

原子核におけるBCS-BECクロス オーバー

松尾正之（新潟大）

Collaborators: Y. Zhang (天津大)
下山裕考

1. Bohr Mottelson Pines 1958 以来、原子核における対相関の理解・記述は、金属超伝導と同様の「**弱結合BCS理論**」を基礎にして、大いに成功してきた。

$$\Delta \sim 1 \text{ MeV} \ll e_F \sim 40 \text{ MeV}$$

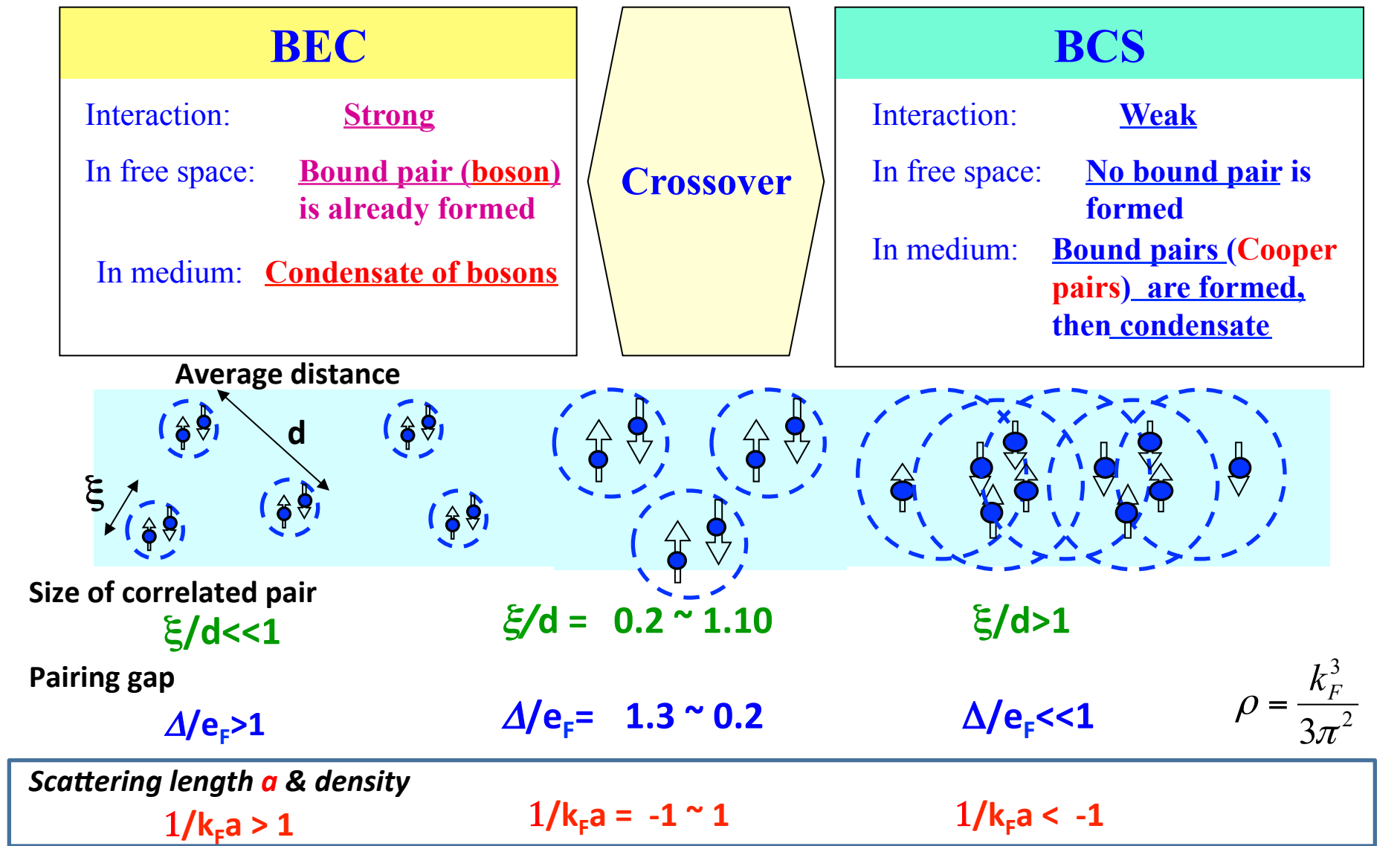
2. しかし、①中性子星において実現している「低密度中性子物質」や、
②非常に中性子過剰で複数の中性子が弱束縛となっているエキゾチック原子核では、
「**強結合フェルミ粒子超流動理論**」や「**BCS-BECクロスオーバー理論**」が示すような種々の新奇現象を示す可能性がある。

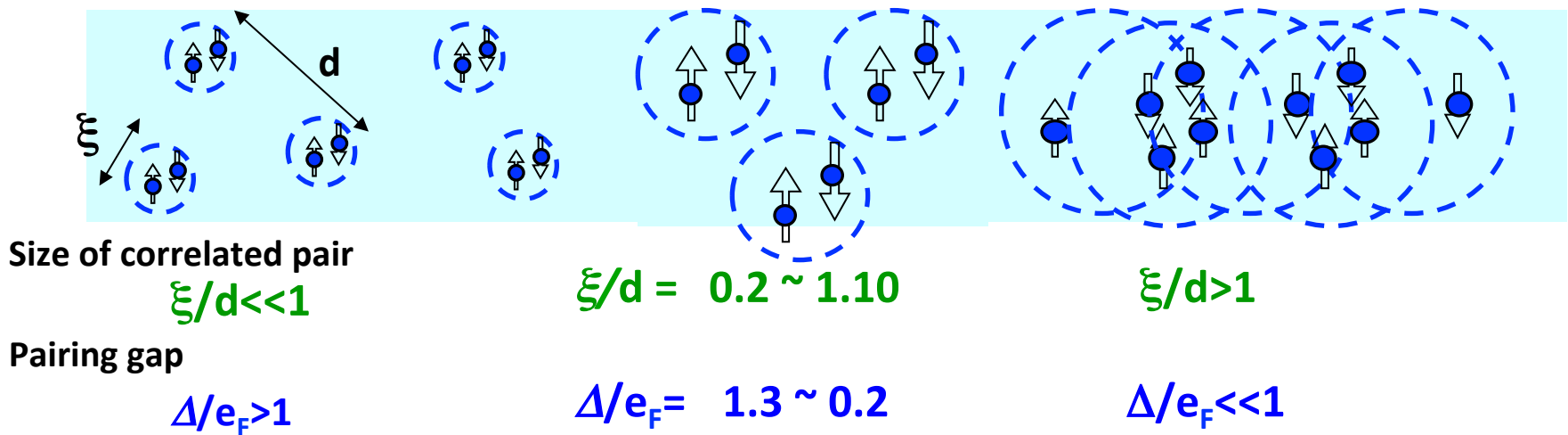
$$\Delta \sim e_F$$

3. それはどのような現象として出現するのか？ 実験的にはどのように検証するのか？
観測的にはどこにどのように現れるのか？

Bose condensation and strong coupling pairing: BCS-BEC crossover 5

Leggett 1980, Nozieres & Schmitt-Rink 1985





1. EOS状態方程式・熱力学的性質への影響（中性子物質）

$$\Delta \sim e_F \quad \text{対相関エネルギー}$$

2. 空間的相関の出現（中性子物質、中性子過剰核）

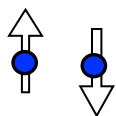
複合ボソンの相関、ダイニュートロン相関

3. 超流動体の集団運動への影響（中性子物質、中性子過剰核）

中性子星の新奇冷却機構
 中性子過剰核の集団運動モード

核力の性質

Singlet-S波 nn相互作用



virtual state

Large scattering length

$$a = -18.5 \text{ fm}$$

$$r_{\text{eff}} = 2.8 \text{ fm}$$

Cf. Saturation density

$$\rho_n = 0.085 \text{ fm}^{-3}$$

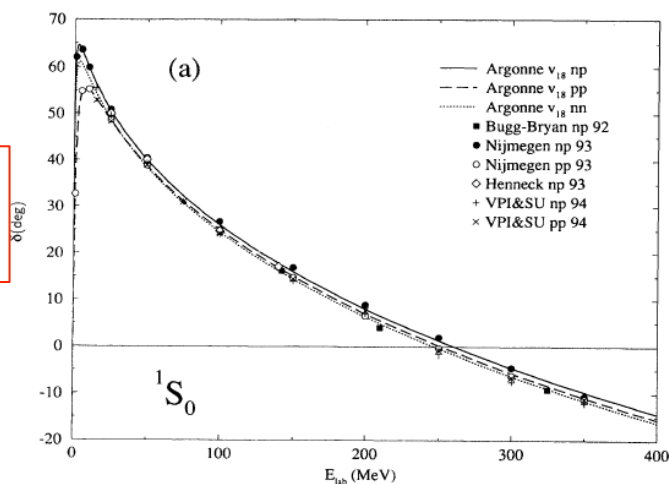
$$k_F = 1.36 \text{ fm}^{-1}$$

$$d = \rho^{-1/3} = 2.3 \text{ fm}$$

$$k_F a < -20$$

$$1/k_F a \sim 0$$

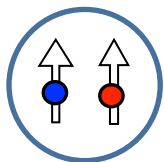
But with strong E,p-dependence



Wiringa et al, PRC51, 38 (1995)

