

不安定核への平均場アプローチ

北海道大学 宇宙理学専攻 大学院特別講義 「宇宙理学特別講義I」

2009年1月28日—30日

新潟大学理学部 松尾正之

1. **イントロダクション： 扱う課題の概観**
2. **Hartree-Fock理論： 平均場アプローチのプロトタイプ**
3. **対相関のBCS理論： 低密度核物質でのダイニュートロン相関**
強結合対相関とBCS-BECクロスオーバー
4. **Hartree-Fock-Bogoliubov理論： 中重質量不安定核でのダイニュートロン相関**
座標表示HFB理論の“わかりやすい”定式化
5. **連続状態QRPA理論： 中重質量不安定核でのエキゾチック集団励起モード**
時間依存HFB理論と原子核の応答

1. イントロダクション

扱う課題の概観

RIビームファクトリーで拓かれる原子核物理 の新領域

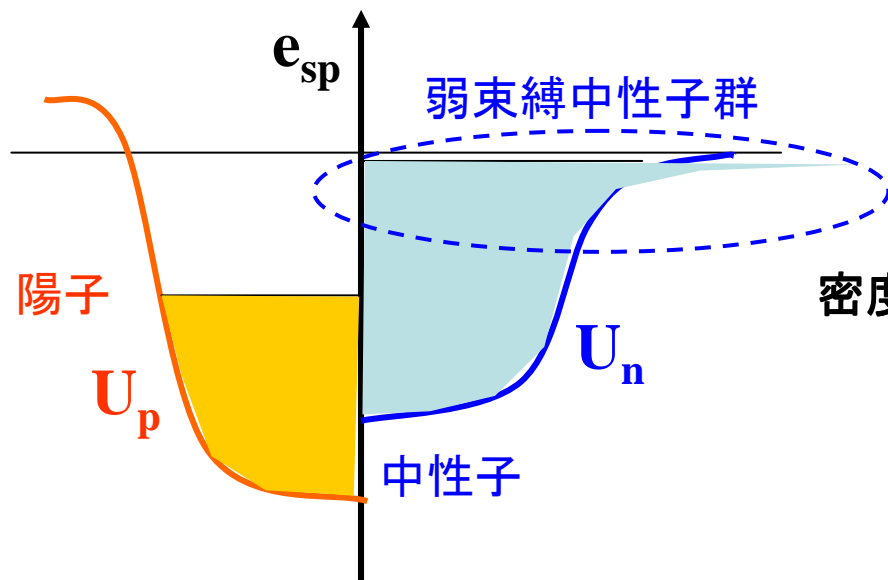
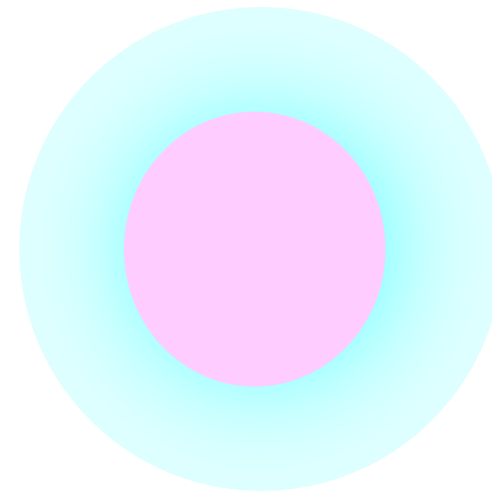
存在が推定される約8000種の核種のうち、RIBFで約4000種の不安定核が生成可能に

- **N, Zの人工操作が全領域で可能に**
第2世代施設では軽質量領域まで(全体として約3000種生成)
- **Rプロセス領域を含む原子核構造 (Sn~2MeV, N/Z ~2)**
ex ^{78}Ni 領域
- **中性子ドリップライン領域の拡大**
Oから中質量核(Caあたり)まで到達 (Sn~0MeV)

