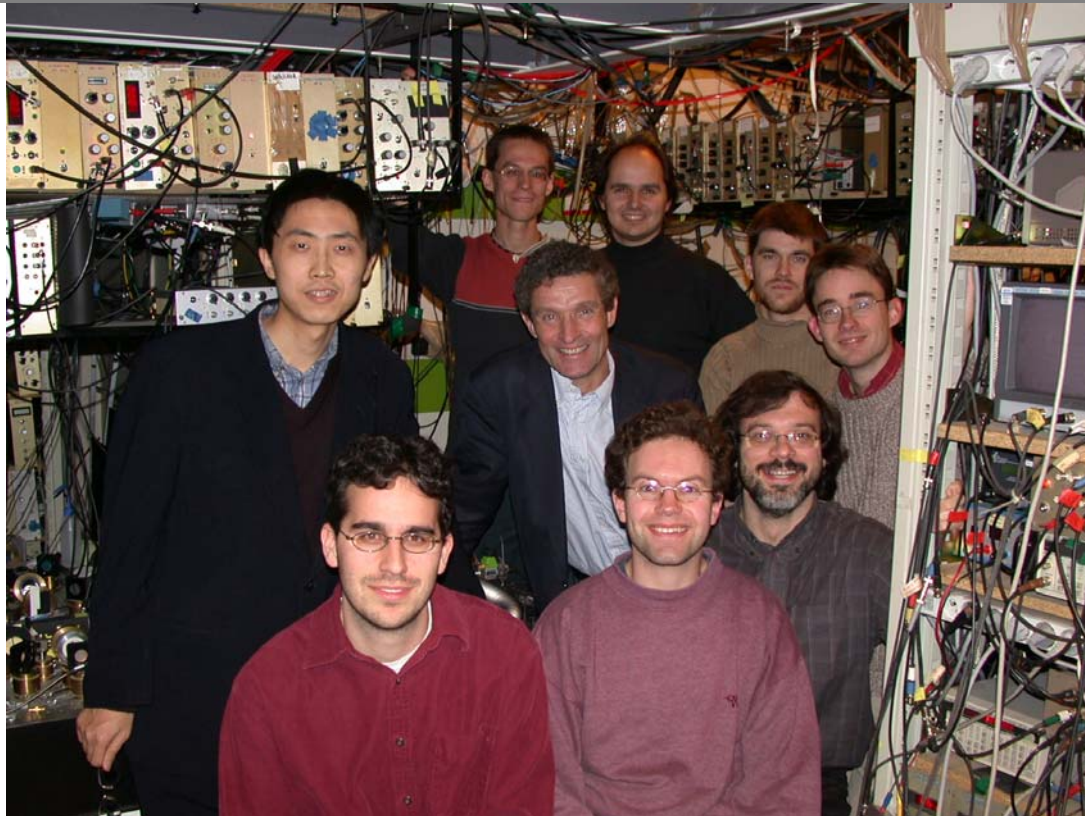


Gaz de Fermi ultra-froids: condensat de molecules ou paires de Cooper ?



1530

Collège de France

T. Bourdel, J. Cubizolles, J. Zhang, M. Teichmann,
L. Tarruell, L. Khaykovich, S. Kokkelmans, F. Chevy, C. Salomon

Laboratoire Kastler Brossel, Ecole Normale Supérieure, Paris,
Theorie: D. Petrov, G. Shlyapnikov, R. Combescot, Y. Castin
Collège de France, 9 Juin 2004

Plan

- Gaz de Fermi ultra-froids
- Formation et détection de molécules froides
- Condensation de Bose-Einstein de molécules
- Etude du régime intermédiaire: CBE- paires de Cooper BCS

Les gaz de fermions ultra-froids

Les particules élémentaires sont toutes des fermions !

Le principe d'exclusion de Pauli est essentiel pour comprendre:

La stabilité des atomes, leurs propriétés électroniques,
les électrons dans les métaux, dans les supraconducteurs,..
La stabilité des étoiles à neutrons,...

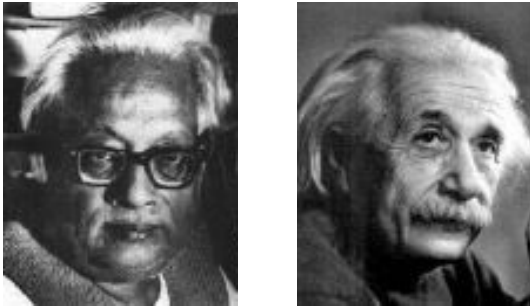
Quelles propriétés nouvelles ?

La pression de Fermi: modification de la forme du nuage d'atomes piégés
Inhibition des collisions
Propriétés de diffusion de la lumière, modification de l'émission spontanée
Possibilité d'étude des mélanges de gaz quantiques dégénérés:
ex: ^4He – ^3He , réfrigérateur à dilution

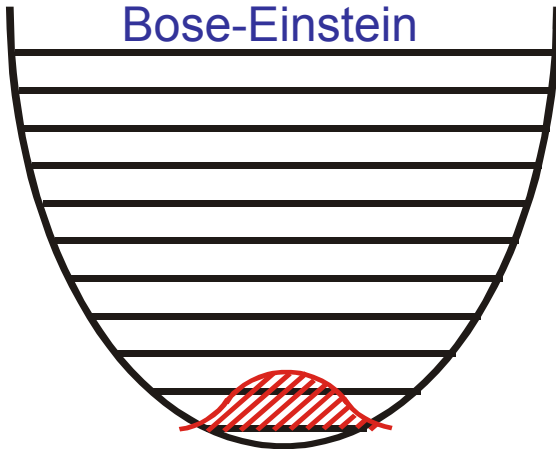
Recherche d'une transition vers un état superfluide:
condensation de paires de fermions à très basse température

Statistiques Quantiques

● Bose-Einstein (1924)



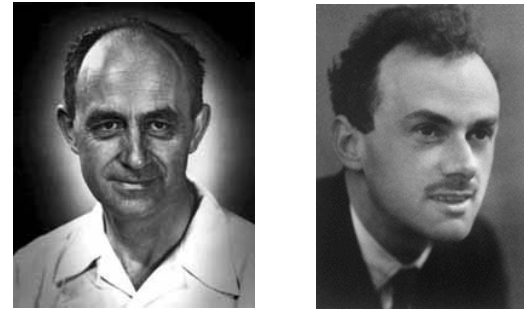
Condensation de
Bose-Einstein



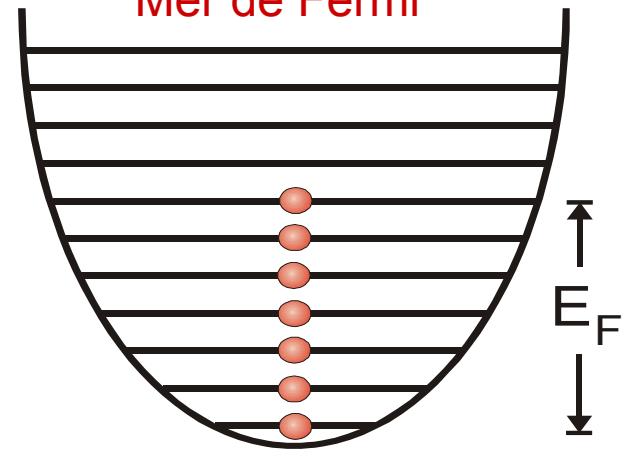
$$T_C = \frac{\hbar\omega}{k_B} (0.83 N)^{1/3}$$

Particules de spin entier:
 ^4He , excitons, gaz dilués, ...

● Fermi-Dirac (1926)



Mer de Fermi

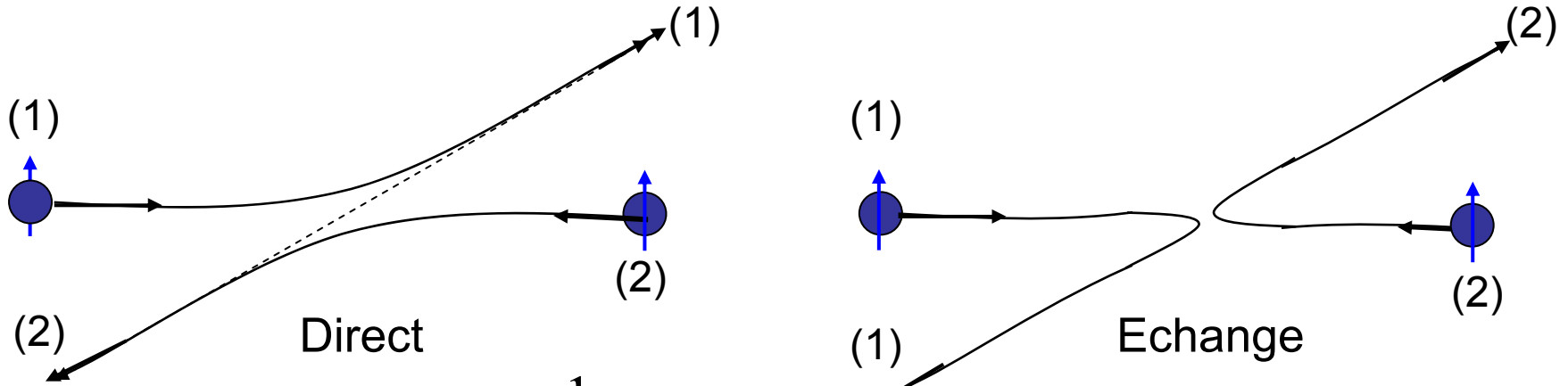


Principe d'exclusion de Pauli

$$T \ll T_F = \frac{\hbar\omega}{k_B} (6 N)^{1/3}$$

Particules de spin demi-entier:
Electrons, neutrons, ^3He , gaz dilués

Collisions entre particules identiques et statistiques quantiques



$$|\psi_f\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(1 + \varepsilon P_{21}) |1: k e_z, 2: -k e_z\rangle$$

Amplitudes de diffusion interfèrent avec signe + pour bosons et – pour fermions

A basse température, onde s seulement

Bosons

$$\sigma = 8\pi a^2$$

Fermions $\sigma = 0$

Bon pour les horloges:

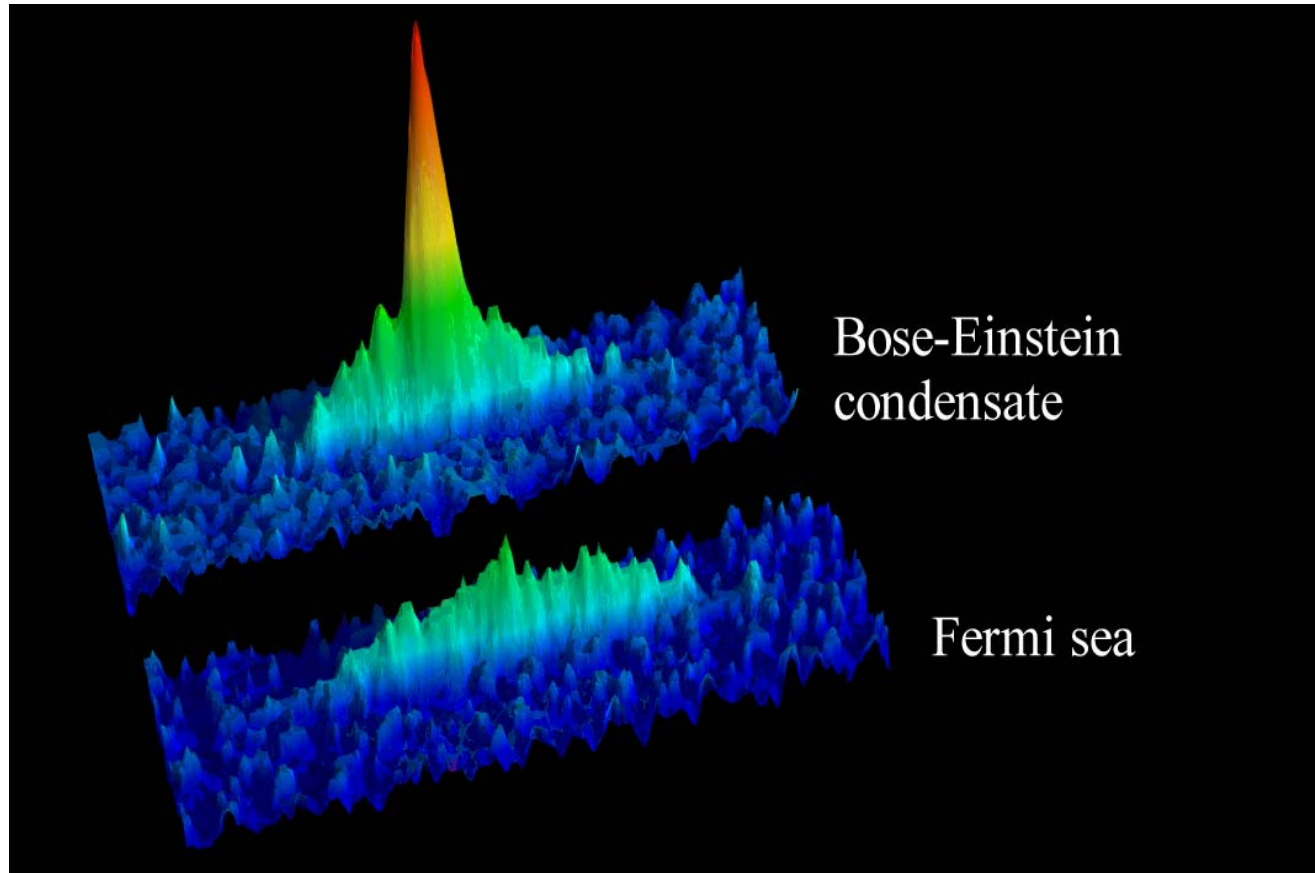
Pas de déplacement collisionnel

Evaporation plus difficile !

Refroidissement sympathique

Un condensat et une mer de Fermi

ENS



Lithium 7

Lithium 6

10^4 atomes de Li 7 condensés, en équilibre thermique avec 10^4 atomes de Li 6 formant une mer de Fermi.

Dégénérescence: $T = 0.28 \mu\text{K} = 0.2(1) T_C = 0.2 T_F$

Fermions en interaction forte
en onde s au voisinage d'une
résonance de Feshbach

Activité intense sur les molécules: 2003-2004

Bosons:

⁸⁵Rb, JILA, Donley et al, 2002: coherent oscillations between a BEC and molecules

¹³³Cs, Innsbruck, Herbig et al, 2003: direct imaging of the molecules which separate from BEC via Stern and Gerlach expt

¹³³Cs, Stanford, Chin et al., 2003: spectroscopic detection of molecules

⁸⁷Rb, MPQ, Dürr et al., 2003: 1D trapping of molecules

²³Na, MIT, 2003, quantum degenerate molecules

Durée de vie limitée: pertes, travailler à faible densité

Fermions: Longue durée de vie !