Triplet-SD波 np相互作用

having a bound state



$$a = 5.4 \text{ fm}$$

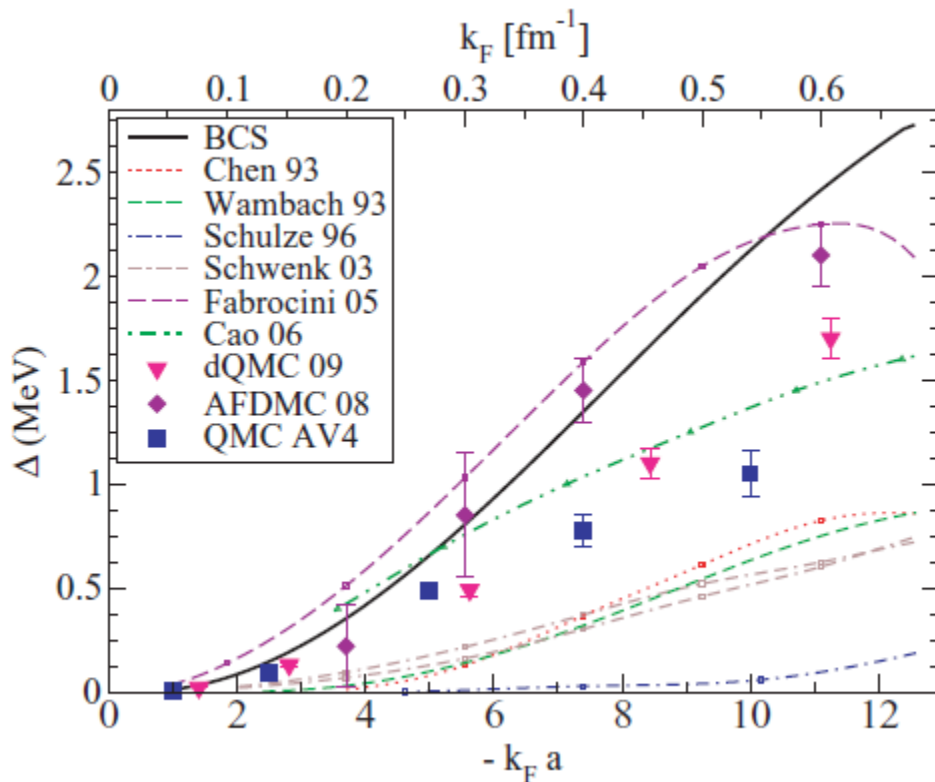
$$r_{\text{eff}} = 1.8 \text{ fm}$$

pairing gap in neutron matter

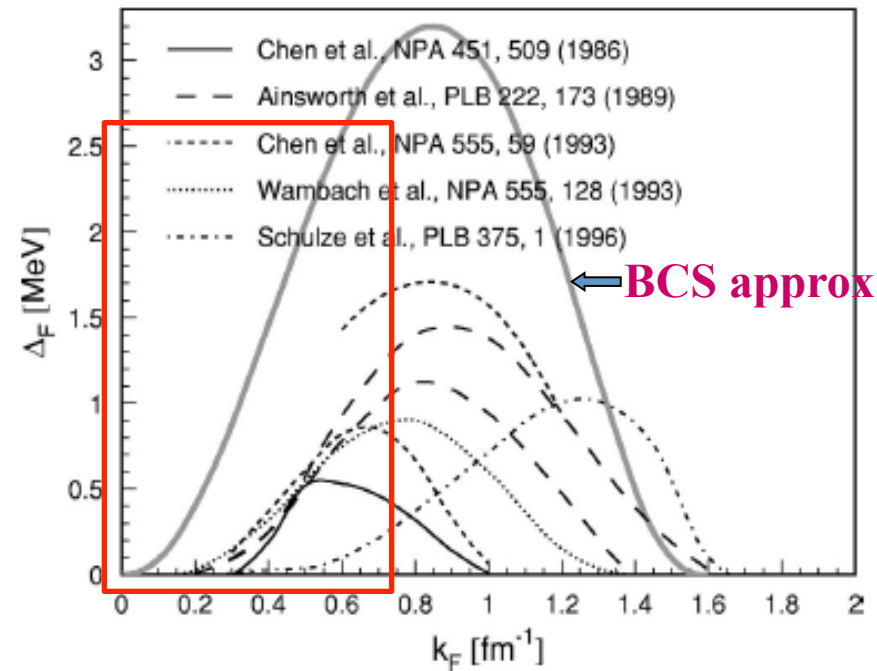
BCS (mean-field) calculation & ab initio calculations

- Strong density dependence

- $\Delta_{\text{ab initio}} = (1 \sim 0.5) \Delta_{\text{BCS}}$



Gezerlis & Carlson, PRC81 (2010)



Lombardo & Schulze 2001

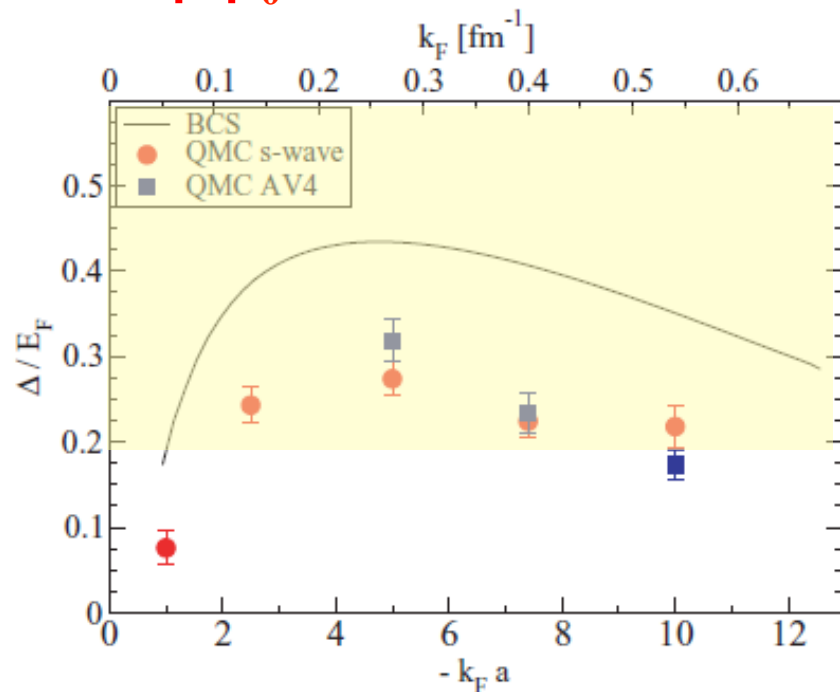
Strong pairing in dilute neutron matter

Large scattering length $a = -18\text{fm}$ for nn-attraction

“Large” pair gap vs. Fermi energy $\Delta/e_F > 0.2$ at low-densities

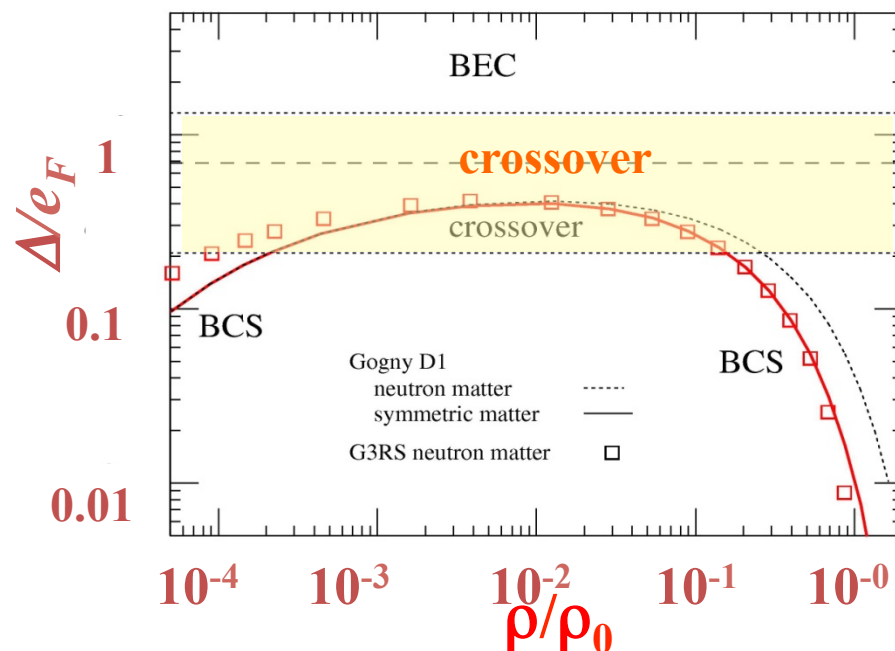
Monte-Carlo calculation

$$\rho/\rho_0 = 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-1}$$



Mean-field calculation (BCS approx.)