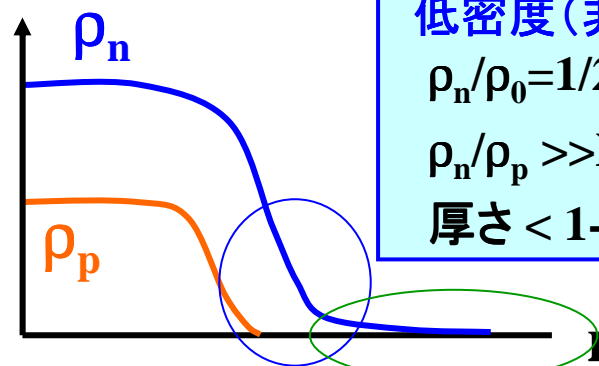
核子多体系の基本パラメータ(N, Z)を、極限領域まで人為的に制御し、探究できる新しい時代

不安定原子核の異質性

1. 大きな非対称度 高いアイソスピン、フェルミ面、空間分布、密度
2. 非飽和
3. 弱束縛



密度分布



中性子スキン

低密度(非飽和)中性子層
 $\rho_n/\rho_0 = 1/2 - 10^{-2}(?)$
 $\rho_n/\rho_p \gg N/Z$
 厚さ < 1-2fm(?)

中性子ハロー

超弱束縛中性子 $S_n \ll 1\text{MeV}$
 $\rho_n/\rho_0 < 10^{-2}(?)$ Long tail

不安定核物理と関連分野へのインパクト

1. 元素合成、超新星爆発(Rプロセス、RPプロセス)の素過程など
2. 中性子星の物理、 etc

中性子星の内殻: 低密度核物質

1. 中性子過剰核@ドリップラインの格子 + 希薄中性子流体
2. 核子パスタ(不均質構造) + 希薄中性子流体

超流動性、渦糸のダイナミクス、グリッチ、比熱、冷却、 etc

新時代の核物理は、このような核子多体系へのより直接的なプローブ

中性子星のコア: 高密度核物質

中性子流体 (+ 陽子流体)

中間子凝縮、クォーク物質?

ハドロン
物理

異質性の1例：希薄中性子系の超流動性と強結合対相関

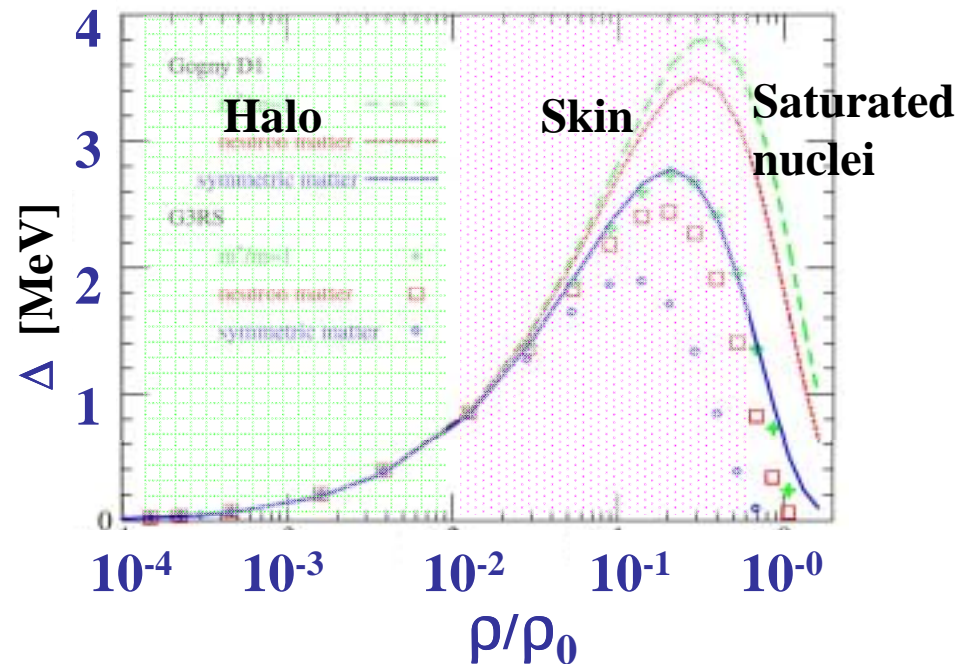
中性子星内部での核子超流動(BCS理論による推定)

Tamagaki Takatsuka PTPSuppl, 112(1993)27

希薄中性子系でのペアリングギャップ

Matsuo 2006

PRC73,044309(2006)