⁴⁰K, JILA, Regal et al., 2003: direct imaging via RF dissociation and Stern and Gerlach separation, measurement of binding energy and lifetime

⁶Li, ENS, 2003, Cubizolles et al., 2003: observation of long lifetime (0.5 s);
conversion efficiency 85%, $T/T_{\text{BEC}} \sim 2$

⁶Li, Rice, Strecker et al., 2003: long lifetime, narrow resonance

⁶Li, Innsbruck, S. Jochim et al., 2003: pure trapped molecular cloud, long lifetime

Condensation de Bose-Einstein de molécules

JILA: BEC of K_2 dimers, Greiner et al., 03

⁶Li, Innsbruck, MIT, 03, ENS, : BEC of Li_2 dimers,

Condensation de paires de fermions:

JILA, MIT, 04;

Transition BEC-BCS: Innsbruck, ENS, 04. Collective modes : Innsbruck, Duke

+ Nombreux papiers théoriques

La formation de paires de Cooper

Bardeen, Cooper, Schrieffer, 1957

Supraconductivité dans les métaux à basse température.

Interprétation: Soit un gaz de Fermi homogène dégénéré, k_F , E_F

Ajoutons deux fermions, 1 et 2, qui ont une interaction attractive: $a_{\uparrow\downarrow} < 0$

$$V(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = V \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \quad \text{avec } V < 0$$

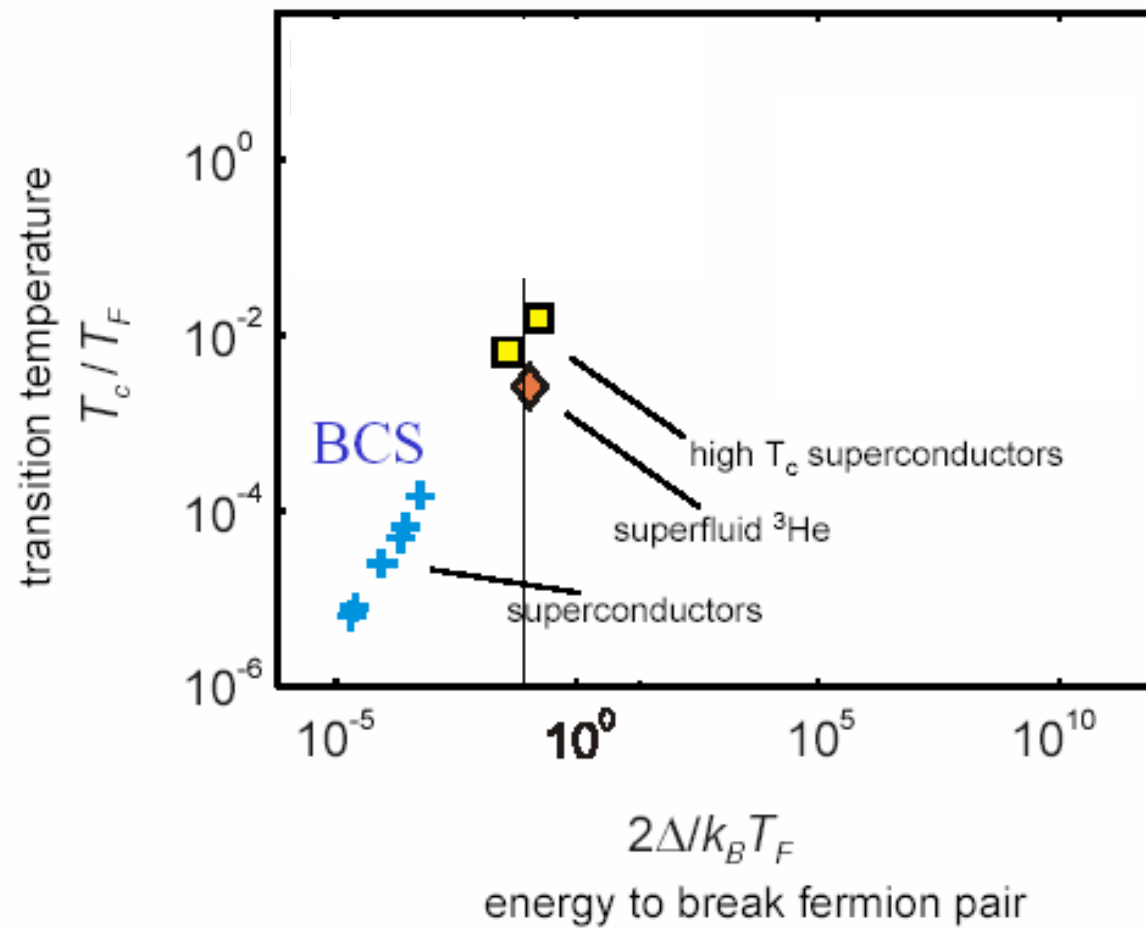
Alors ces particules pourront toujours former un état d'énergie plus basse que E_F , un état lié.

Paires $\vec{k}, -\vec{k}$ à la surface de Fermi: $|k| \geq k_F$

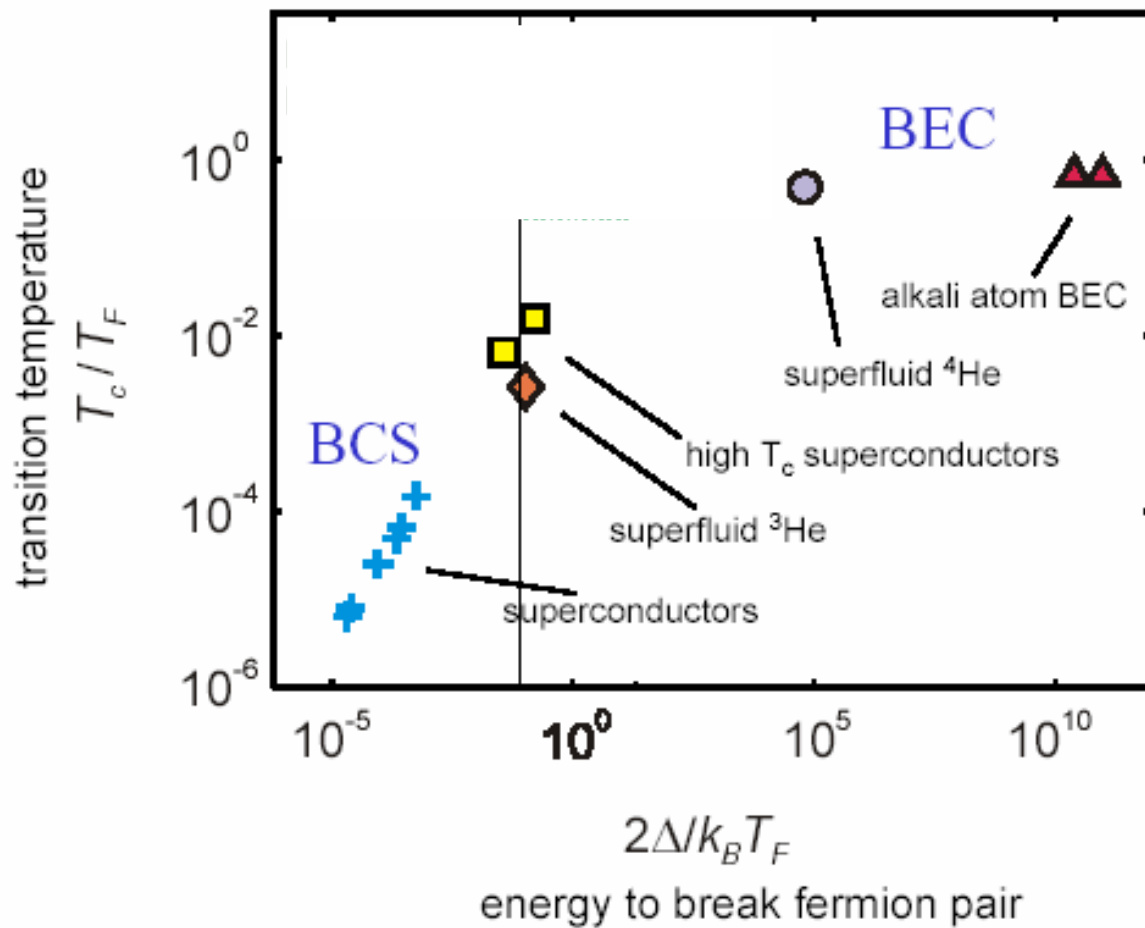
Si la température est suffisamment basse, ces paires forment une phase superfluide

$$T_{BCS} \sim 0.3 T_F e^{-\frac{\pi}{2 k_F |a|_{\uparrow\downarrow}}} \quad \text{Pour: } k_F a \ll 1$$

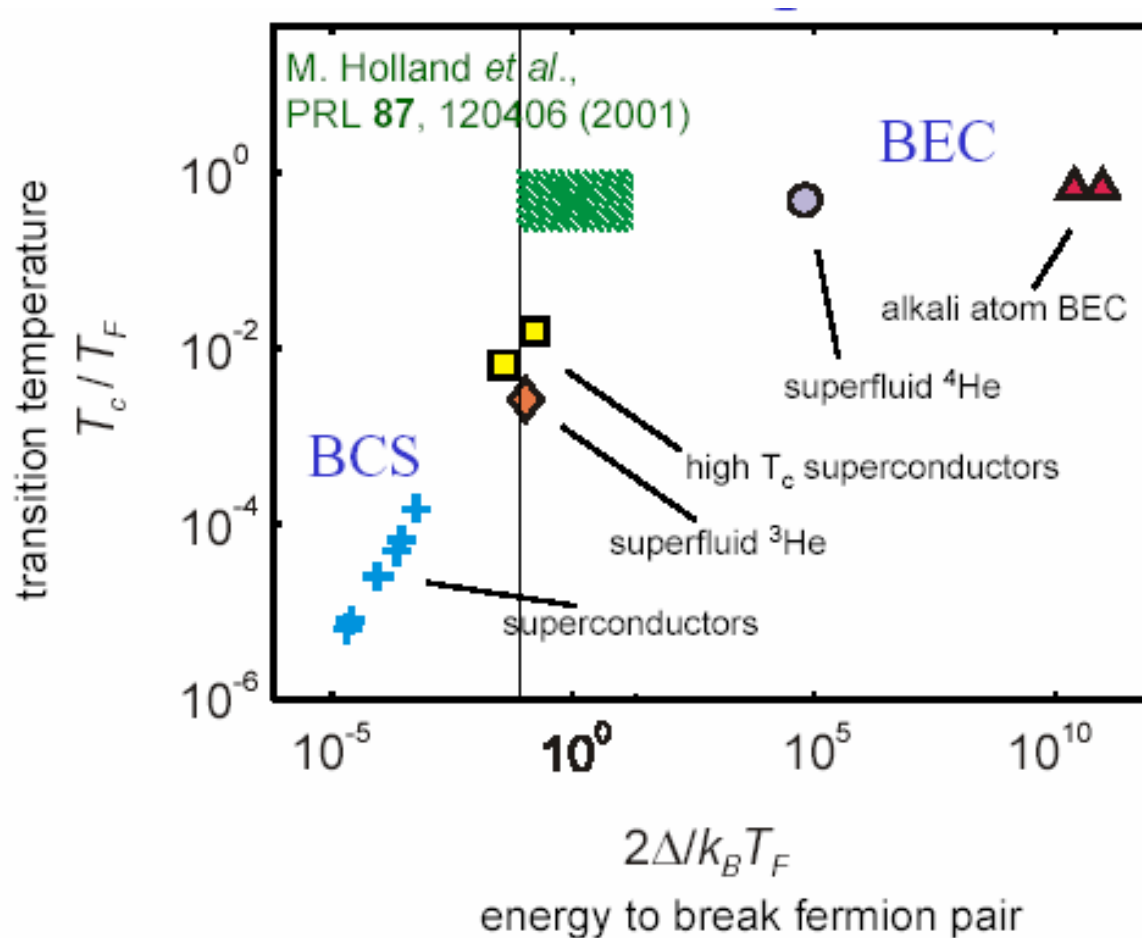
Le régime BCS des fermions



Le régime BEC des fermions fortement liés

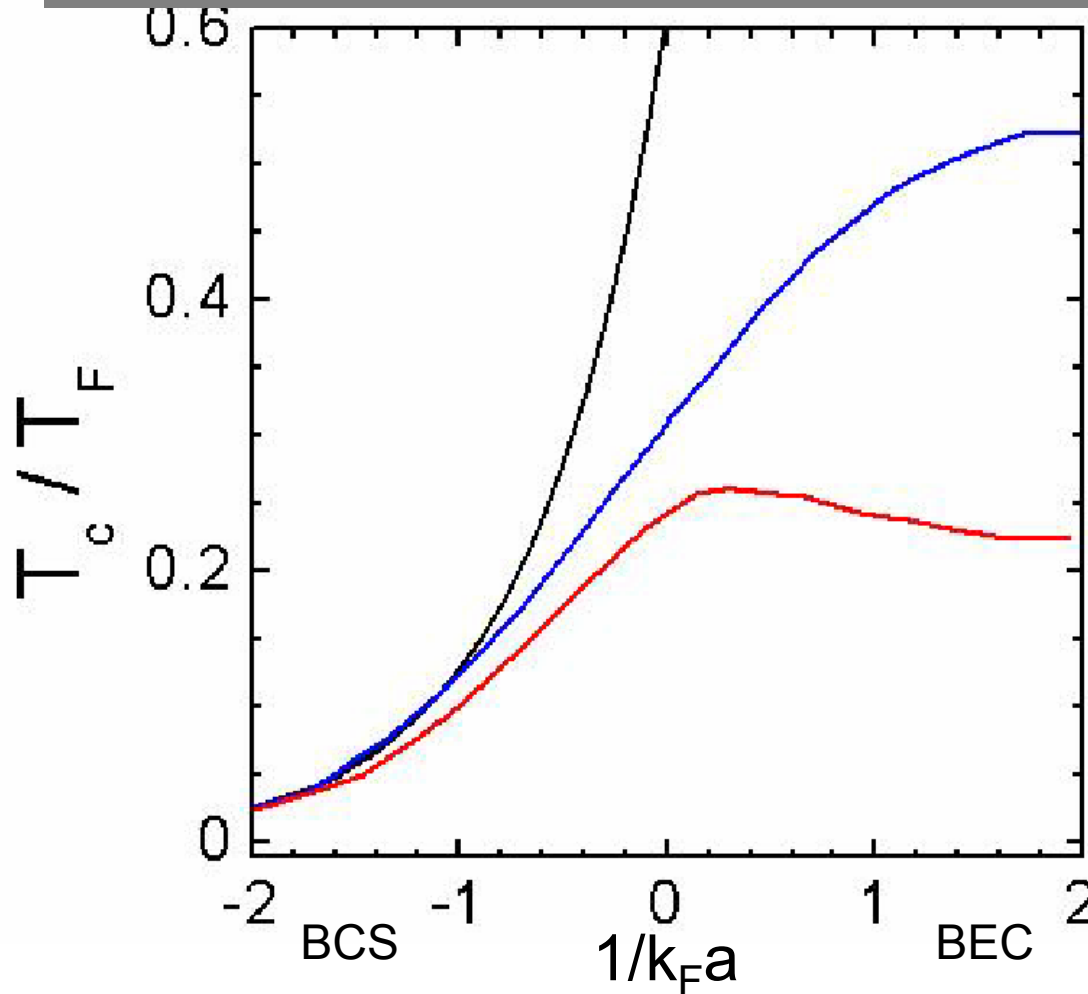


Le régime intermédiaire



Au voisinage d'une résonance de Feshbach,
l'on peut exacerber les interactions dans un gaz de fermions froids
 $T_c \sim T_F/2$!!!