$$\rho/\rho_0 = 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-1}$$



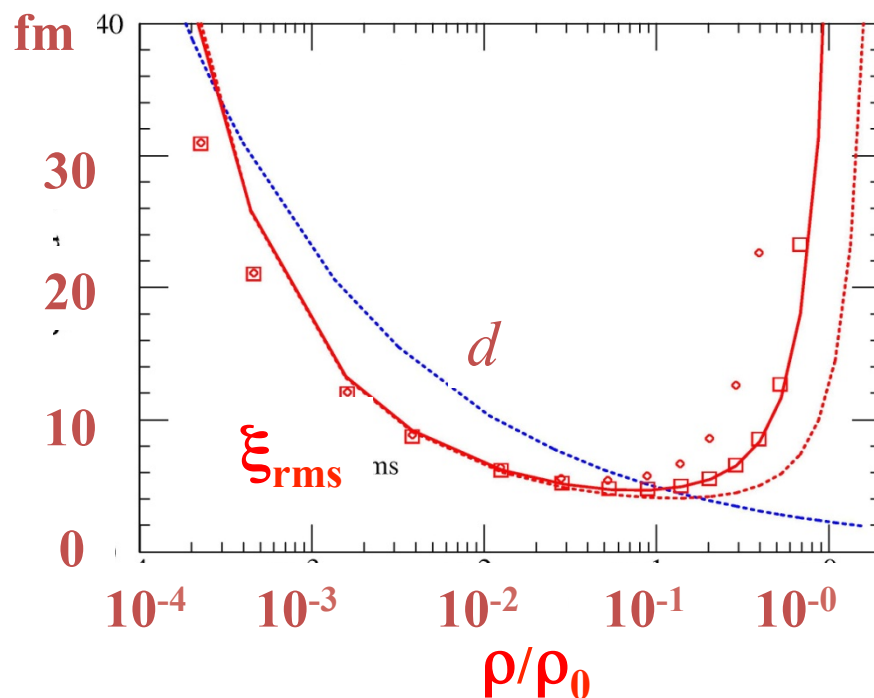
Gezerlis & Carlson, PRC81,025803 (2010)

MM, PRC73,044309(2006)

Small Cooper pair in dilute neutron matter

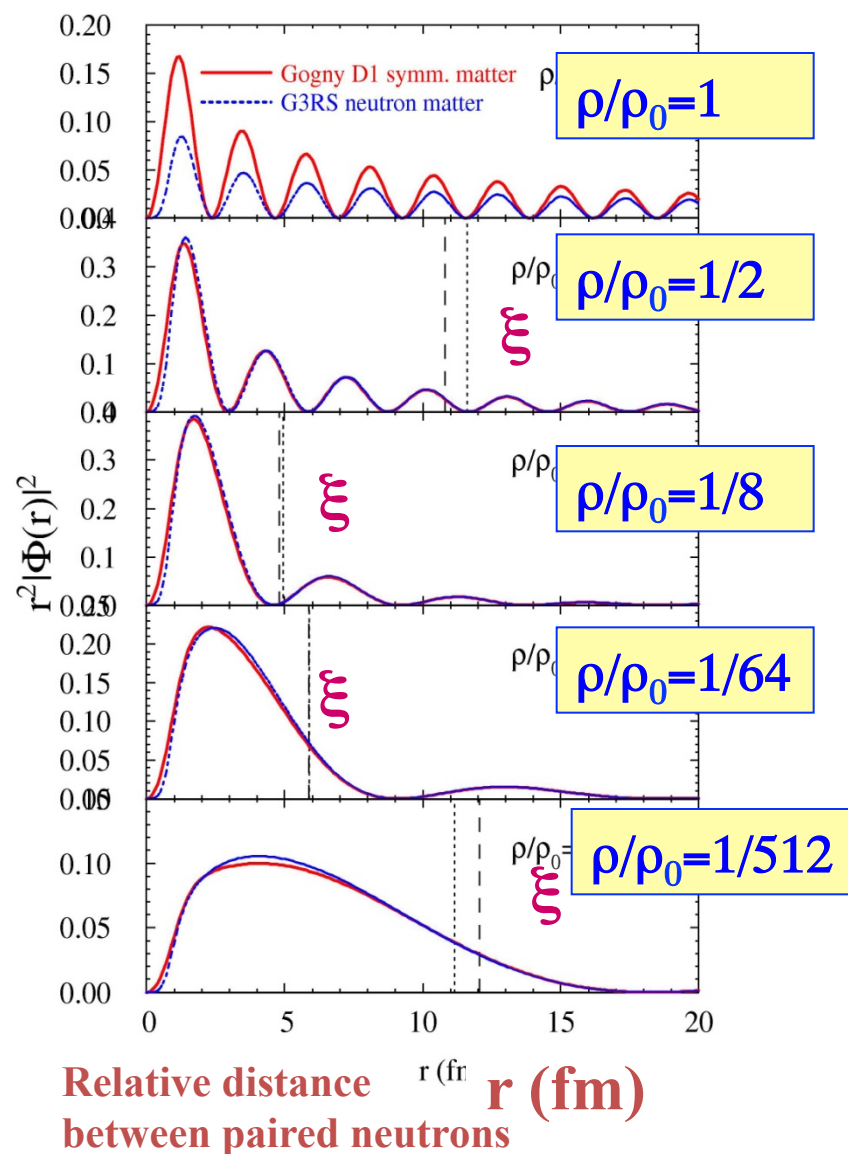
BCS calculation using A bare force (G3RS)
Gogny force (D1)

Neutron pairing gap



Pair wave function has large amplitude at short relative distances $r \sim 2-3$ fm

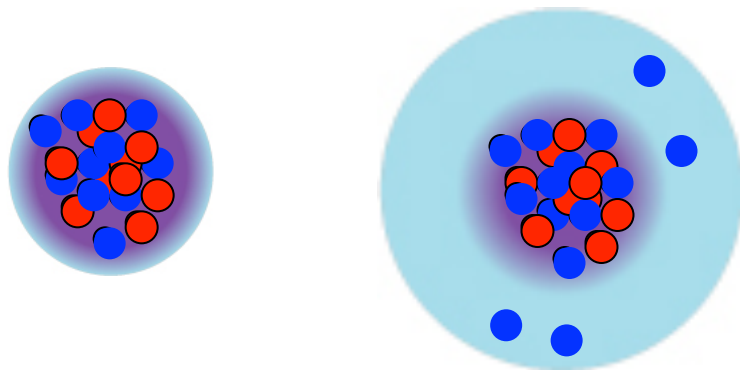
Cooper pair wave function



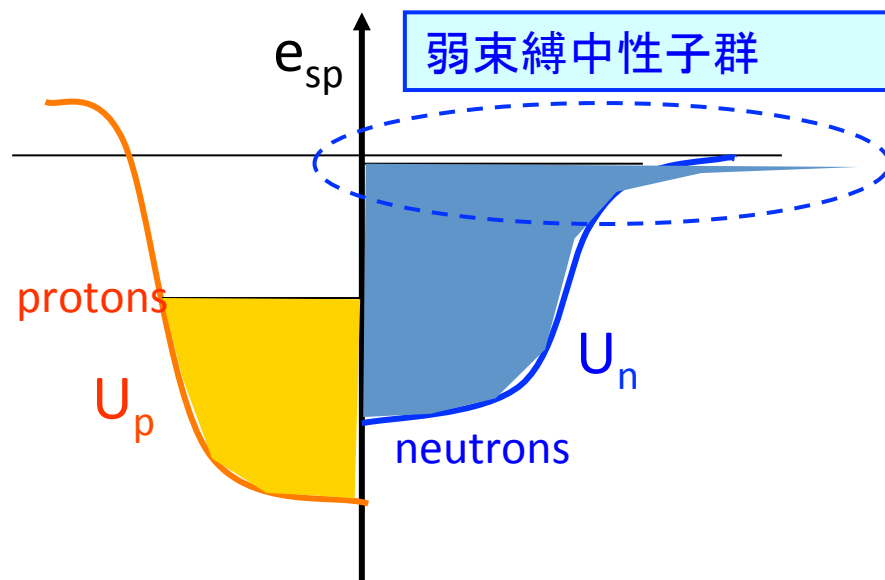
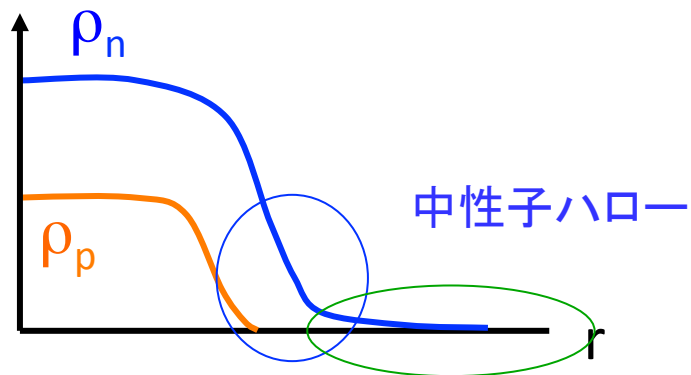
MM, PRC73,044309(2006)

