
 et tailles très différentes

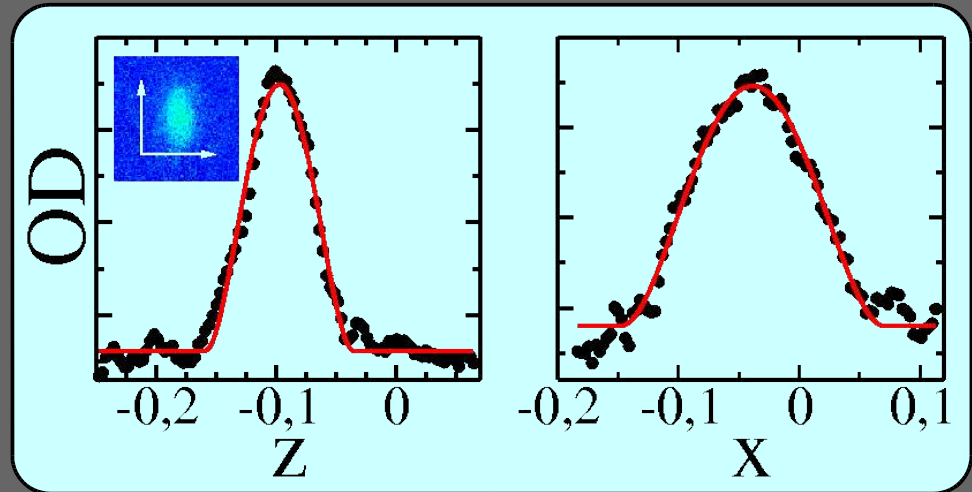
$$a_{\text{mol}} \gg a_7$$

Détermination de a_{mol}

- Expansion anisotrope : hydrodynamique
- Lois d'échelle : détermination de R



$$R \propto (Na)^{(1/5)}$$



condensat pur de $2,3 \cdot 10^4$ molécules
anisotropie 2,0 : hydrodynamique 1,98

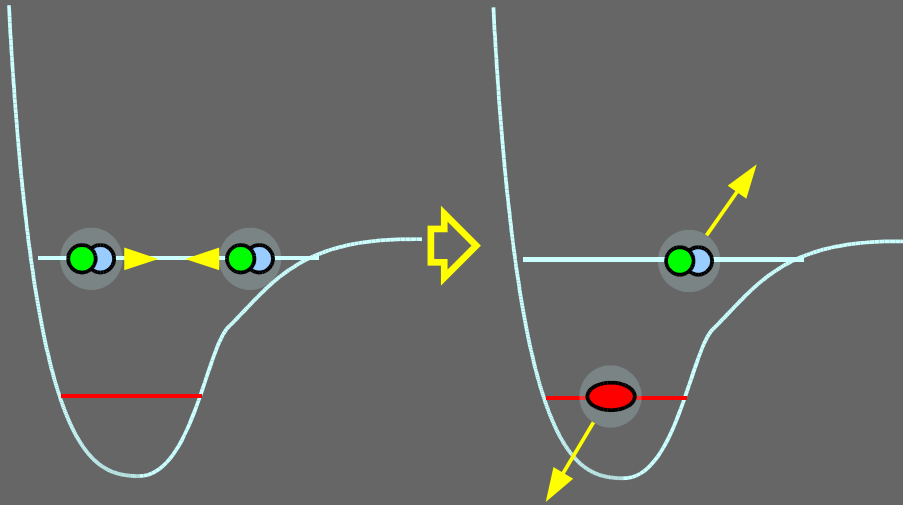
$$a_{mol} = 170_{-60}^{+100} \text{ nm en bon accord}$$

$$a_{at} = 306 \text{ nm} \Rightarrow 0,6 \times a_{at} = 183 \text{ nm}$$

Théorie $a_{mol} = 0,6 a_{at}$
(Petrov et al.)