BCS calculation using

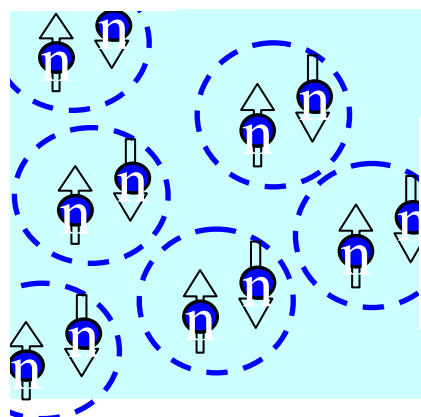
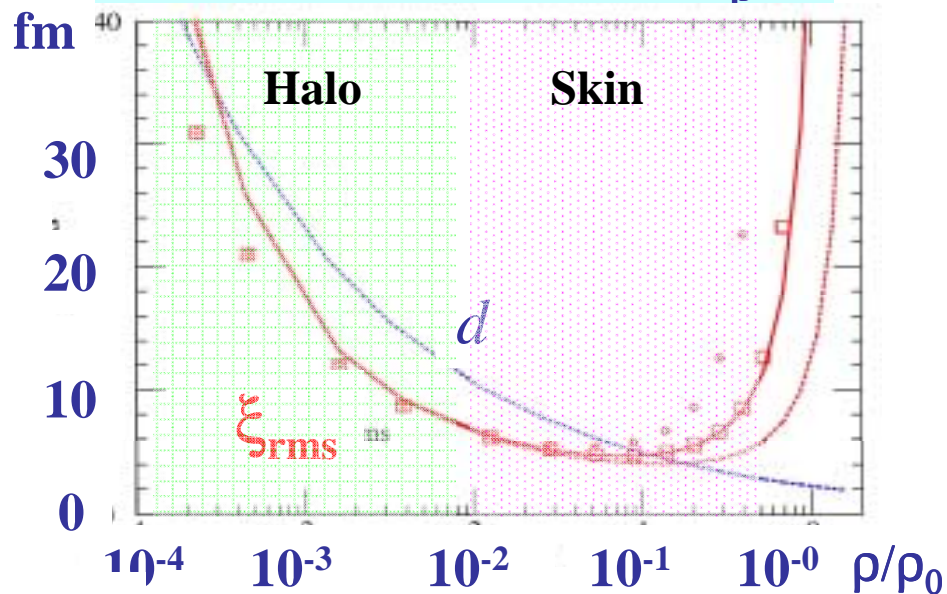
Gogny force (D1)
Bare force (G3RS)

希薄中性子系でのダイニュートロン相関

中性子クーパーペアのサイズ

r.m.s. radius (coherence length)