Température critique dans le régime intermédiaire BEC-BCS



Perali et al.,
Cond-mat 0311309

Sa de Melo, Randéria,
Engelbrecht,
PRL 71, (1993)

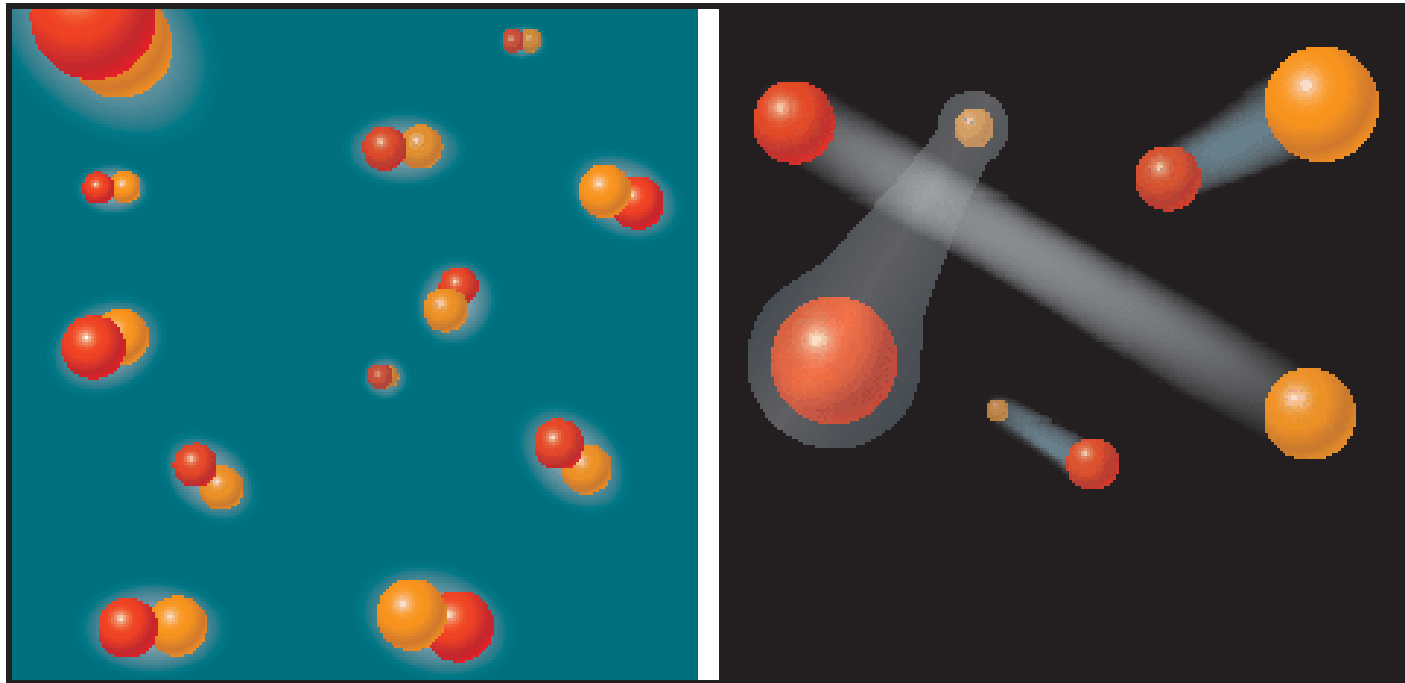
Théories: Eagles, Leggett, Nozières, Schmidt-Rink,
Randéria, Holland, Kokkelmans, Levin, Ohashi, Griffin,
Strinati, Falco, Stoof, Bruun, Pethick, Combescot,....

Condensat de molecules et superfluide de Fermi

Gaz de Fermi à deux états de spins
interaction en onde s, longueur de diffusion a

$a > 0$

$a < 0$



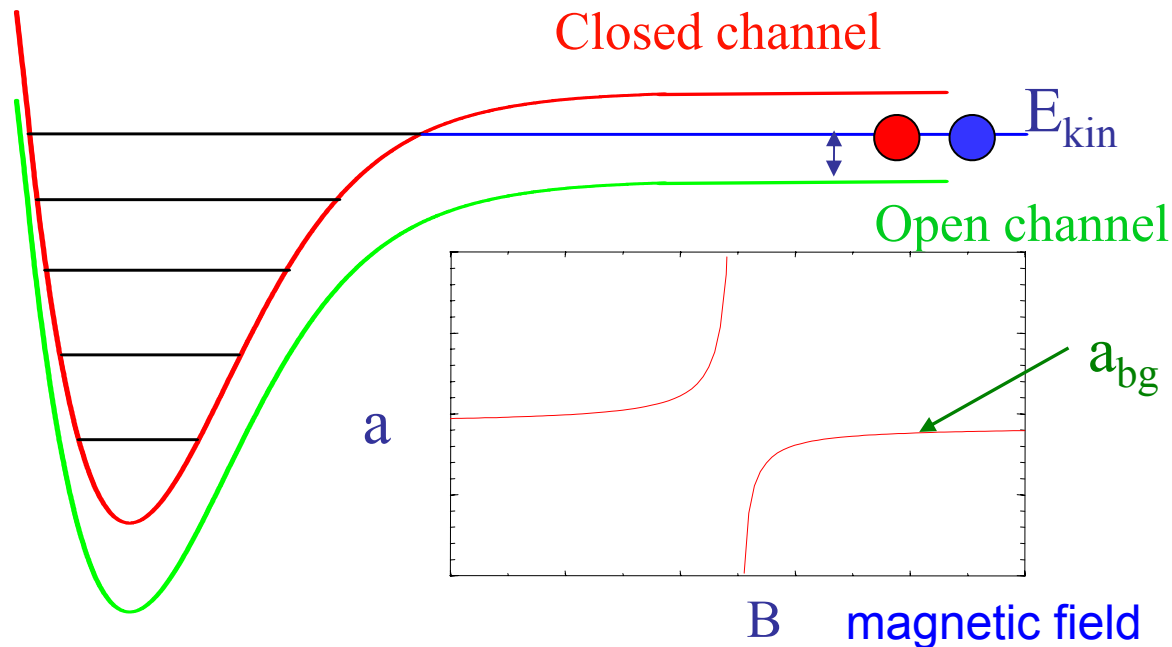
BEC de molecules

Superfluide fermionique

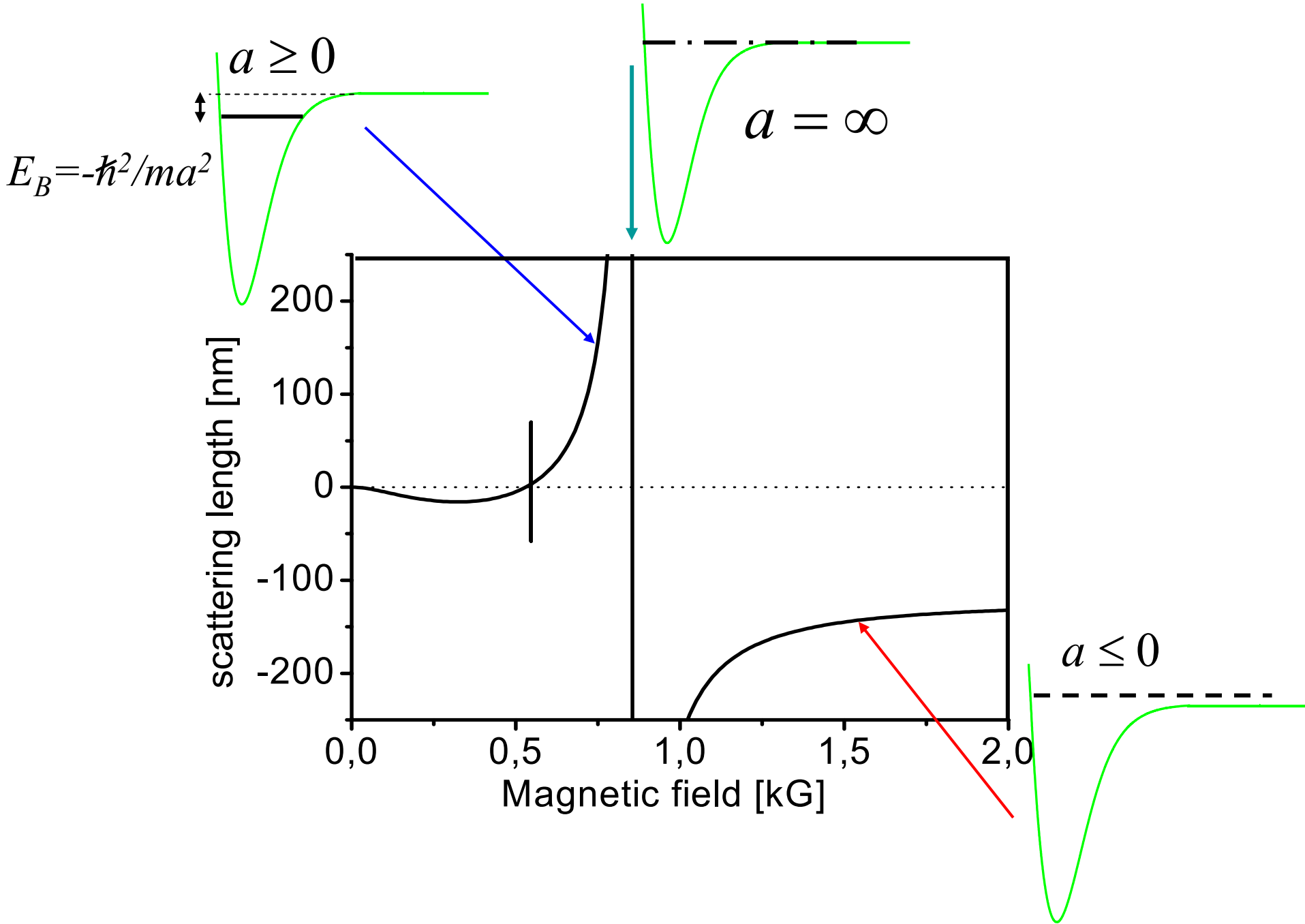
Feshbach resonance

Contrôle des interactions: Résonance de Feshbach

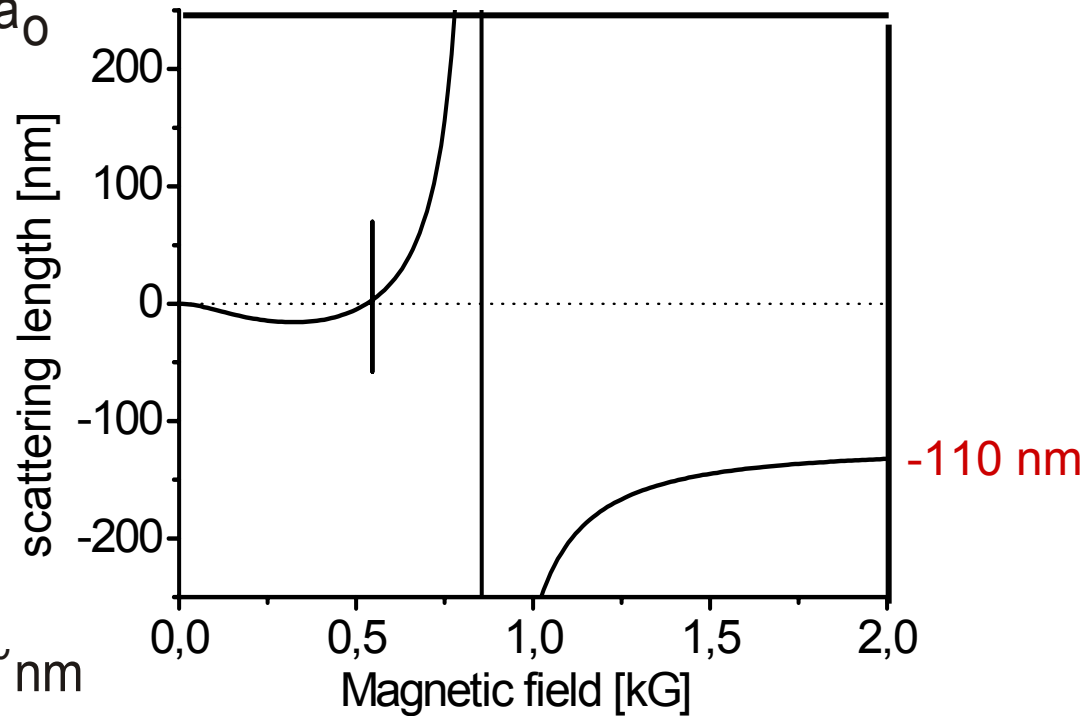
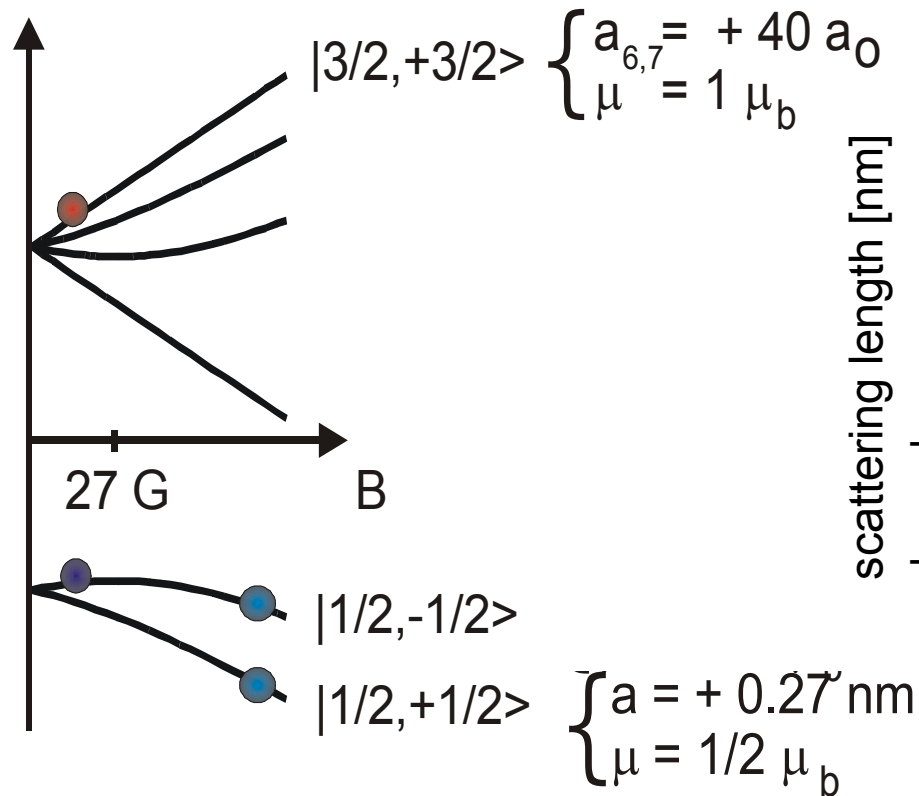
- Couplage entre canal de collision ouvert et canal fermé