Margueron et al, PRC77,054309(2008)

中性子ハロー： 大きな散乱長(をもつnn相互作用)の物理



density



Skyrme HFB計算 With Y. Zhang

1. Coordinate-space HFB with very large box to guarantee the asymptotics

$$\begin{pmatrix} h - \lambda & \Delta \\ \Delta & -h + \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_i^{(1)}(\vec{r}\sigma) \\ \varphi_i^{(2)}(\vec{r}\sigma) \end{pmatrix} = E_i \begin{pmatrix} \varphi_i^{(1)}(\vec{r}\sigma) \\ \varphi_i^{(2)}(\vec{r}\sigma) \end{pmatrix}$$

1, Radius size = 100 fm

2, Mesh diagonalization method

3, Continuum states with

sufficiently large orbital ang. mom. $L_{\text{cut}} \sim 100 \text{ hbar}$

2. Pairing force (ρ -dep. contact force) reproducing the nn-scat. length $a = -18 \text{ fm}$

$$v(1,2) = V_n[\rho_n(\vec{r})]\delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)$$

$$V_n[\rho_n] = v_0 \left(1 - 0.71 (\rho_n / 0.08)^{0.59} \right)$$

$$v_0 = -458.4 \quad \leftarrow a_{nn} = -18.5 \text{ fm}$$

$$E_{\text{cut}} = 60 \text{ MeV}$$

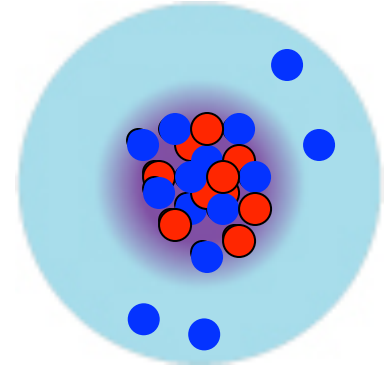
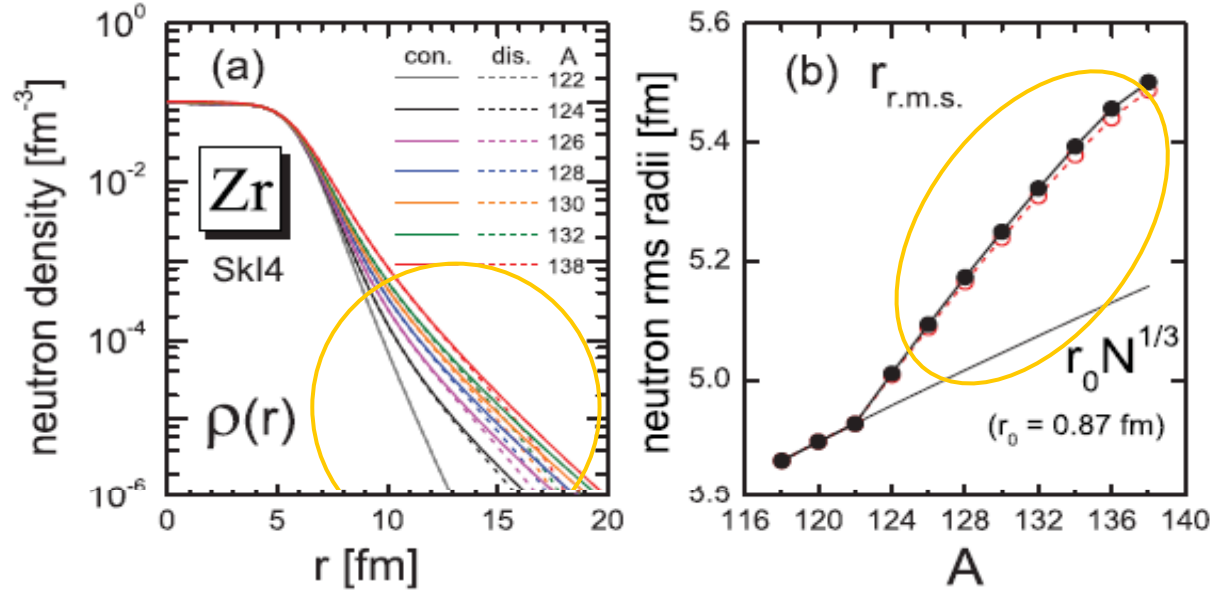
3. Ca, Ni, Zr, Sn from stable nuclei to neutron drip-line

巨大中性子ハローが予言されている $^{124-138}\text{Zr}$ を例にとる

巨大中性子ハロ一核 $^{124-138}\text{Zr}$

J. Meng, P. Ring, Phys. Rev. Lett. 80, 460 (1996), 他

Y. Zhang, M. Matsuo, J. Meng, Phys. Rev. C86, 054318 (2012)



中性子ハローの構造

1粒子密度を通して見る

$$\rho(\vec{r}) \equiv \langle \Psi_N | \psi^\dagger(\vec{r}\sigma) \psi(\vec{r}\sigma) | \Psi_N \rangle = \sum_i |\varphi_i^{(2)}(\vec{r}\sigma)|^2$$

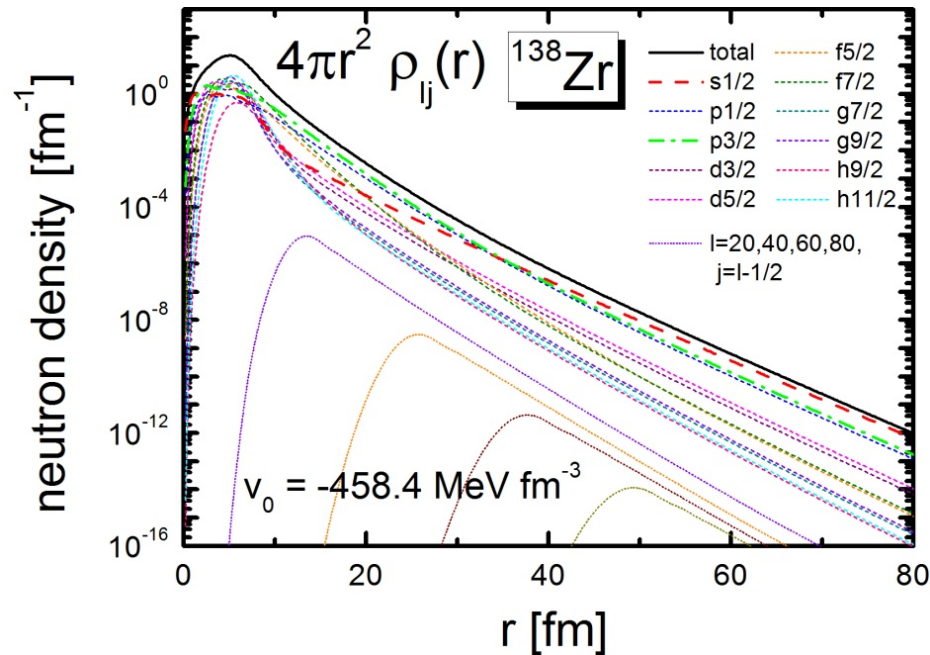
ペア凝縮を通してみる

$$\tilde{\rho}(\vec{r}) \equiv \langle \Psi_{N-2} | \psi(\vec{r}\uparrow) \psi(\vec{r}\downarrow) | \Psi_N \rangle = \sum_i \varphi_i^{(1)}(\vec{r}\uparrow) \varphi_i^{(2)}(\vec{r}\uparrow)$$