VS. inter-neutron distance $d = \rho^{-1/3}$

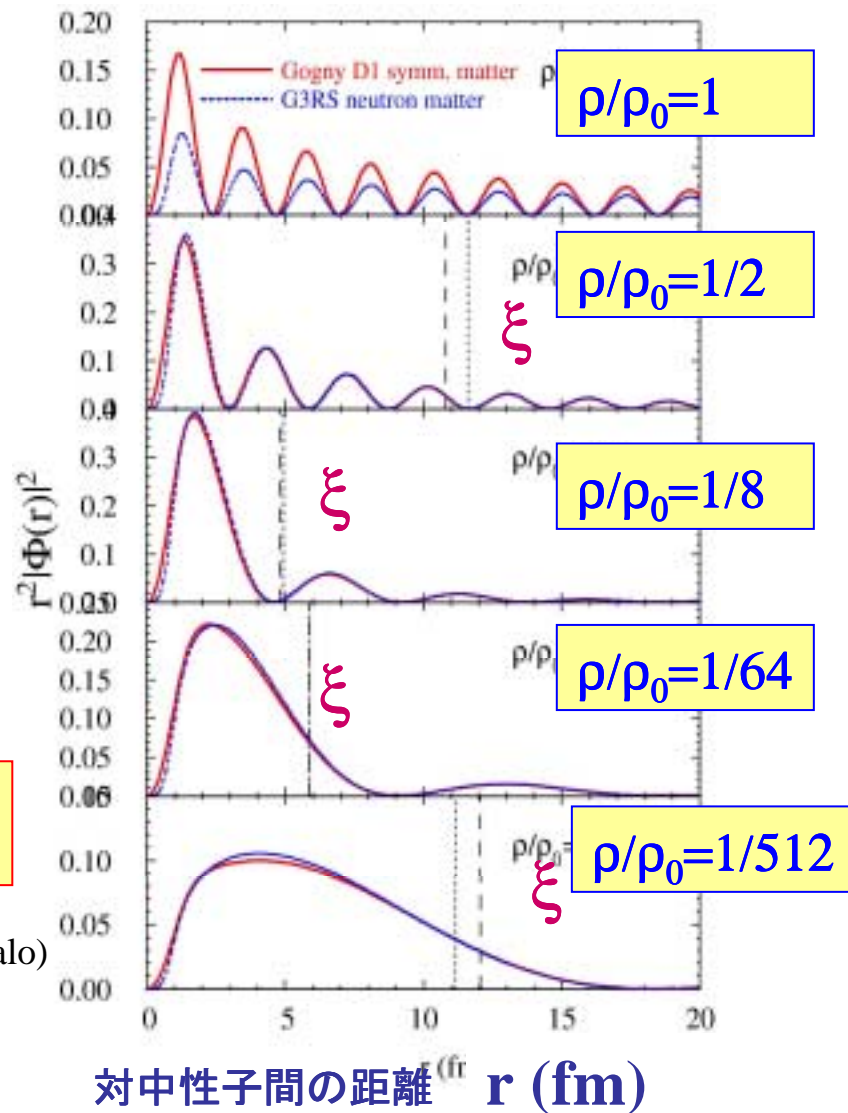


希薄領域で強いダイニュートロン相関

$\xi < d$ @ $\rho/\rho_0 = 1/10 - 1/10^{-4}$ (skin, halo)

$\xi \sim 5$ fm @ $\rho/\rho_0 = 1/5 - 1/20$ (skin)