- Résonance: état moléculaire lié
- Quelle durée de vie pour cet état faiblement lié ?
- La diffusion dépend fortement de l'énergie

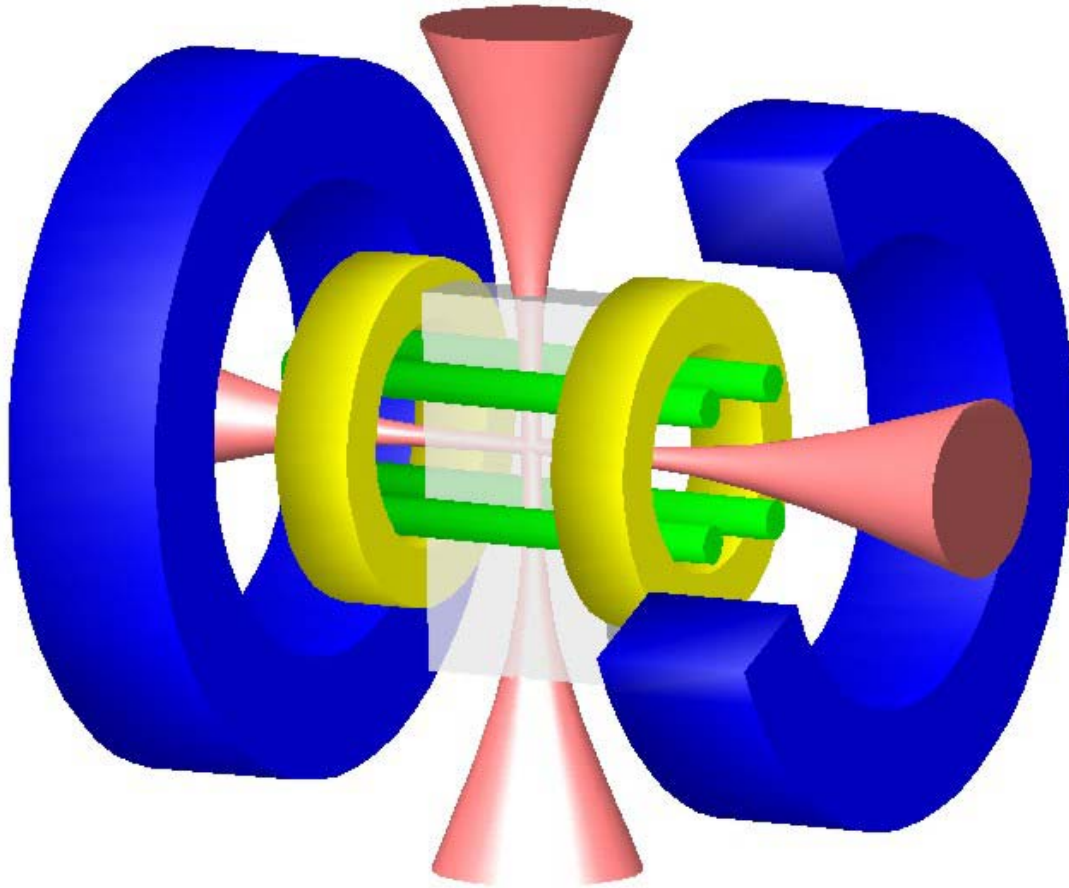


Resonance de Feshbach dans le lithium 6

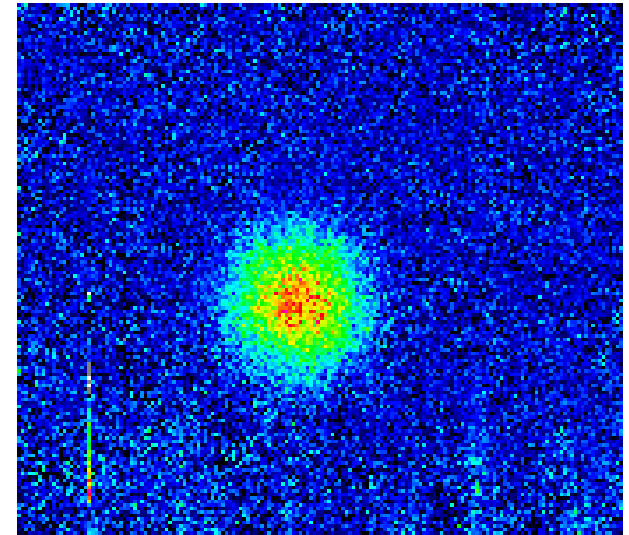


⁶Lithium

Gaz de Fermi en interaction forte dans un piège optique



Deux faisceaux YAG
puissance 2.5 W et waist 38 μm



$$T_F = 5 \mu\text{K}$$

$$T/T_F < 0.2$$

$$N_{\text{total}} = 1 \cdot 10^5$$

$$E_{\text{interaction}} = -0.35 E_{\text{kin}},$$

$$k_F |a| > 1$$

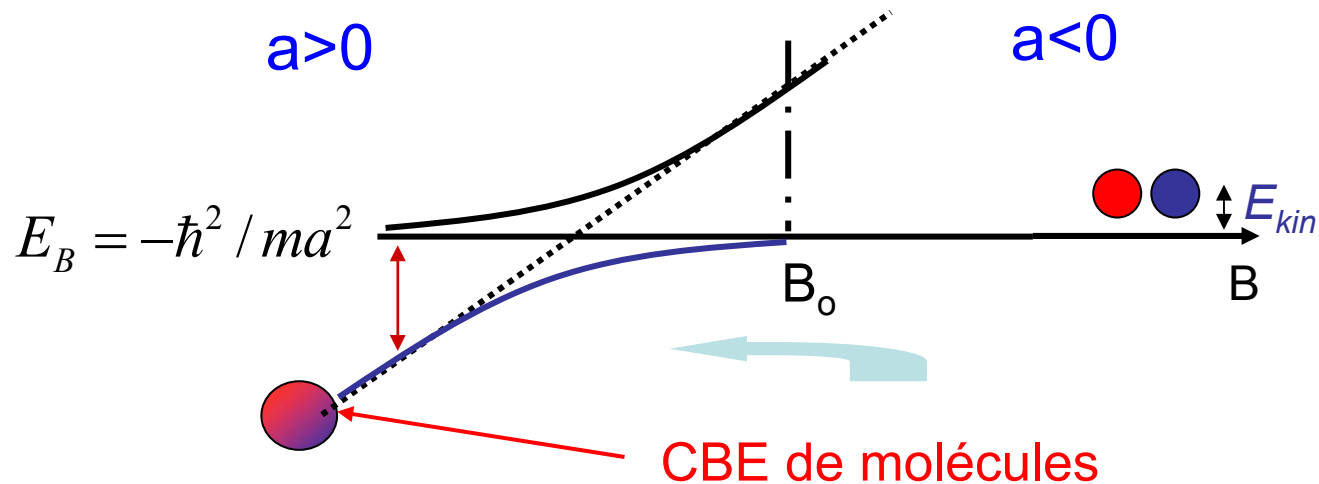
$$na^3 > 1$$

Cubizolles PRL 03

Duke

Formation de molécules Méthode 1

JILA
ENS



Recette: dans la région $a < 0$, refroidir un gaz de fermions à $T < 0.2T_F$

Traverser lentement la resonance vers $a > 0$

Typiquement : 1000 G to 770 G in 200 ms

L'entropie est conservée. Processus réversible.

Cela produit des molécules avec une efficacité jusqu'à 90% !

Si $T < 0.2 T_F$, CBE de molécules

Détecter les molécules ?

Si les molécules sont faiblement liées, elles absorbent la lumière résonnante avec les atomes libres.

Le laser sonde est résonnant pour $B=0$.

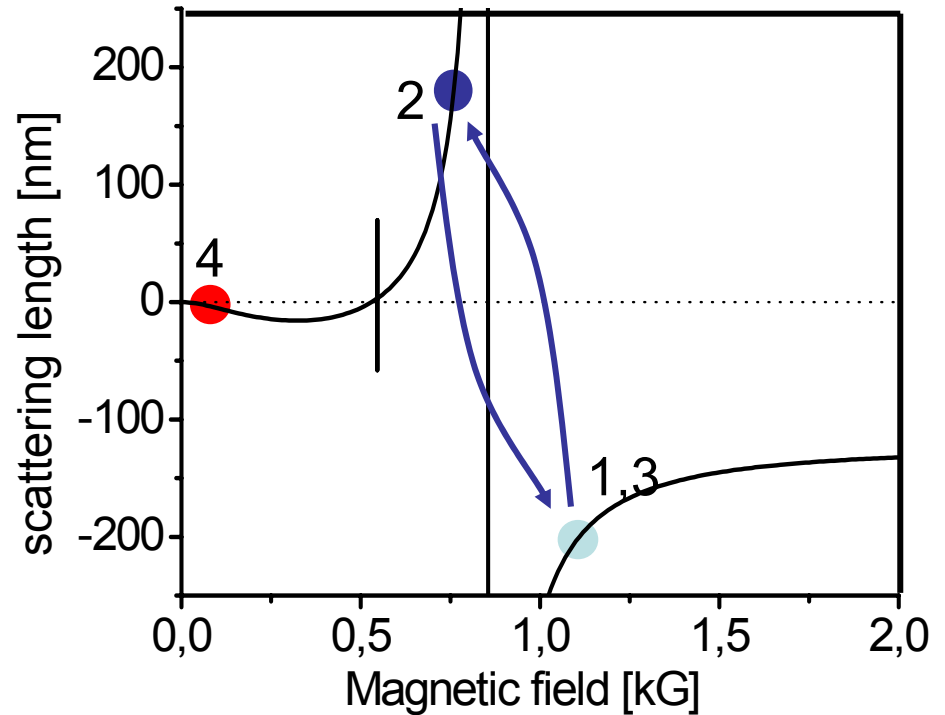
Les dimères peuvent suivre la coupure du champ vers un niveau plus fortement lié: ils ne sont pas détectés.

Méthode de la double rampe :

$$2N_{mol} = N_3 - N_2$$

Aussi:

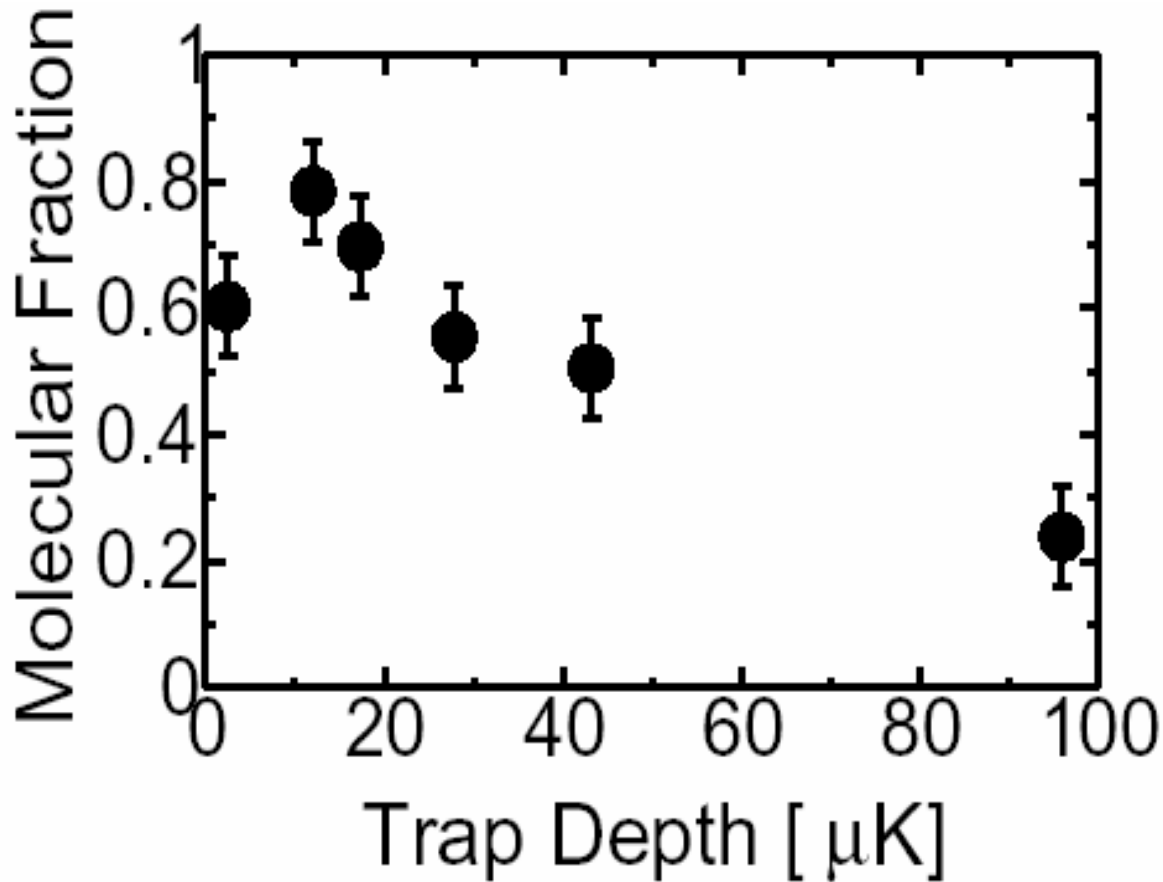
Séparation Stern and Gerlach
Et dissociation RF