Durée de vie des molécules

Relaxation collisionnelle vers des états profonds non piégés

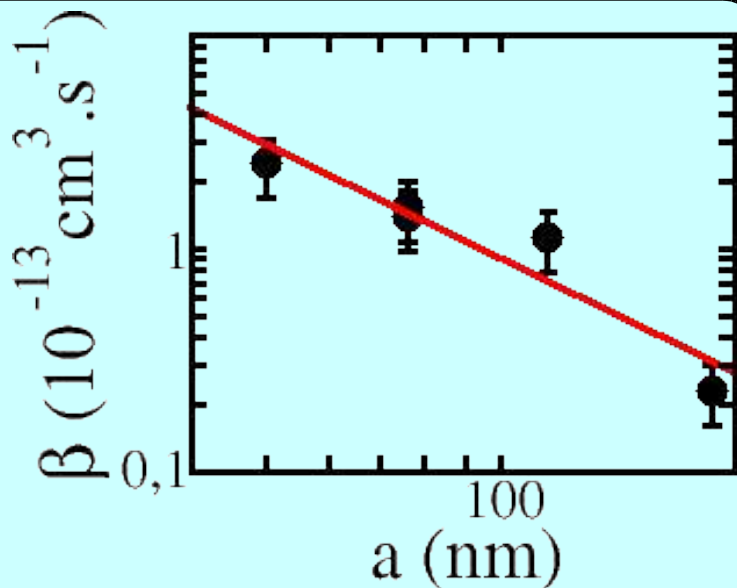


4 corps : relaxation

- bosons $\beta \propto a$
- fermions $\beta \propto a^{-2,55}$



Le principe de Pauli stabilise les molécules de fermions proches de résonance



La durée de vie augmente à résonance

$$\beta \propto a^{-1,9 \pm 0,8}$$

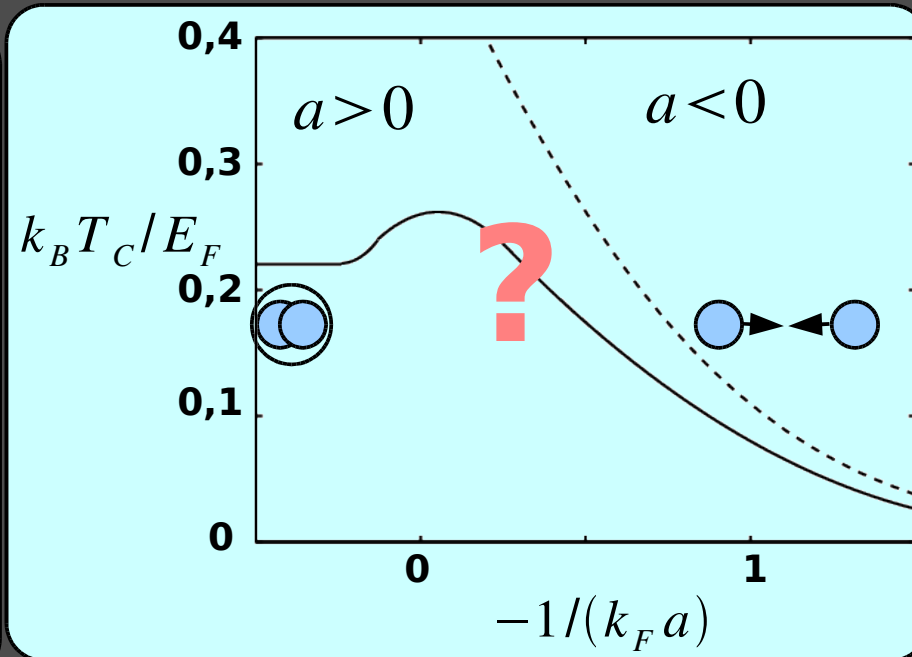
$$\beta \propto a^{-2,55} \quad (\text{Petrov et al.})$$

durée de vie 1000 fois plus longue que dans les bosons

Superfluide fermionique

$$|a| \ll 1/k_F \quad a > 0$$

- CBE de molécules
- taille $a \ll n^{-1/3}$
- énergie de liaison $E_l = \hbar^2 / (m a^2)$



$$|a| \ll 1/k_F \quad a < 0$$

- condensation de paires : BCS
- taille $\xi \gg n^{-1/3}$
- énergie de liaison $\hbar \Delta \propto E_F e^{-\pi / (2 k_F |a|)}$

exploré

en cours

zone de transition :

de nombreux articles théoriques

Conclusion

Résonance de Feshbach : un outil très efficace

- Observation des premiers solitons d'onde de matière
- Gaz dégénéré de molécules : intérêt des fermions
- 1ère limite du superfluide fermionique

Perspectives

- appariement en ondes p : ^3He
- régime $na^3 \gg 1$
- régime BCS

Merci à tous