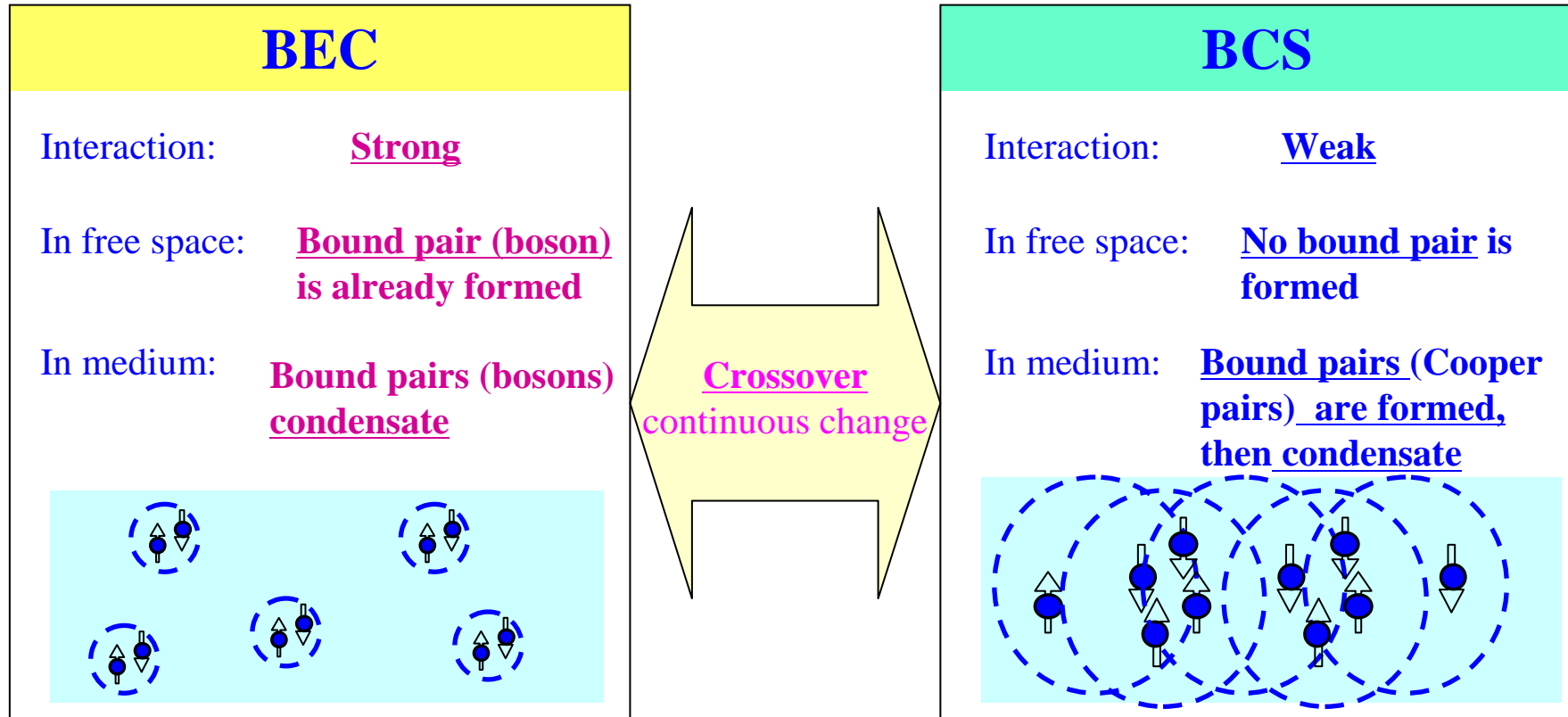
クーパーペア波動関数



対中性子間の距離 r (fm)

強結合ペアリングと BCS-BEC クロスオーバー

Leggett 1980, Nozieres & Schmitt-Rink 1985



Observed in 2004 for ultra cold Fermionic atom gas in a trap

Regal et al. PRL 92(2004)040403

ダイニュートロン相関と BCS-BECクロスオーバー

PRC73,044309(2006)

BCS-BEC クロスオーバーの指標

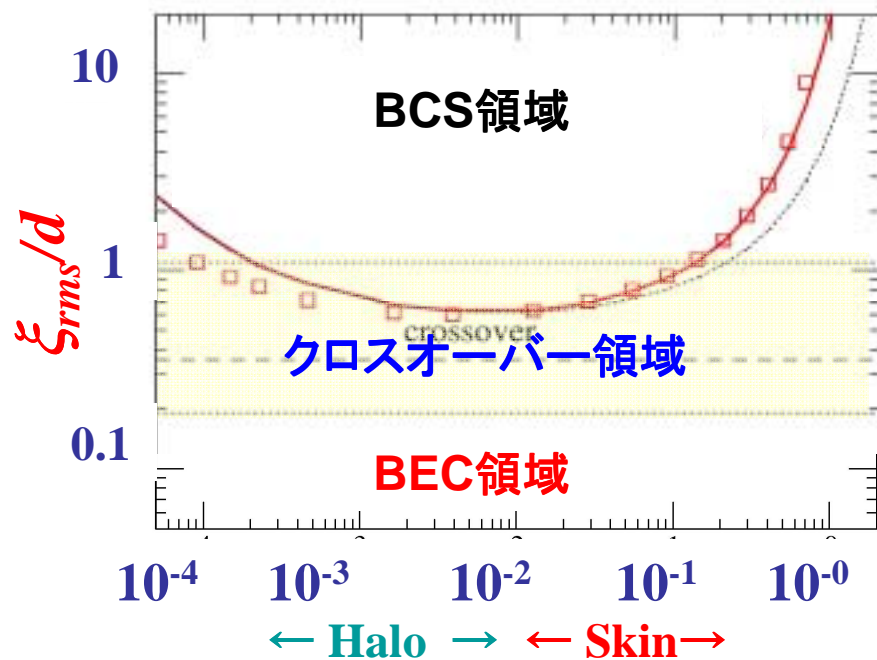
Δ/e_F : --- **0.21** (0.69) 1.33 ---
 ξ_{rms}/d : --- **1.10** (0.36) 0.19 ---
 BCS **クロスオーバー** **BEC**