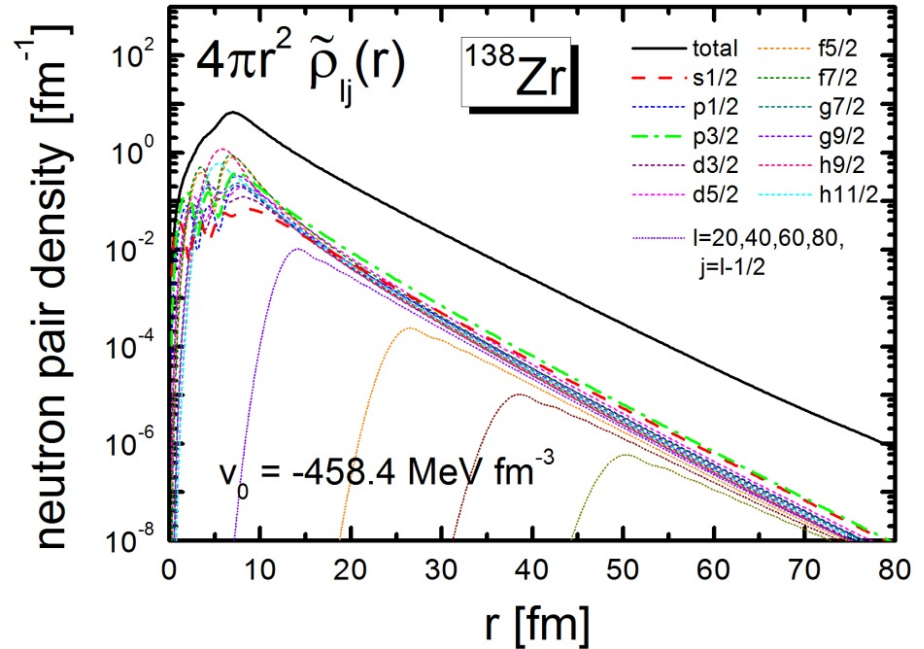
1粒子軌道の部分波 (angular momenta) 毎の寄与を調べてみる

中性子ハローの構造

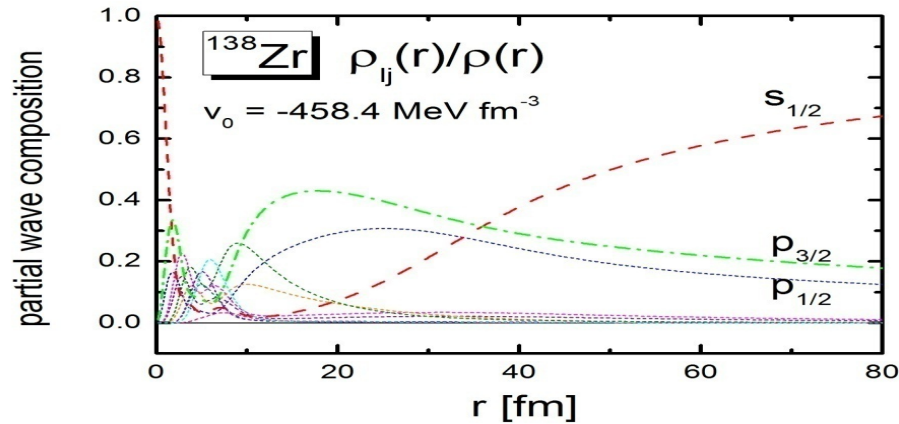
1粒子密度を通して見ると



ペア凝縮を通して見ると

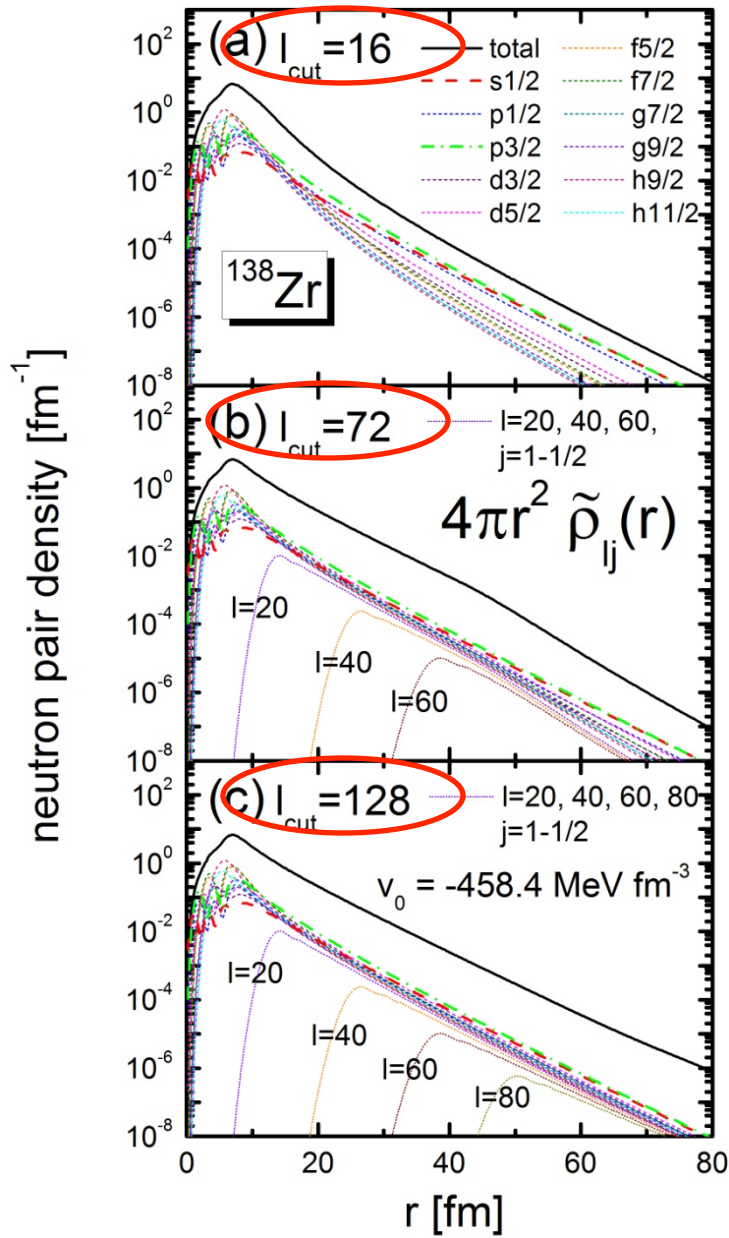


核表面遠方(ハロー領域)の主要成分は、低角運動量軌道、特にs軌道が優位。



非常に高い角運動量 $L \sim 100$ まで、等しくコヒーレントに寄与

中性子ハロー対凝縮における高角運動量軌道の寄与

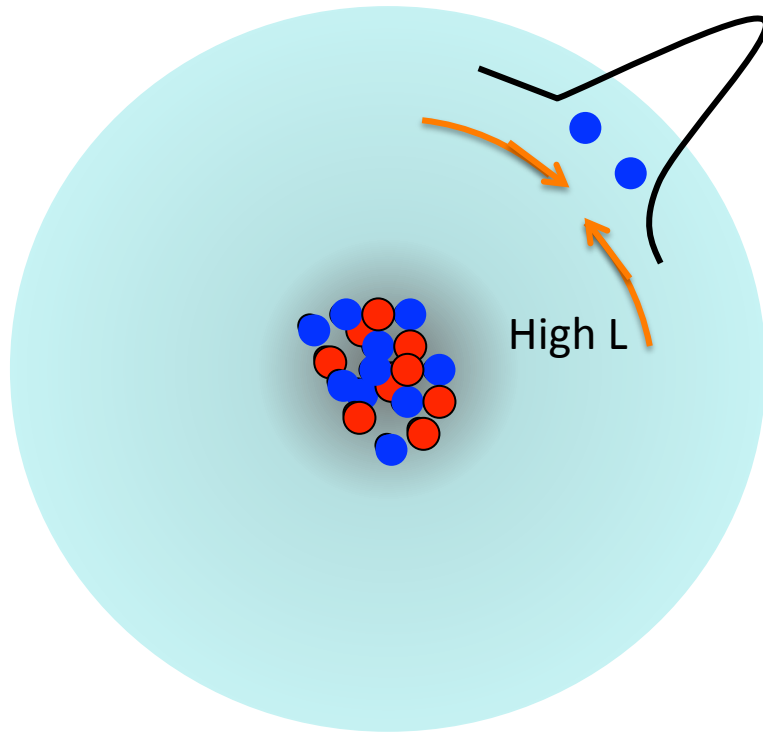


$l_{\text{cut}}=72$, converge to $r=40$ fm

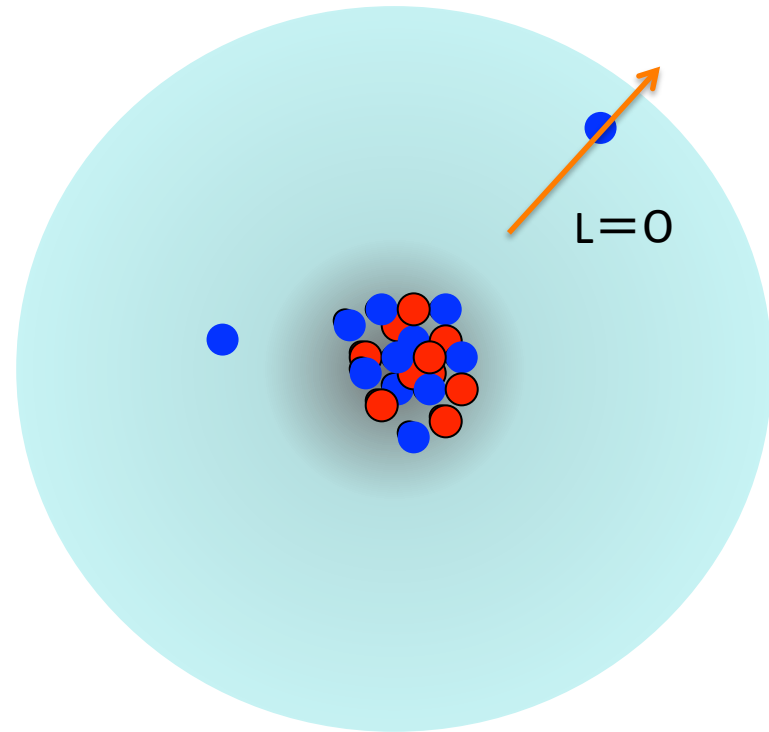
$l_{\text{cut}}=128$, converge to $r=80$ fm

大散乱長相互作用による対相関(ユニタリー近傍)

nn間に強い空間相関
(ダイニュートロン相関)