Importance de la vitesse de balayage

$$\frac{1}{E_B} \frac{dE_B}{dt} \ll \frac{E_B}{\hbar}$$

Première surprise: efficacité de production de molécules



Efficacité croissante quand:
 T/T_F est petit
 T/E_B est petit

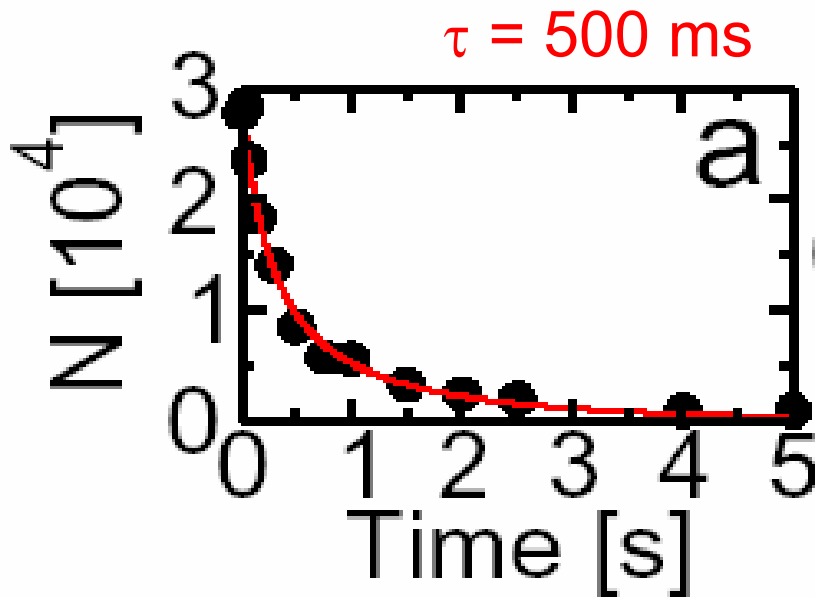
At $B = 689$ G
 $a = 78$ nm
 $E_B = 12$ μK

$T_F = 5$ μK
 $T = 6.7$ μK
 $n_{0m} \sim 4 \cdot 10^{13}$ molec/cm³

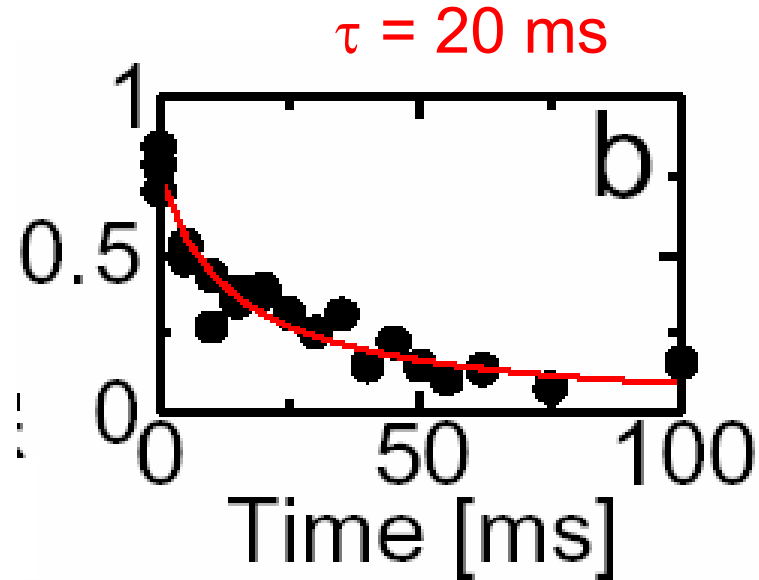
L'efficacité peut atteindre 90%,
bien meilleure que pour les bosons !

Cubizolles et al.,
PRL, 91, 2003

Deuxième surprise: les dimères de fermions ont une longue durée de vie



$a = 78$ nm



$a = 35$ nm

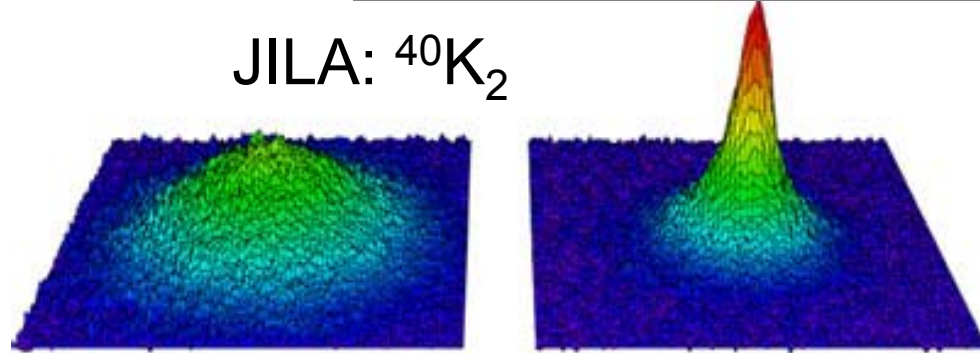
Taux de perte à 2 corps: $\beta \sim 2.4 \cdot 10^{-13}$ cm³/s

Aussi vrai pour ⁴⁰K, Regal et al., PRL 03

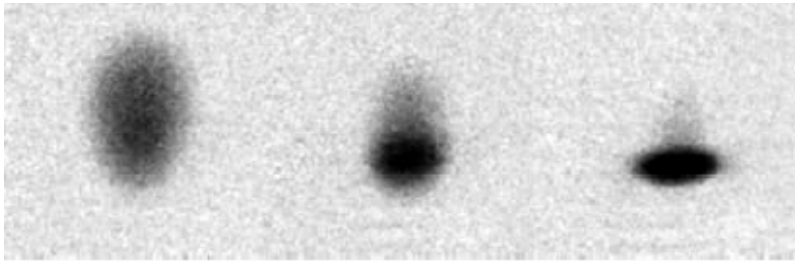
Longue durée de vie et taux de collision élastique élevé:
Excellentes conditions pour produire un CBE de molécules
Méthode 2: Innsbruck, MIT

Condensats of molecules

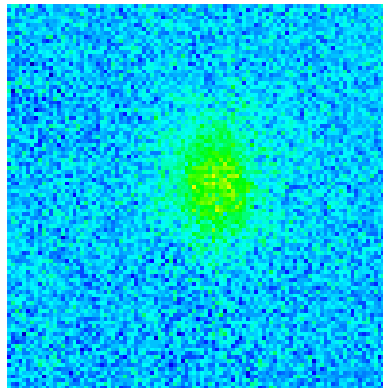
JILA: $^{40}\text{K}_2$



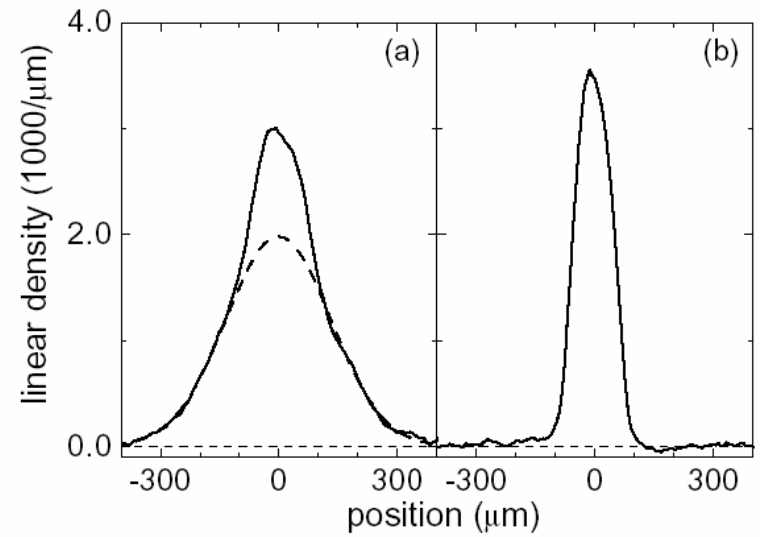
MIT
 $^6\text{Li}_2$



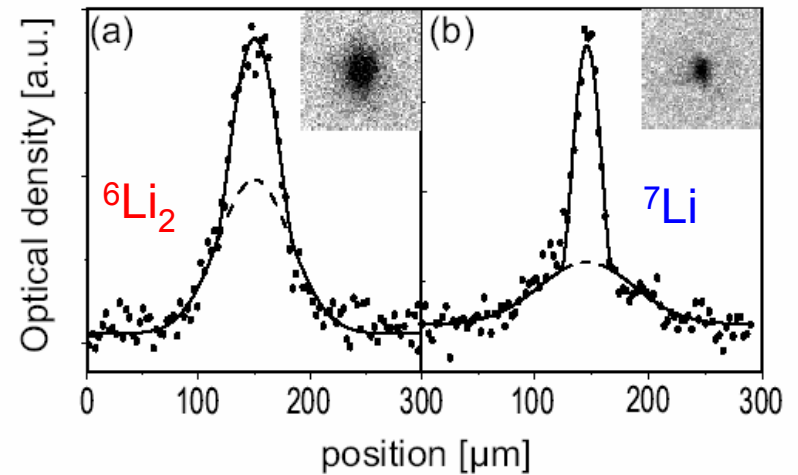
ENS
 $^6\text{Li}_2$



et Rice $^6\text{Li}_2$,

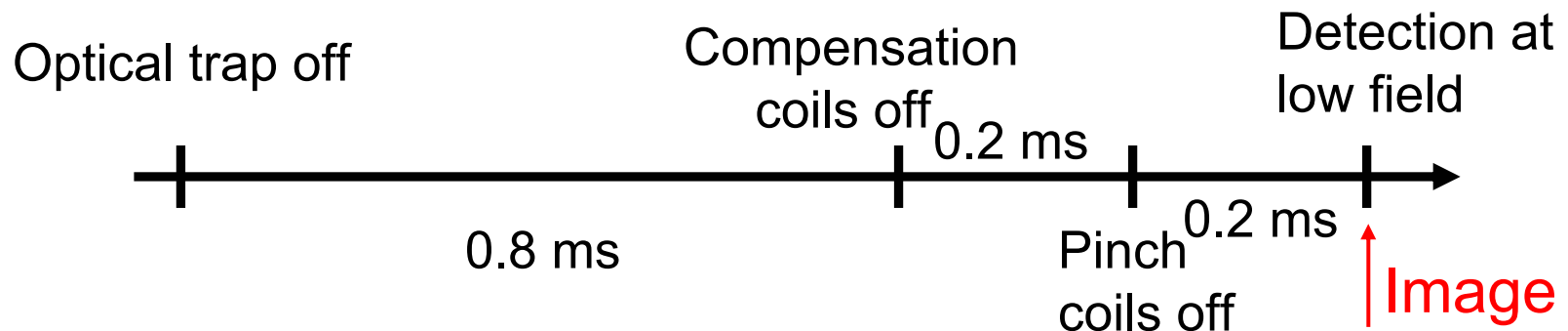


$^6\text{Li}_2$:Innsbruck

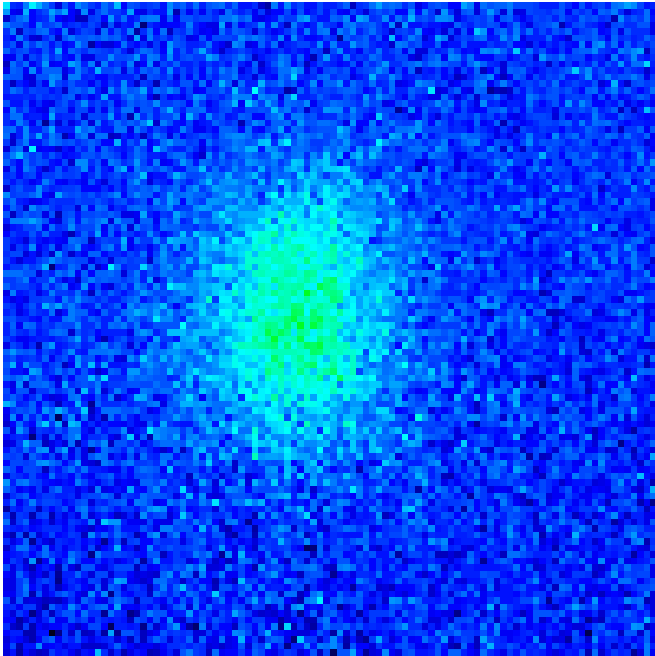


Distribution de vitesse des molécules

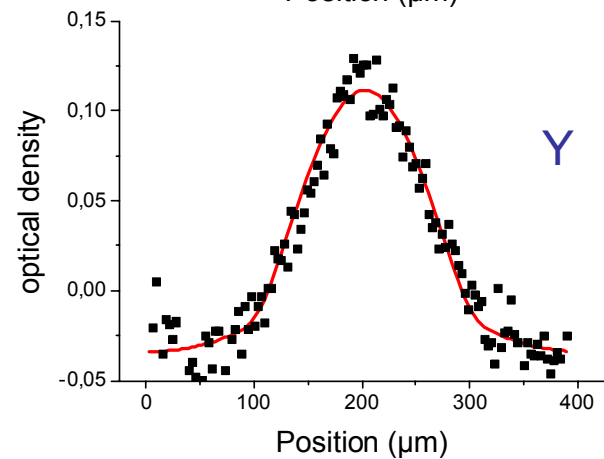
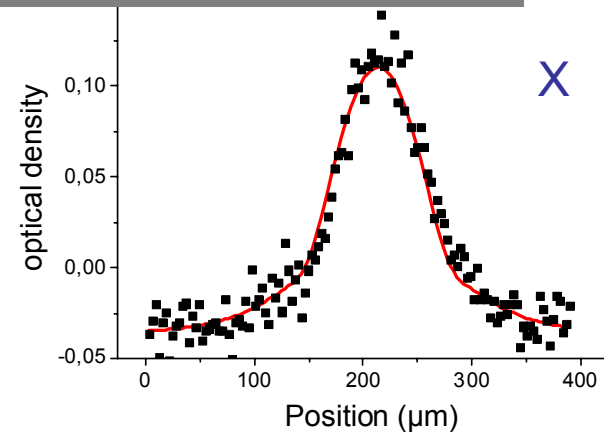
- Faible énergie de liaison: facile de dissocier les molécules avec une rampe de champ magnétique
- Si les molécules sont cassées: énergie supplémentaire
- Temps de vol des molécules (MIT,ENS)
- Couper le piège, garder le champ magnétique B: les molécules sont en expansion ballistique.
- Puis augmenter B pour casser les molécules au dernier moment.
- Finalement couper B vite ($20 \mu\text{s}$) et prendre l'image.



Condensation de Bose-Einstein de molécules de ${}^6\text{Li}_2$



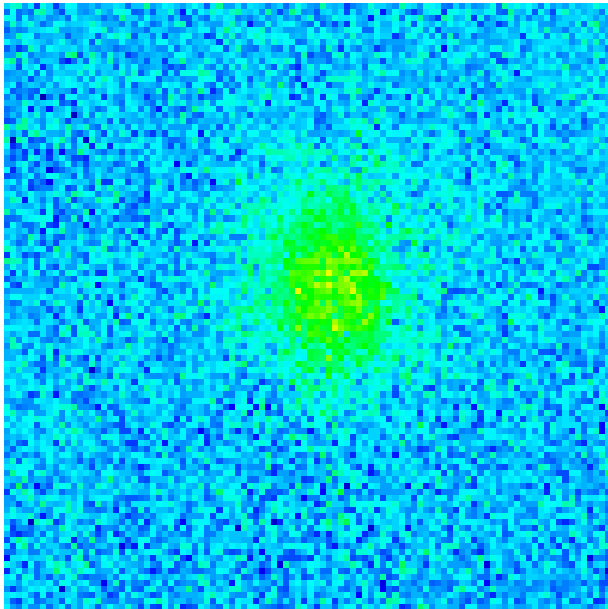
$$\left\{ \begin{array}{l} N = 7.3 \times 10^4 \\ \omega_x = 2\pi \times 1.4 \text{ kHz} \\ \omega_y = 2\pi \times 3.5 \text{ kHz} \\ \omega_z = 2\pi \times 3.8 \text{ kHz} \\ \text{condensed fraction : 33\%} \end{array} \right.$$



Piedestal thermique
 $T_c \sim 2 \mu\text{K}$ for $3 \cdot 10^4$ mol.
Expansion anisotrope

Condensat pur: mesure de a_{mm}

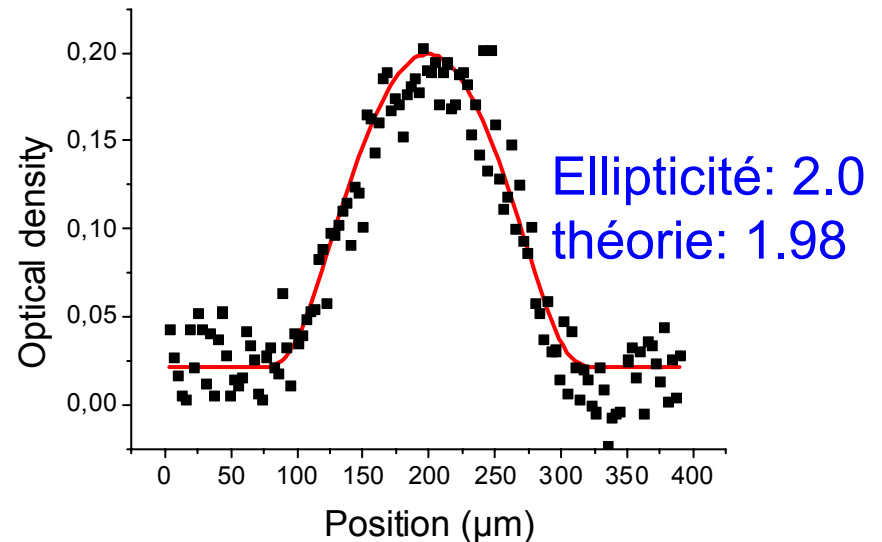
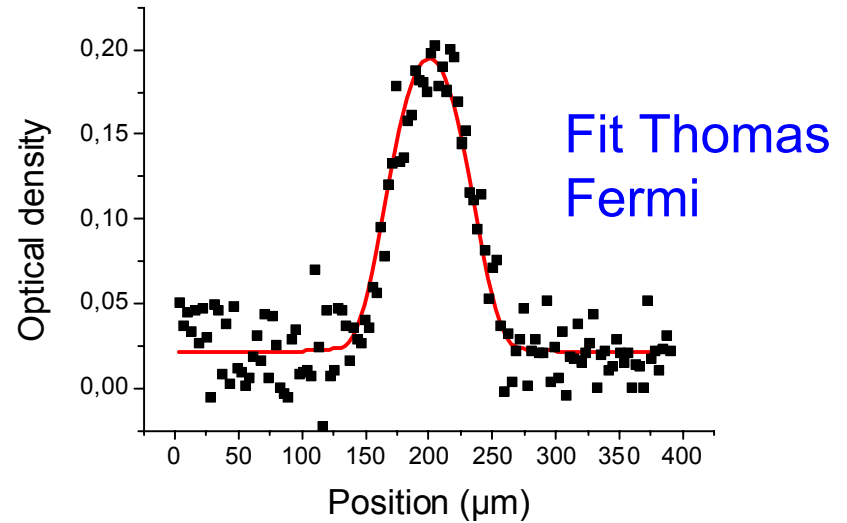
Recomprimer le faisceau horizontal
à pleine puissance: $\lambda=0.1$



$$T \leq 0.9 \mu\text{K} = T_c^0 / 3$$

$$\begin{cases} N = 3.9 \times 10^4 \\ \omega_x = 2\pi \times 490 \text{ Hz} \\ \omega_y = \omega_z = 2\pi \times 5 \text{ kHz} \end{cases}$$

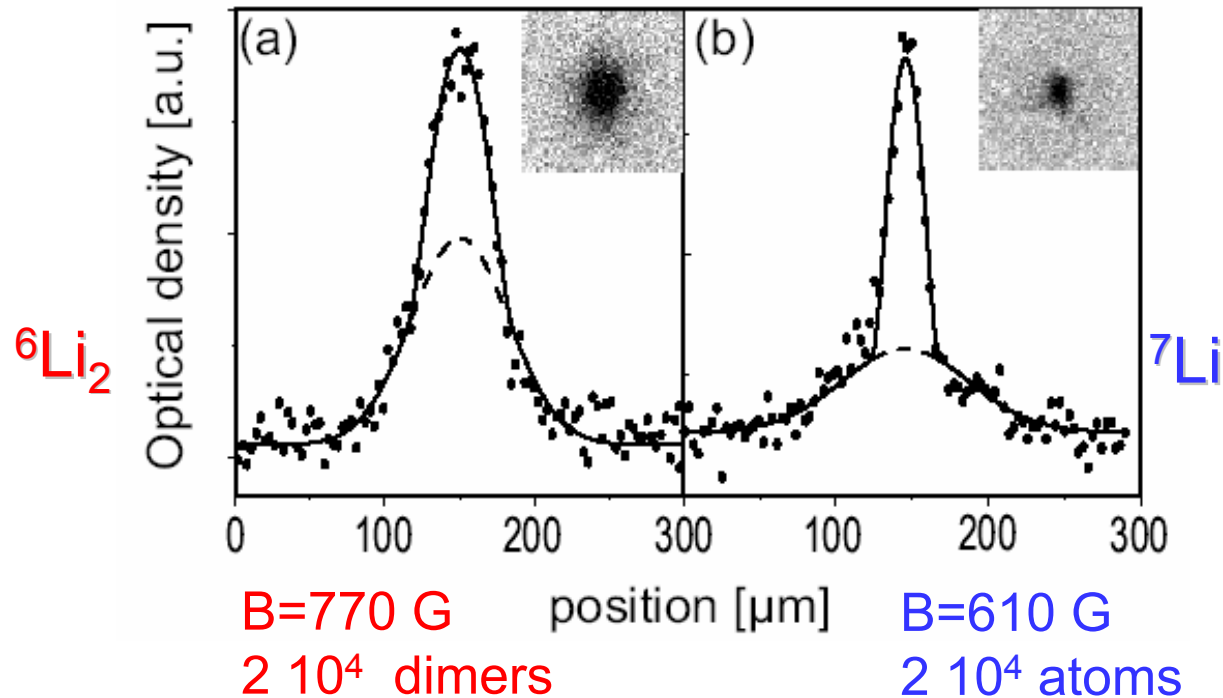
Dans le piège: rayons TF:
 $R_x = 26 \mu\text{m}$, $R_y = 2.75 \mu\text{m}$



Expansion hydrodynamique

$$\text{A } 770 \text{ G: } a_{mm} = 170_{-60}^{+100} \text{ nm}$$

Comparaison CBE de dimères ${}^6\text{Li}_2$ et CBE atomique ${}^7\text{Li}$



$$a_{mm} = 170_{-60}^{+100} \text{ nm} \quad a_7 = 0.65(10) \text{ nm}$$

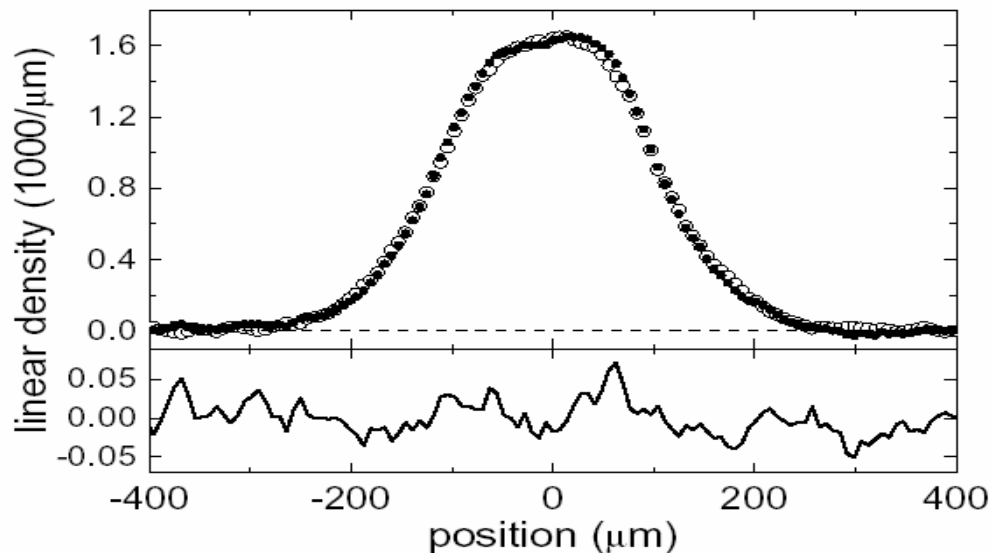
Bon accord avec la théorie: $a_{mm} = 0.6 a = 0.6 \times 306 = 183 \text{ nm}$
D. Petrov, G. Shlyapnikov, C.S.

Exclut: $a_{mm} = 2a$

Régime intermédiaire BEC –BCS

(1) Innsbruck: imagerie in situ

Produire un condensat de molécules avec $T/T_{\text{BEC}} \ll 1$
Balayer lentement la région de la résonance vers $a < 0$
Rampe en 1seconde de 764 G to 1176 G et retour en 1s.



Reversibilité remarquable !

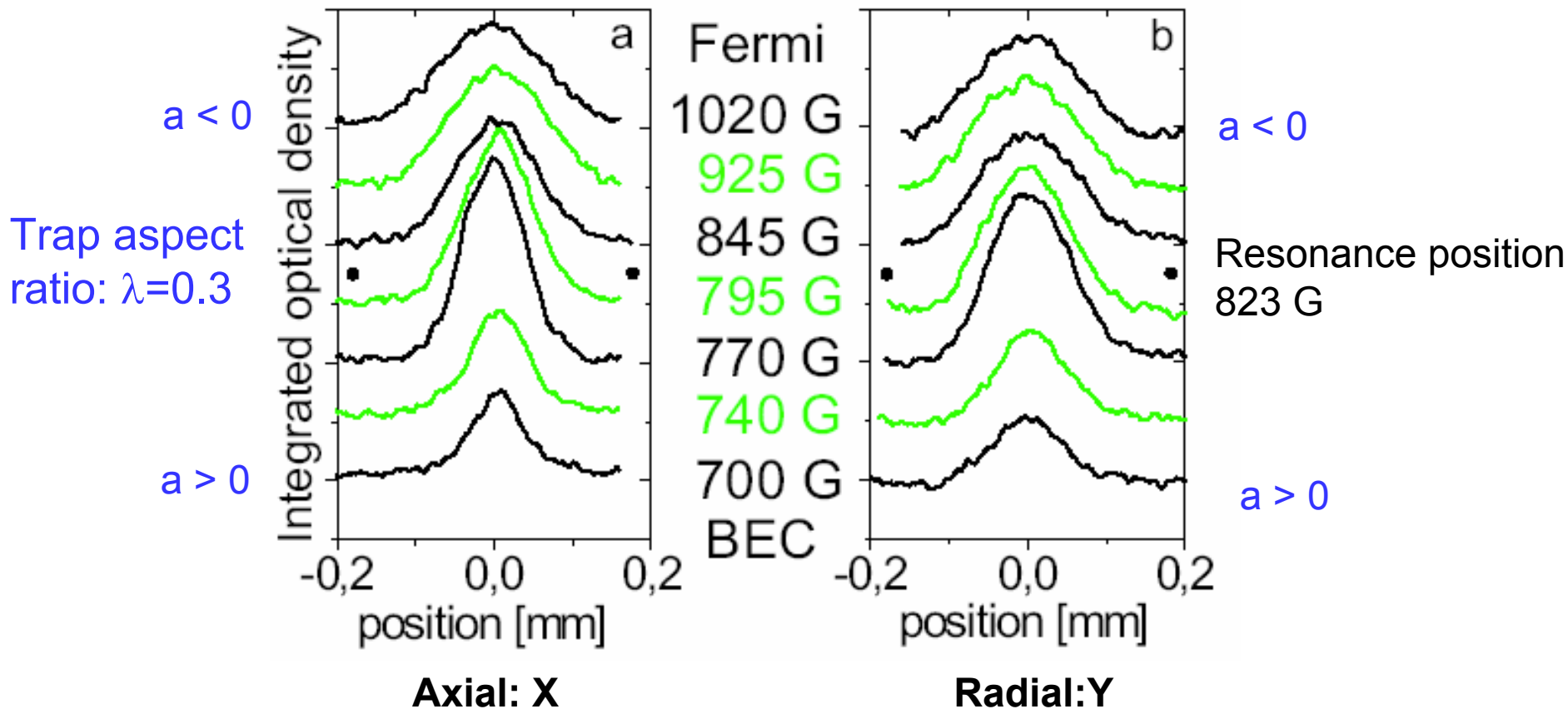
D'après L. Carr, G. Shlyapnikov and Y. Castin, PRL 04
Cela produit un gaz de Fermi fortement dégénéré: $T=0.04 T_F$
Ainsi $T < T_{\text{BCS}}$ for $(k_F a)_{\text{final}} > 0.6$.

La superfluidité est attendue aussi pour $a < 0$ (côté fermions)

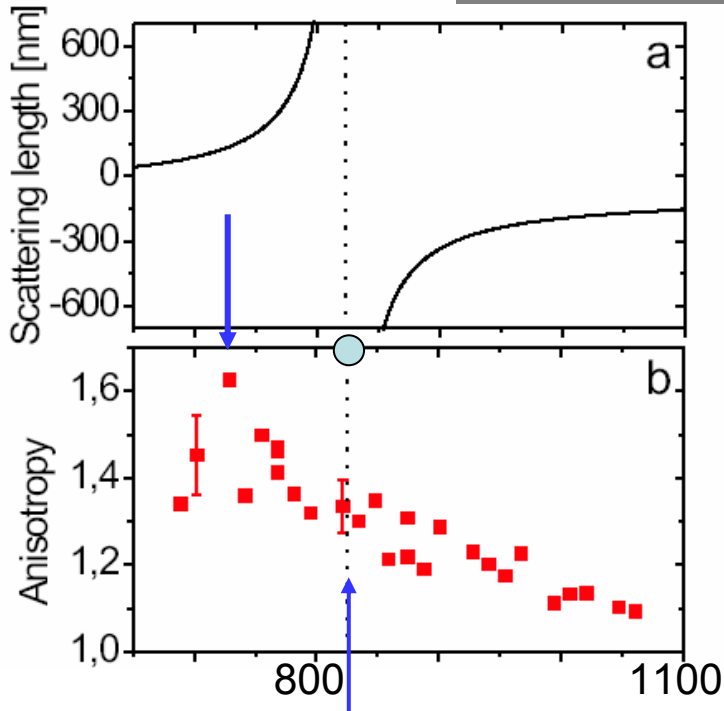
Régime BEC – BCS

images en expansion: ENS

Preparer CBE pur 770G: $4 \cdot 10^4$ mol., $N_0/N \geq 70\%$
Changer le champ magnétique lentement à travers FR:
Image en temps de vol: 1.4 ms



région BEC – BCS



A 730 G, côté BEC , $n_m a_m^3 \ll 1$

Anisotropie mesurée: $\eta = \sigma_y / \sigma_x = 1.6(1)$
sur fits Gaussiens.