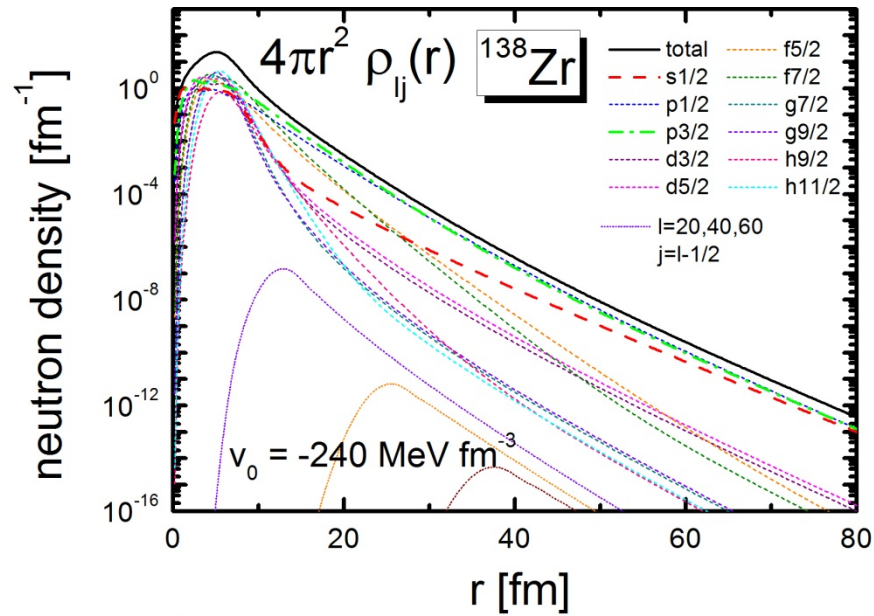
核ポテンシャルによらず(相関によって)
s軌道優位の1粒子浸み出し



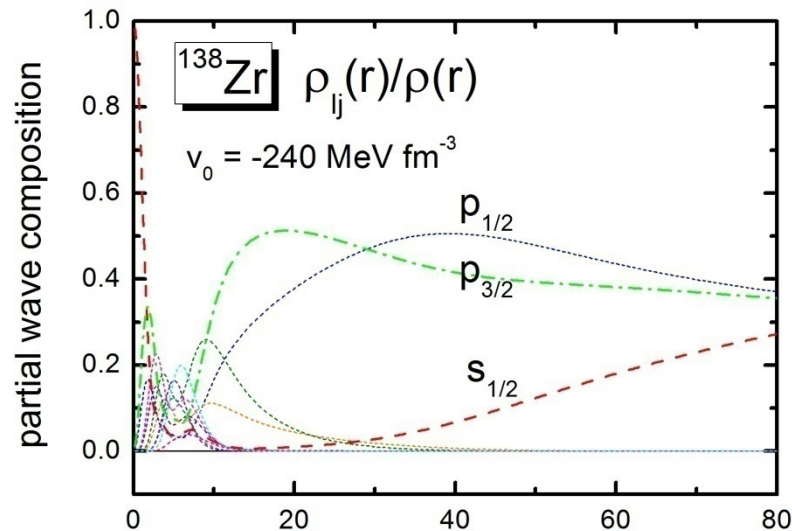
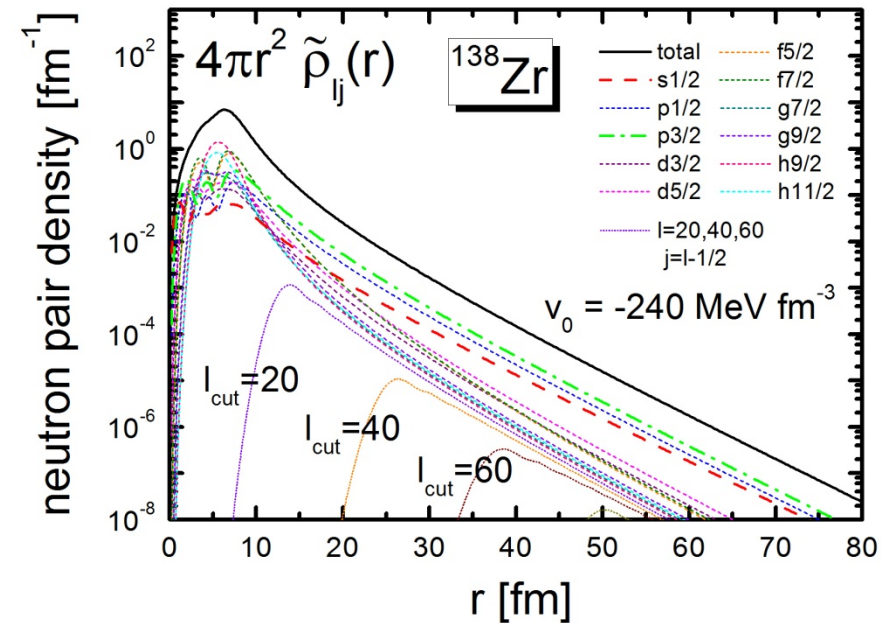
nn相互作用が弱い場合は、

$v=240$

1粒子密度: S軌道優位は弱まり



ペア凝縮: コヒーレンス(ダイニュートロン
相関)も弱まる



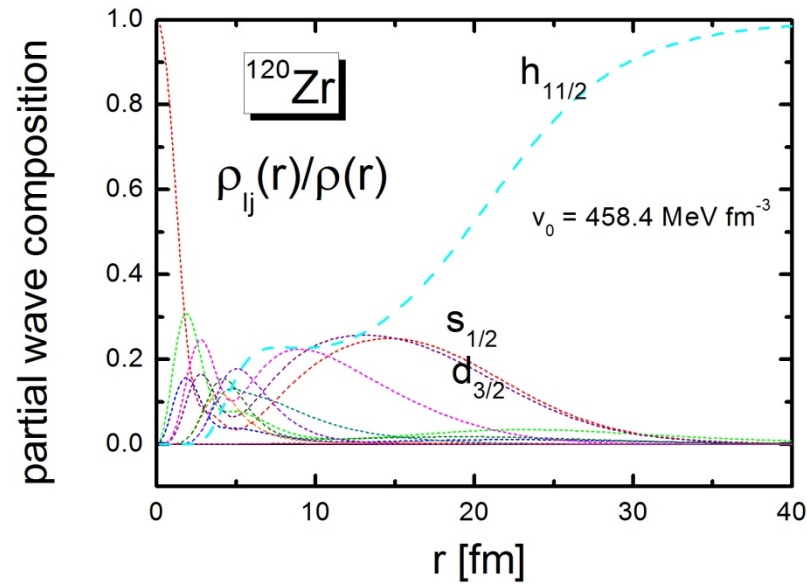
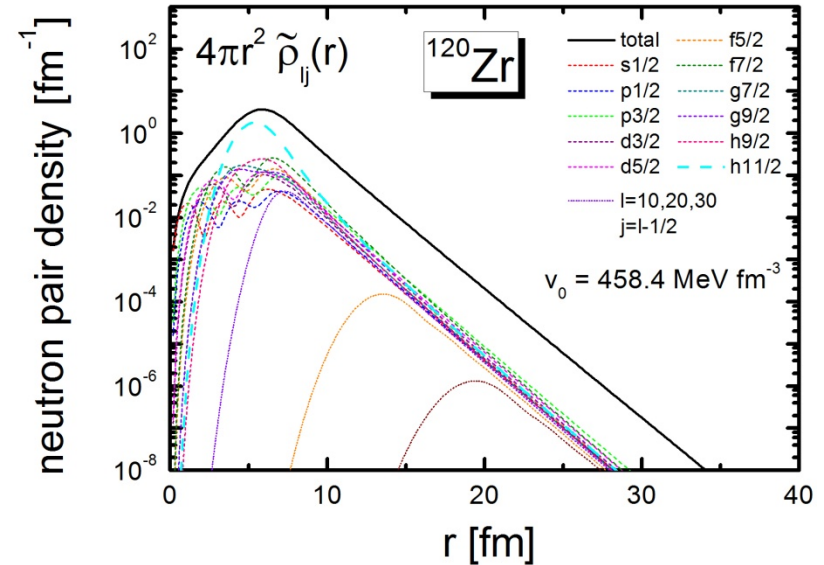
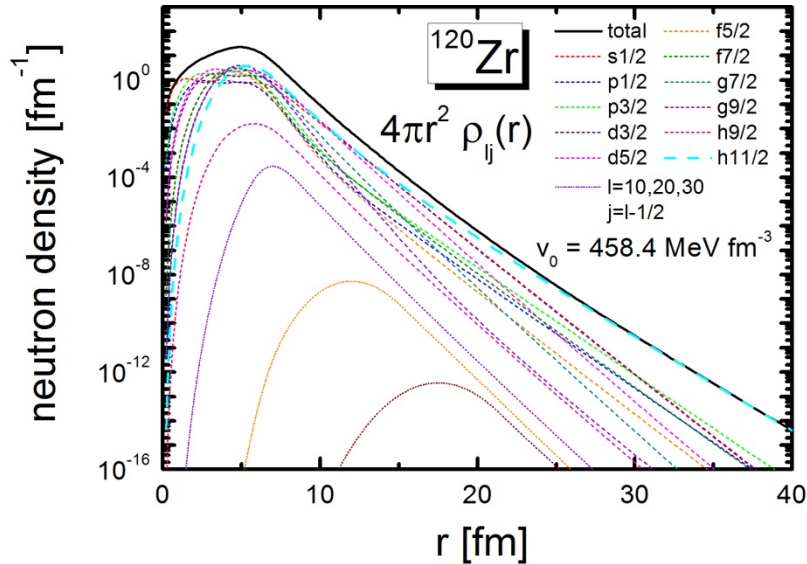
ドリップライン近傍までいかない場合