Prédiction hydrodynamique

$$\eta = 1.7$$

A 730 G, $a = +120$ nm, le gaz moléculaire s'étend comme un superfluide HD comme un CBE atomique.

En progressant vers $a < 0$, le gaz perd lentement le caractère HD.

T/T_F côté BCS < 0.1

Différence avec l'expérience de Duke à 920 G dans un piège très allongé

Prediction superfluide (Stringari)
à résonance: $\eta = \sigma_y / \sigma_x = 1.7$

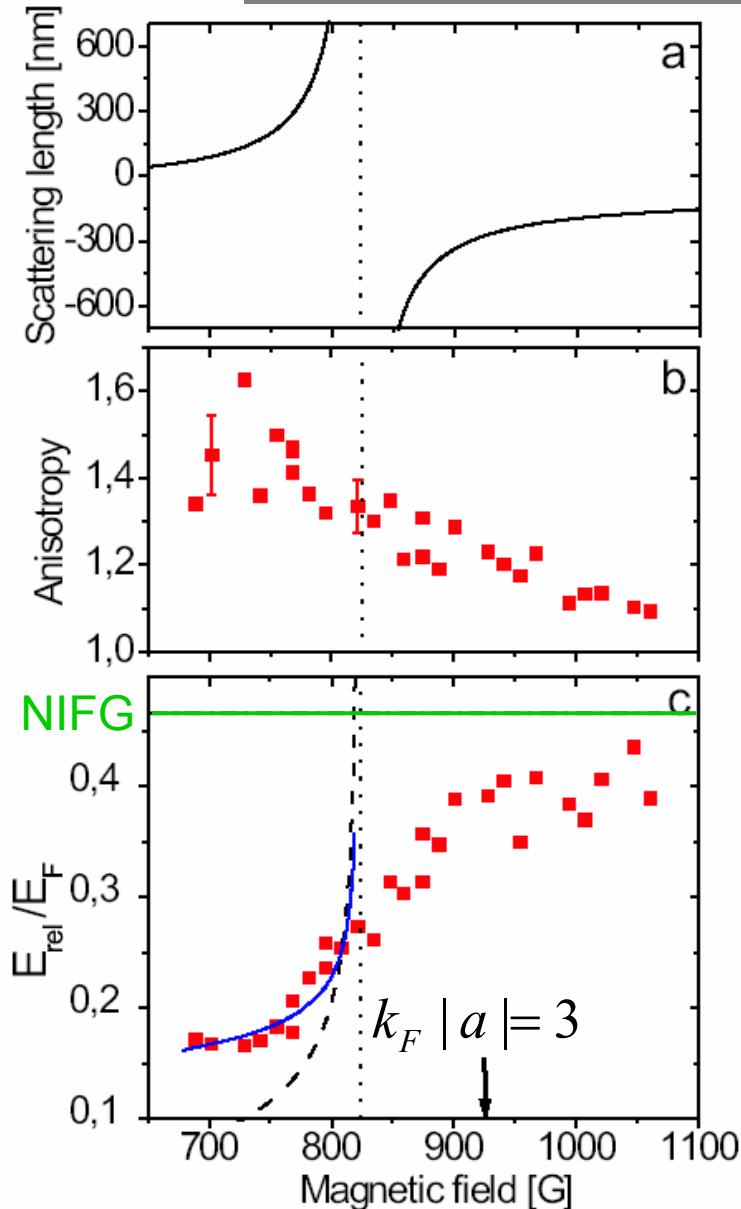
Observé: 1.35(5)

La signature de la superfluidité est-elle dégradée durant l'expansion?

Temperature : $T/T_c \sim 1$?

En expansion, différence qualitative entre superfluide CBE et superfluide à résonance

région BEC – BCS: énergie relâchée



Fits Gaussiens

$$E_R = m(2\sigma_y^2 + \sigma_x^2) / 2\tau^2$$

A résonance: $E_R = \sqrt{1 + \beta} E_R^0$
 ou E_R^0 est l'énergie relâchée
 d'un gaz de Fermi sans interaction:
 $\beta = -0.64(15)$

Une quantité universelle

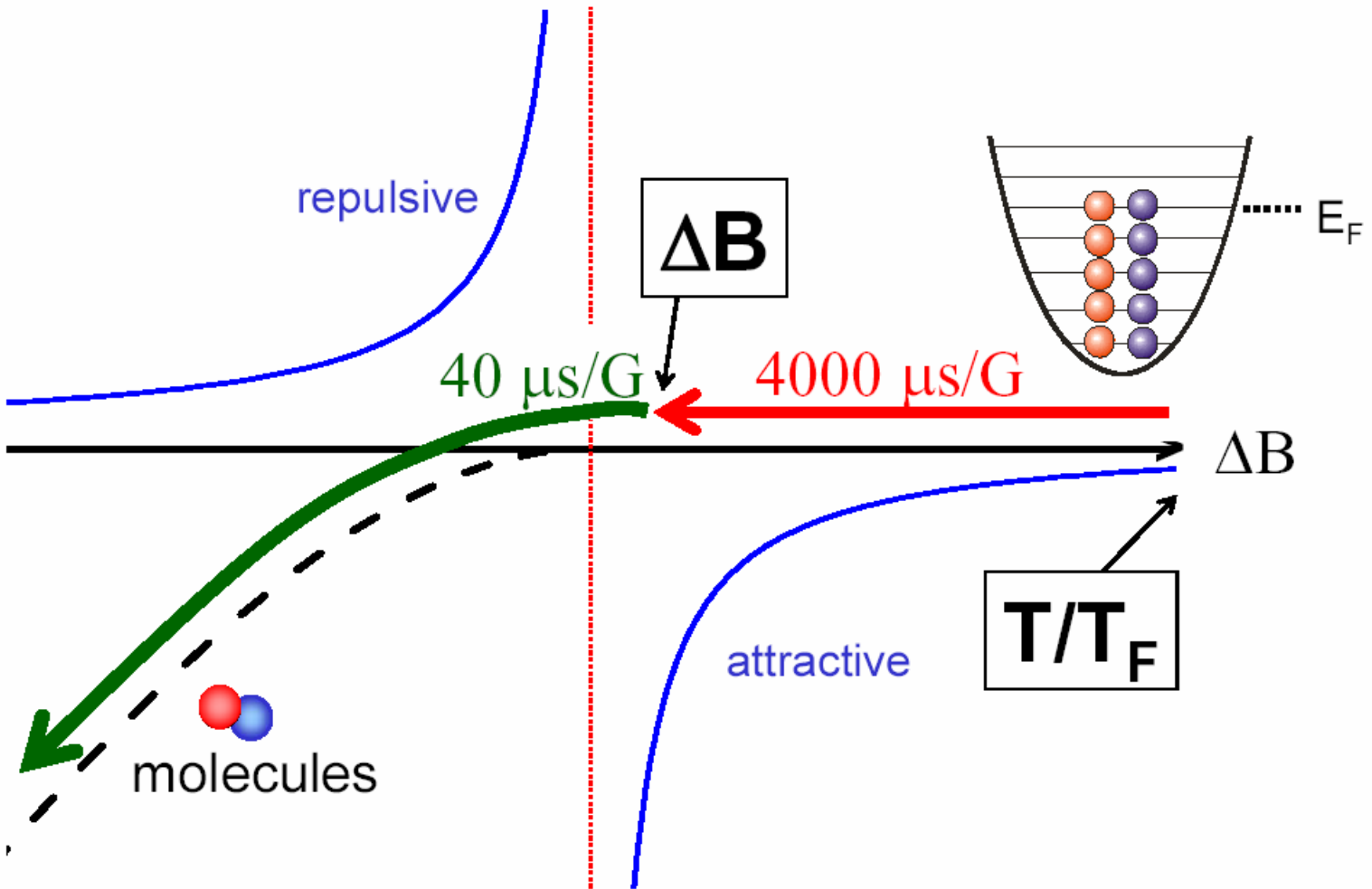
Bon accord avec méthodes QMC (Carlson, 2002, Giorgini 04) et l'exp. d'Innsbruck.

Modèle de champ moyen à T finie

$$\text{For } B = 720 \text{ G}, \quad N_0 / N = 0.70$$

$$\text{and } T = T_c^0 / 2 = 1.2 \mu\text{K}$$

Condensation de paires de fermions :JILA

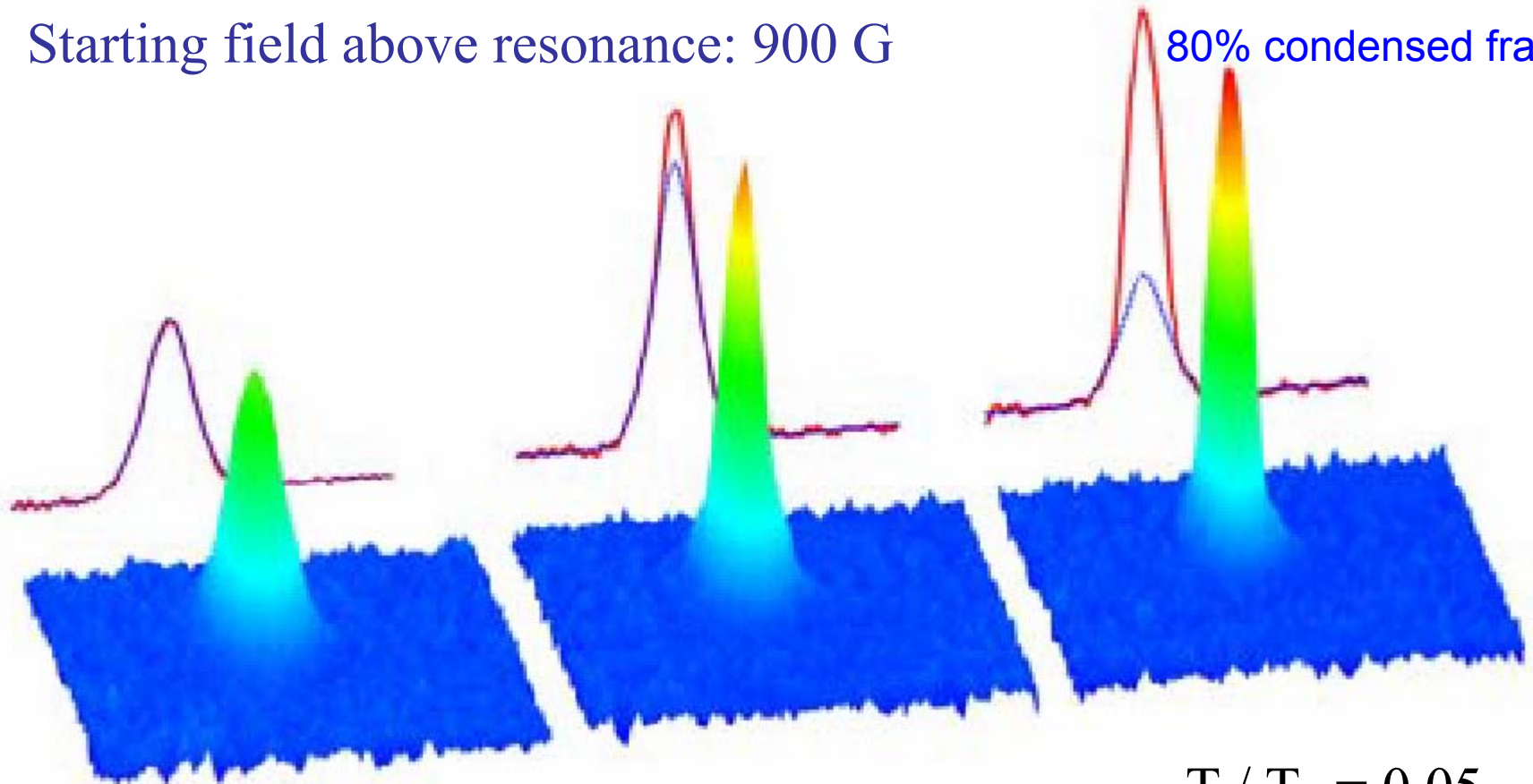


Condensation de paires de fermions: MIT

M. W. Zwierlein et al.,
cond-mat 04

Starting field above resonance: 900 G

80% condensed fraction



Initial

temperature: $T / T_F = 0.2$

$T / T_F = 0.1$

$T / T_F = 0.05$

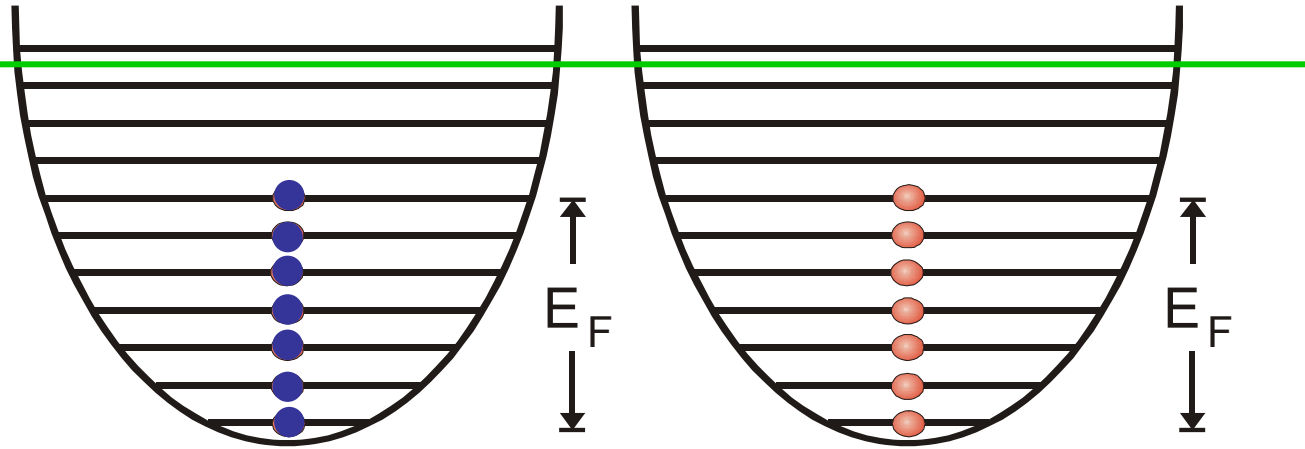
La fraction condensée élevée indique l'existence de paires $k, -k$ du côté de la résonance ou il n'y a pas de niveau moléculaire stable

Condensation de paires de fermions

Image simple (naive !)