^{120}Zr

$v=458$

1粒子密度: S軌道優位は弱まるが

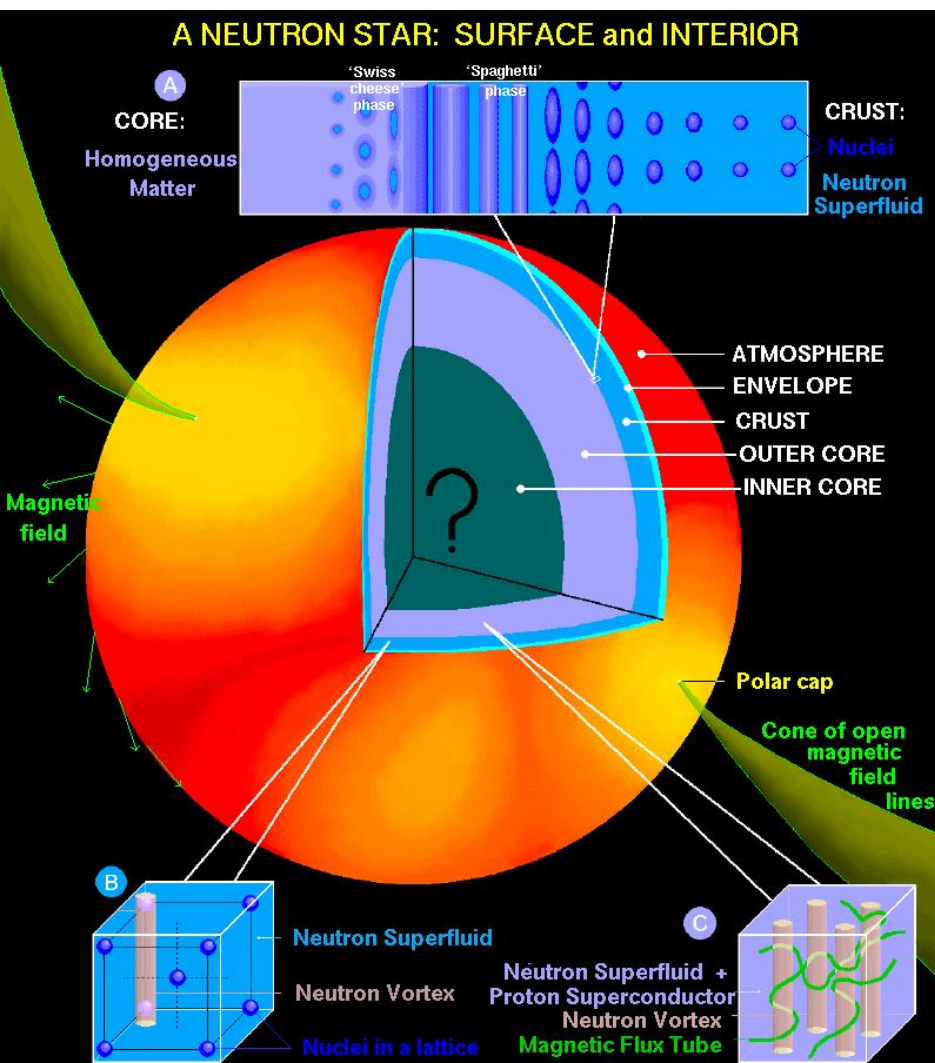
ペア凝縮: コヒーレンス(ダイニュートロン相関)はしつこく残る



- (a) (c) With much deeper Fermi surface, the asymptotic tail of particle density is governed by the lowest discrete q.p. state.
- (b) similar strong coherence with previous two cases.

中性子星内殻における 中性子超流動体の集団運動

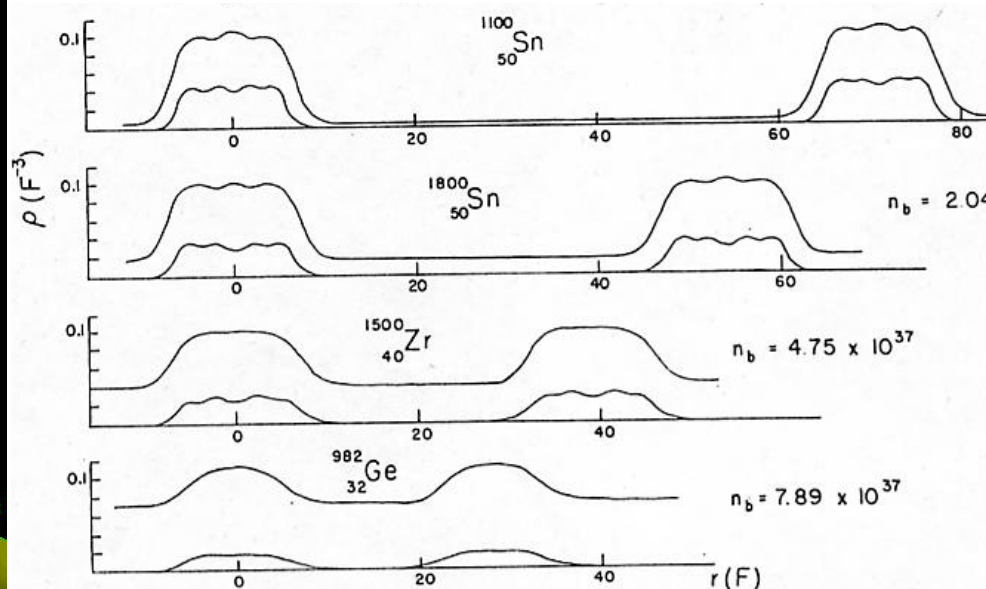
中性子星内殻と“中性子過剰核”



内殻＝“中性子過剰核”の格子
＋低密度中性子ガス

$$0 < \rho_n < \rho_0$$

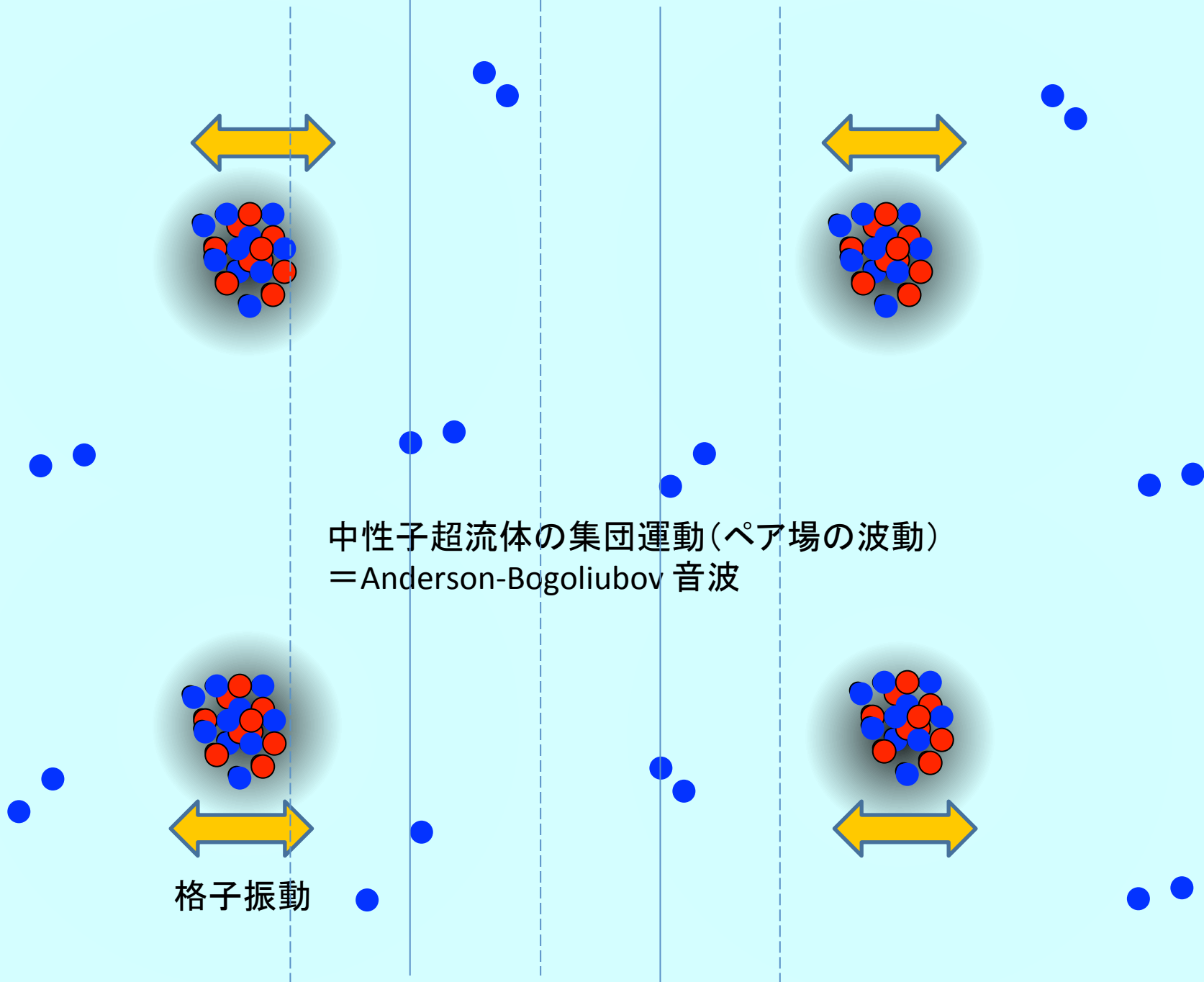
Negele & Vauthrin 1973



- 内殻の配位 Z, N, a は？
- 超流動中性子ガスの対エネルギー
渦系のピンニングエネルギー
- クーリングへの超流動中性子の寄与

中性子超流体の集団運動(ペア場の波動)
= Anderson-Bogoliubov 音波

格子振動



中性子星(マグネター)の冷却新機構？

D.N. Aguilera, V. Cirigliano, J.A. Pons, S. Reddy, R. Sharma, PRL 102, 091101 (2009)

V. Cirigliano, S. Reddy, R. Sharma, PRC 84, 045809 (2011)

N. Chamel, D. Page, S. Reddy, PRC 87, 035803 (2011)

「電子冷却は磁場で抑制され、格子振動とAnderson-Boboliubov音波の連成モードによる冷却が優位になる

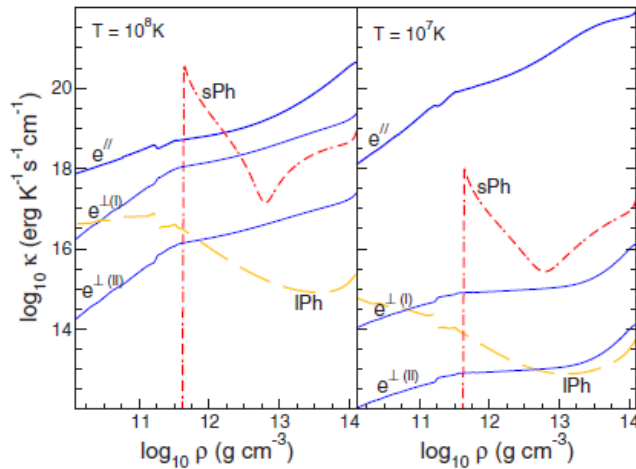


FIG. 2 (color online). Thermal conductivity in a NS crust for $T = 10^8$ K (left) and $T = 10^7$ K (right). The dotted-dashed (red) curve shows the contribution due to SPHs. The thick (thin) solid lines show the electron conductivity in the direction longitudinal (perpendicular) to the magnetic field lines for $B = 10^{13}$ G (i) and $B = 10^{14}$ G (ii). The dashed line (yellow) is the LPH contribution.

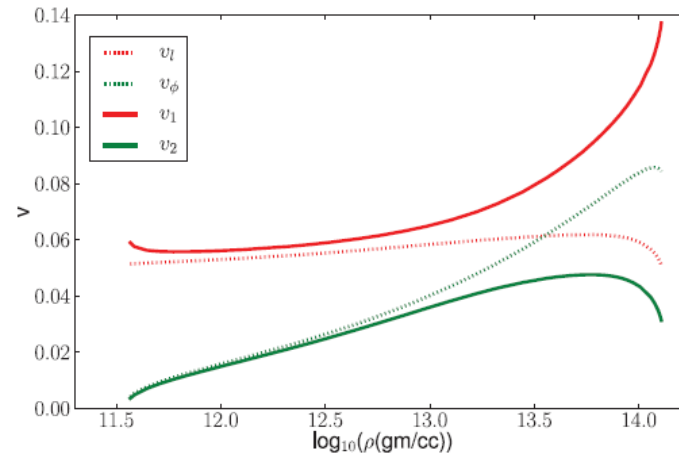
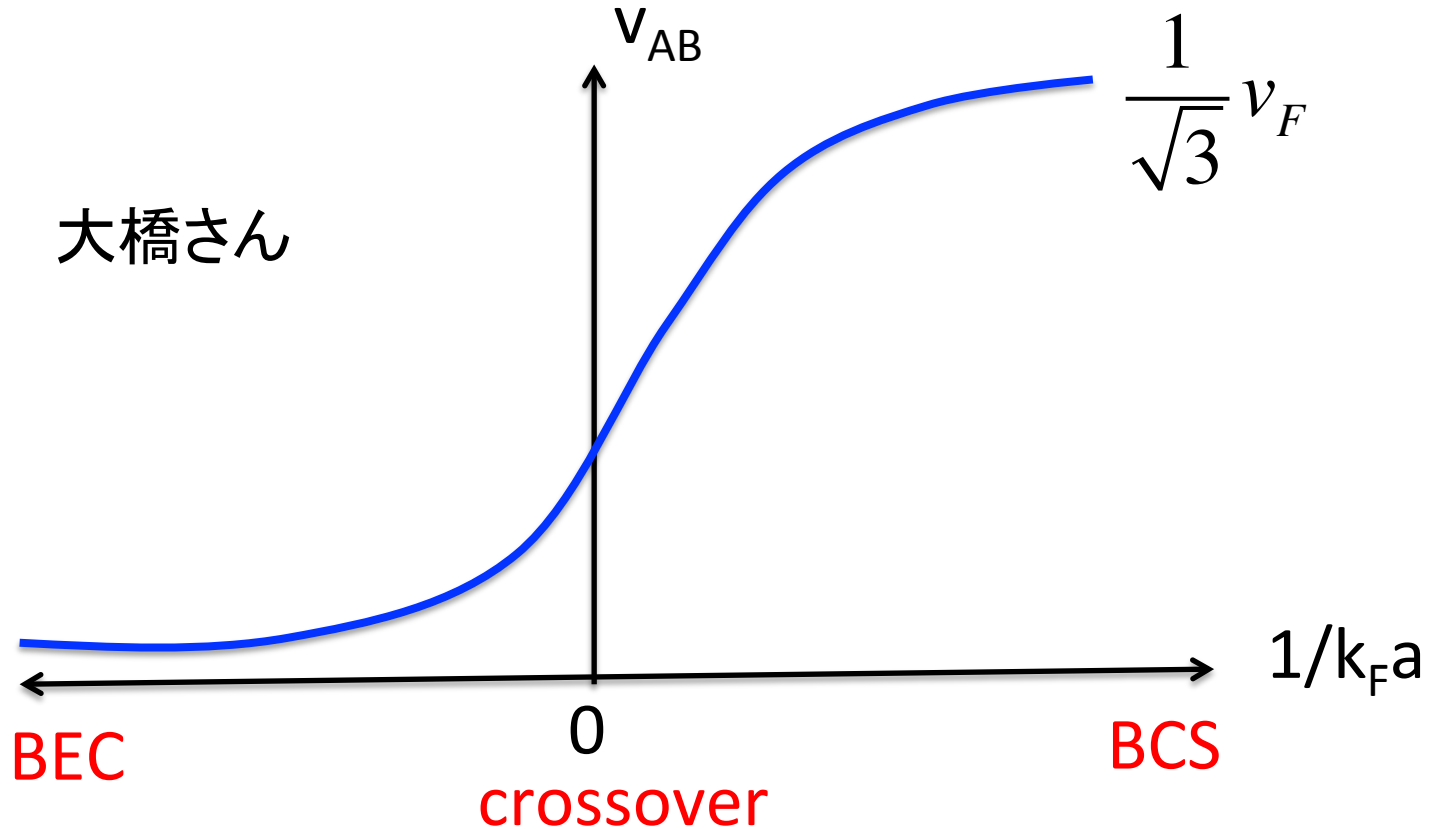


FIG. 1. (Color online) The velocities of the two eigenmodes. The dotted lines are v_l and v_ϕ with mixing ignored.

しかし、これらでは有効理論による現象論的扱いがなされていて、用いられるパラメーターを、より原理的立場あきらかにすることが必要。例えば、

Q1 Anderson-Bogoliubov音波の速度はBCS-BECクロスオーバーに強く依存するが、考慮されているか？



Cf. N. Martine, M. Urban, PRC90, 065805 (2014)

中性子物質でのQRPA計算： 速度が1/3にまで変化する

Q2 Lattice phononとsuperfluid phononの結合係数は？

Q3 Lattice振動（結合モード）の速度

Q4 Ionの慣性質量は？

マグネターのQPOにも影響するのでは？

祖谷さん