Très au dessus de la résonance de Feshbach

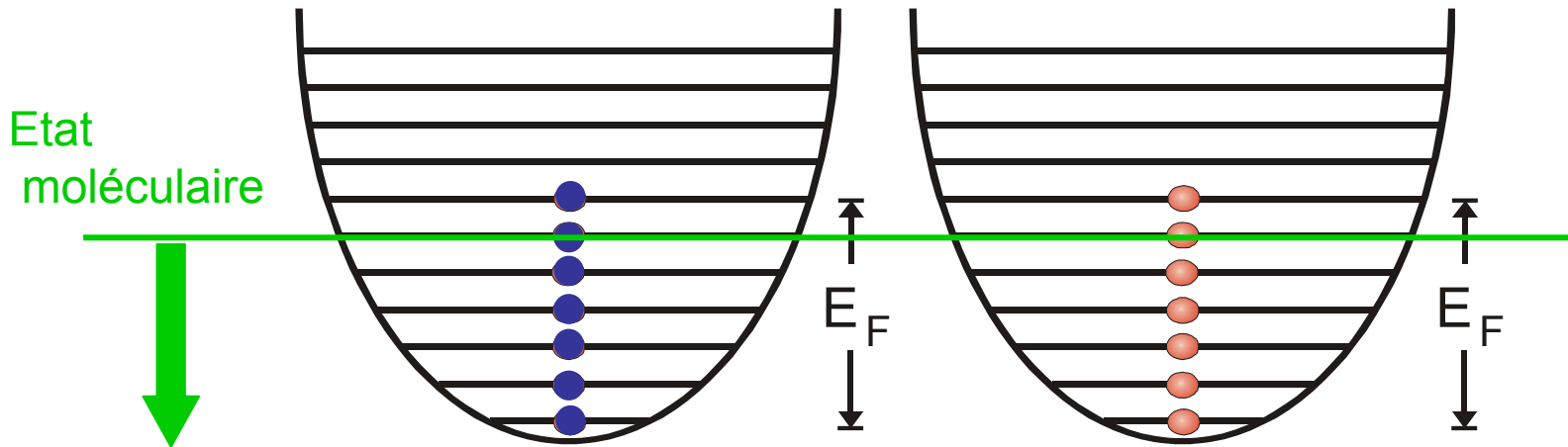
Etat
moléculaire



Condensation de paires de fermions

Image simple

Juste au dessus de la resonance



Commence à former les molécules quand $E_B = 2 E_F$, i.e. du côté fermionique
Paires $k, -k$ (molécules ?) se forment au voisinage de la surface de Fermi
Très faible vitesse du centre de masse.

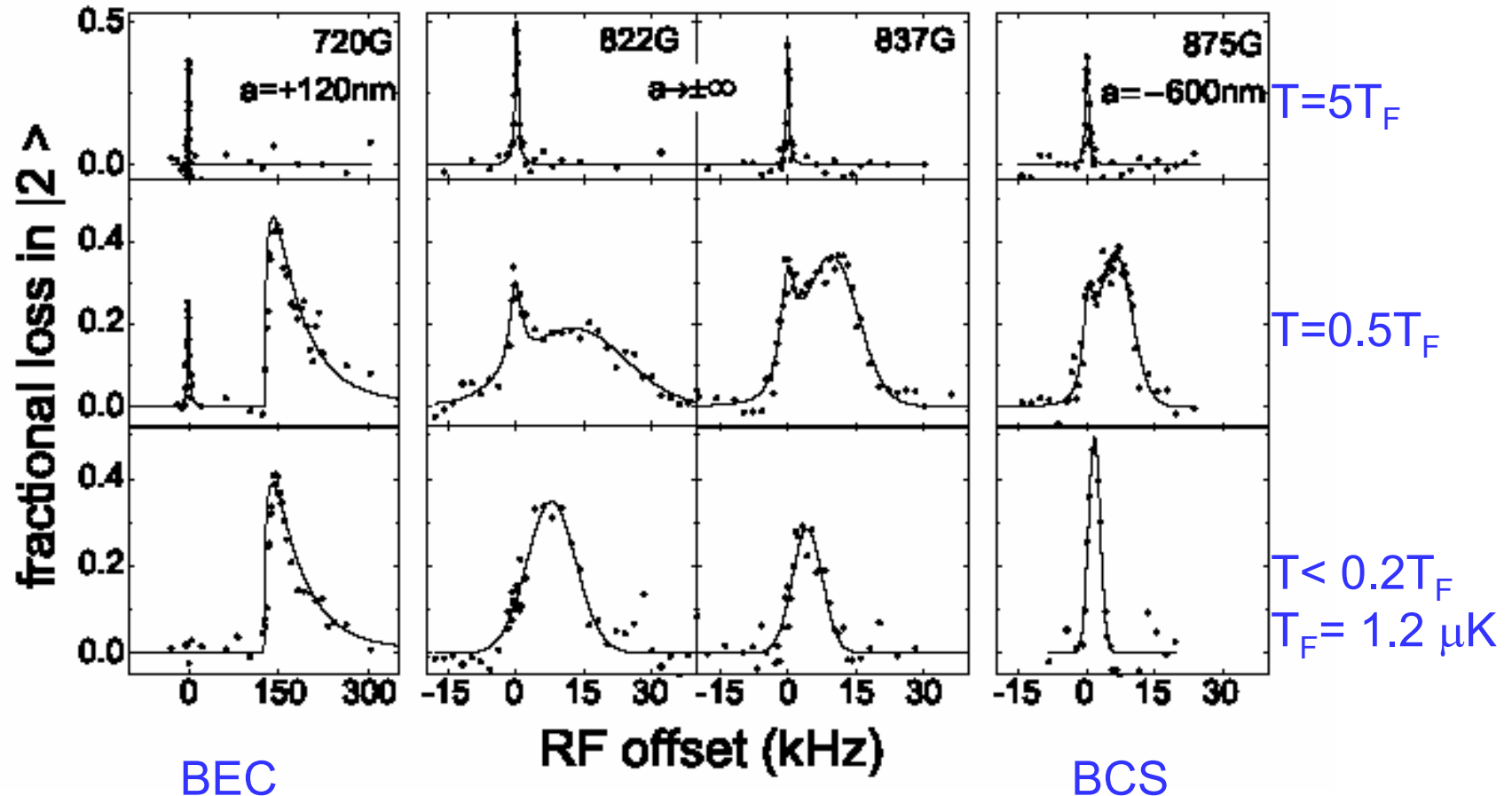
Le nuage de fermions se contracte: L'énergie totale diminue en accord avec les observations

Note: $E_B = E_F$ est équivalent à $k_F a = 1$: régime de forte interaction
Ou encore la distance moyenne entre particules est de l'ordre de a

Observation du gap

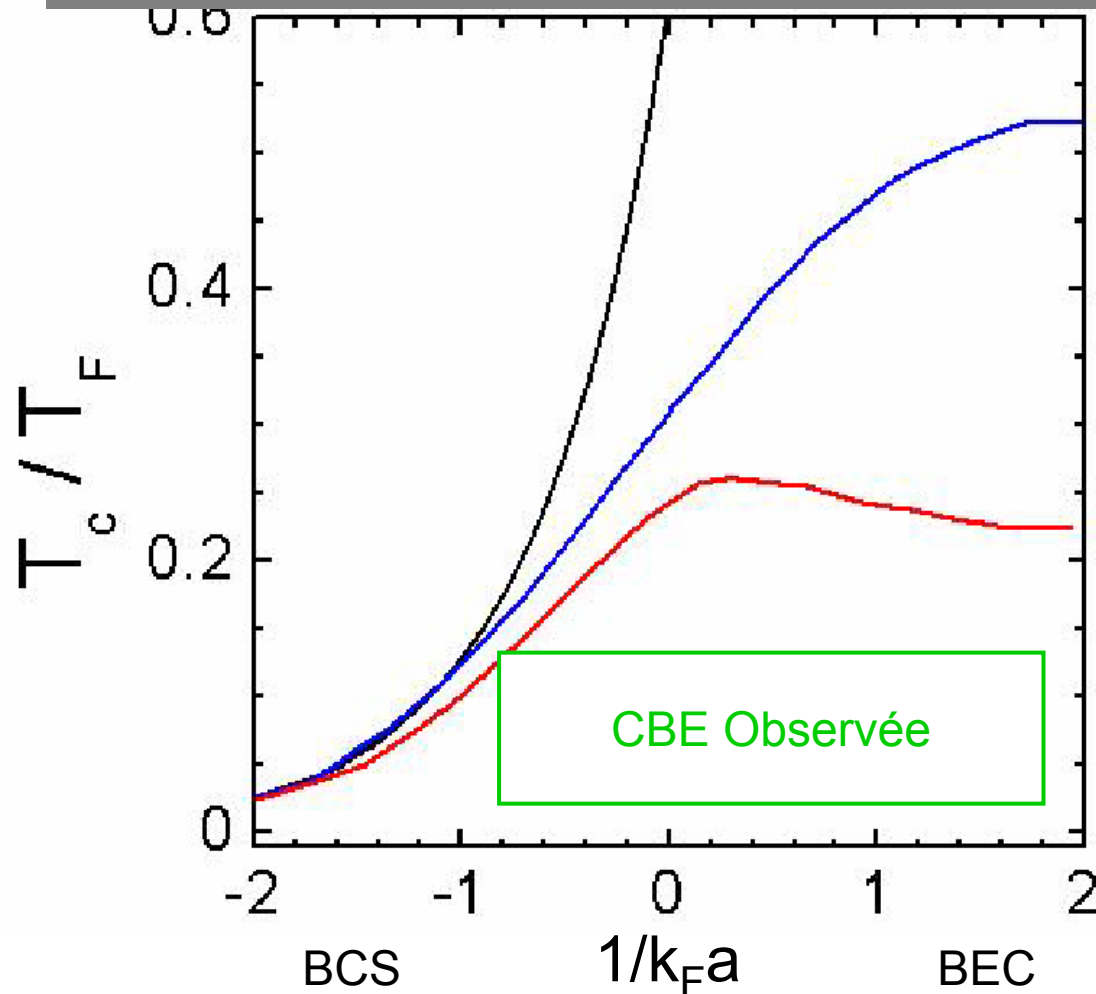
C. Chin et al.
Cond-mat 0405632
Innsbruck

Spectroscopie RF vers niveau 3 vide:
il faut une énergie $h\Delta\nu$ pour briser une paire



A resonance: $h\Delta\nu \sim 0.2 E_F$

BEC-BCS crossover: résumé



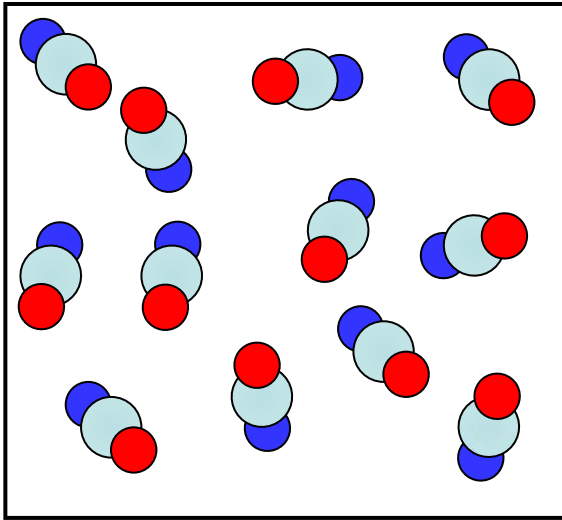
Perali et al.,
Cond-mat 0311309

Sa de Melo, Randéria,
Engelbrecht,
PRL 71, (1993)

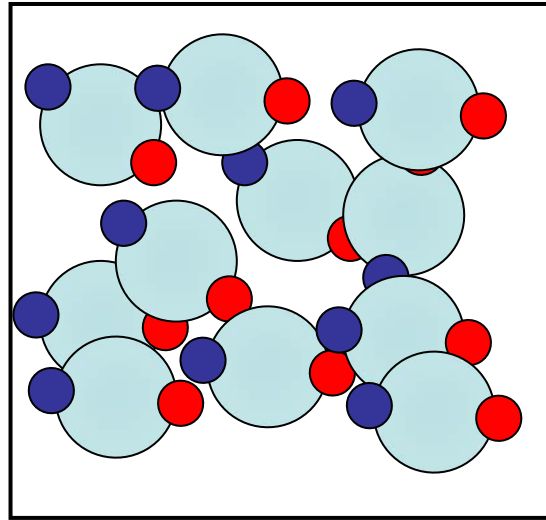
Signatures directes de la superfluidité fermionique à venir
Ordre à longue portée, cohérence, vortex,...

Theory: Leggett, Randéria, Schmidt-Rink, Holland, Kokkelmans, Levin,
Ohashi, Griffin, Strinati, Falco, Stoof, Bruun, Pethick, Combescot,....

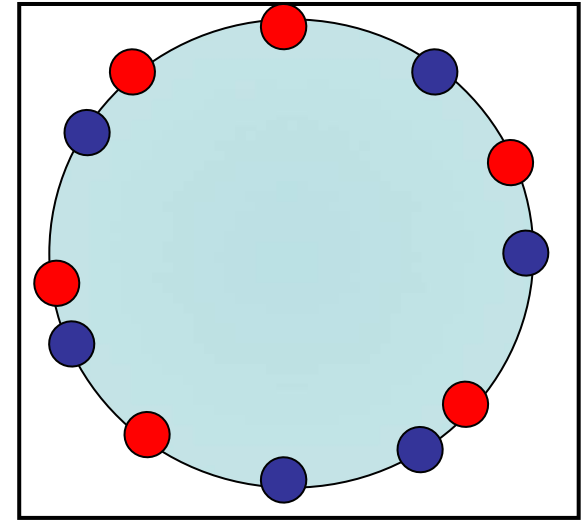
Condensat de molécules ou paires de Cooper



Condensat de molecules
fortement liées
Taille $a \ll n^{-1/3}$
 $n^{-1/3}$: distance moyenne
entre particules



A résonance
 $na^3 > 1$
 $k_F a > 1$
Paires stabilisées par
la mer de Fermi
Taille des paires:
 $hv_F/\Delta \sim k_F^{-1}$ ou plus



Régime BCS:
 $k_F |a| \ll 1$
Paires de Cooper $k, -k$
totalement délocalisées
en position, bien
localisées en impulsion
 $k \sim k_F$

Questions ouvertes

- Phase active d'acquisition de données nouvelles
- Quelle théorie est correcte ?
- Corrections au delà du champ moyen n'ont pas le bon signe: nature composite des bosons ?
- Compréhension théorique de l'expansion d'un superfluide fermionique ?
- Excitations, vortex, propriétés de cohérence
- Fermions dans les réseaux optiques
- Formation de paires en onde p ?