Leggett 1980, Engelbrecht 1997, Marini et al 1998

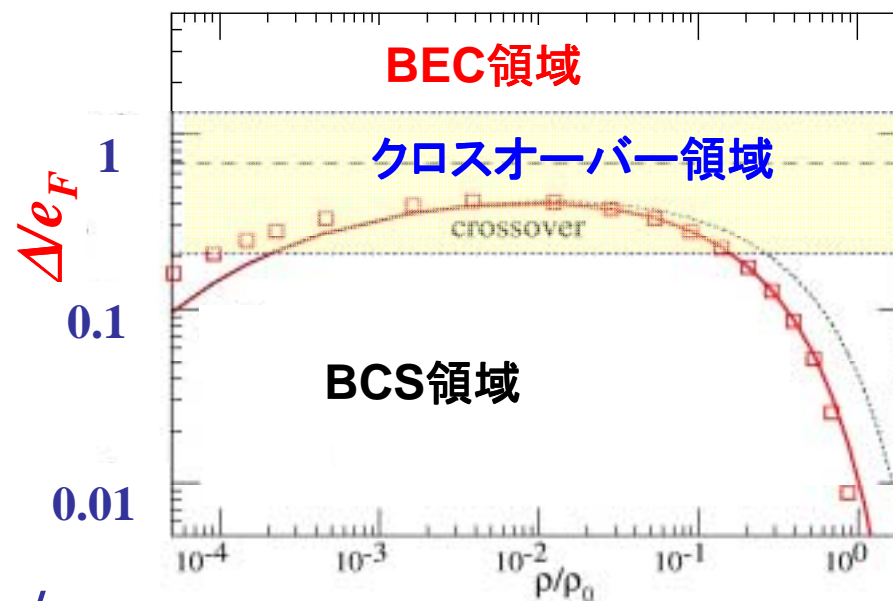
中性子スキンおよび中性子ハロー密度では、強結合対相関

BCS-BECクロスオーバー

クーパーペアサイズと平均粒子間隔の比 ξ/d

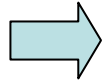


ギャップとフェルミエネルギーの比 Δ/e_F

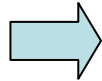


低密度での強相関性と核力の特殊性

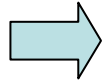
Low density



Low Fermi momentum, extension of wave function

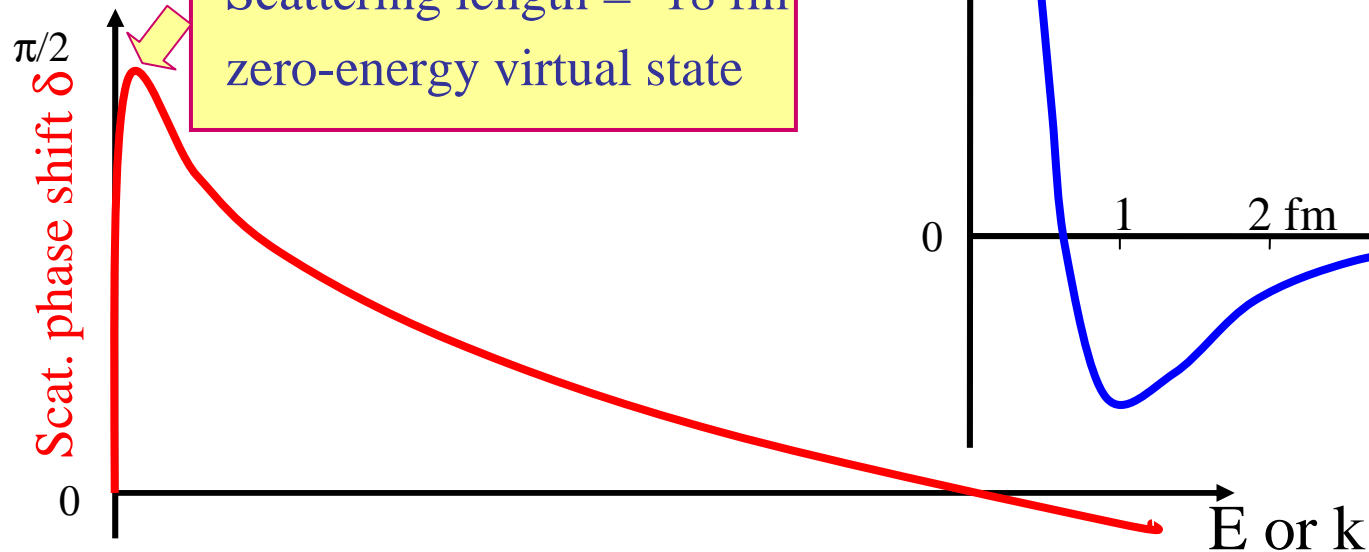


Stronger $V_{NN}(k)$

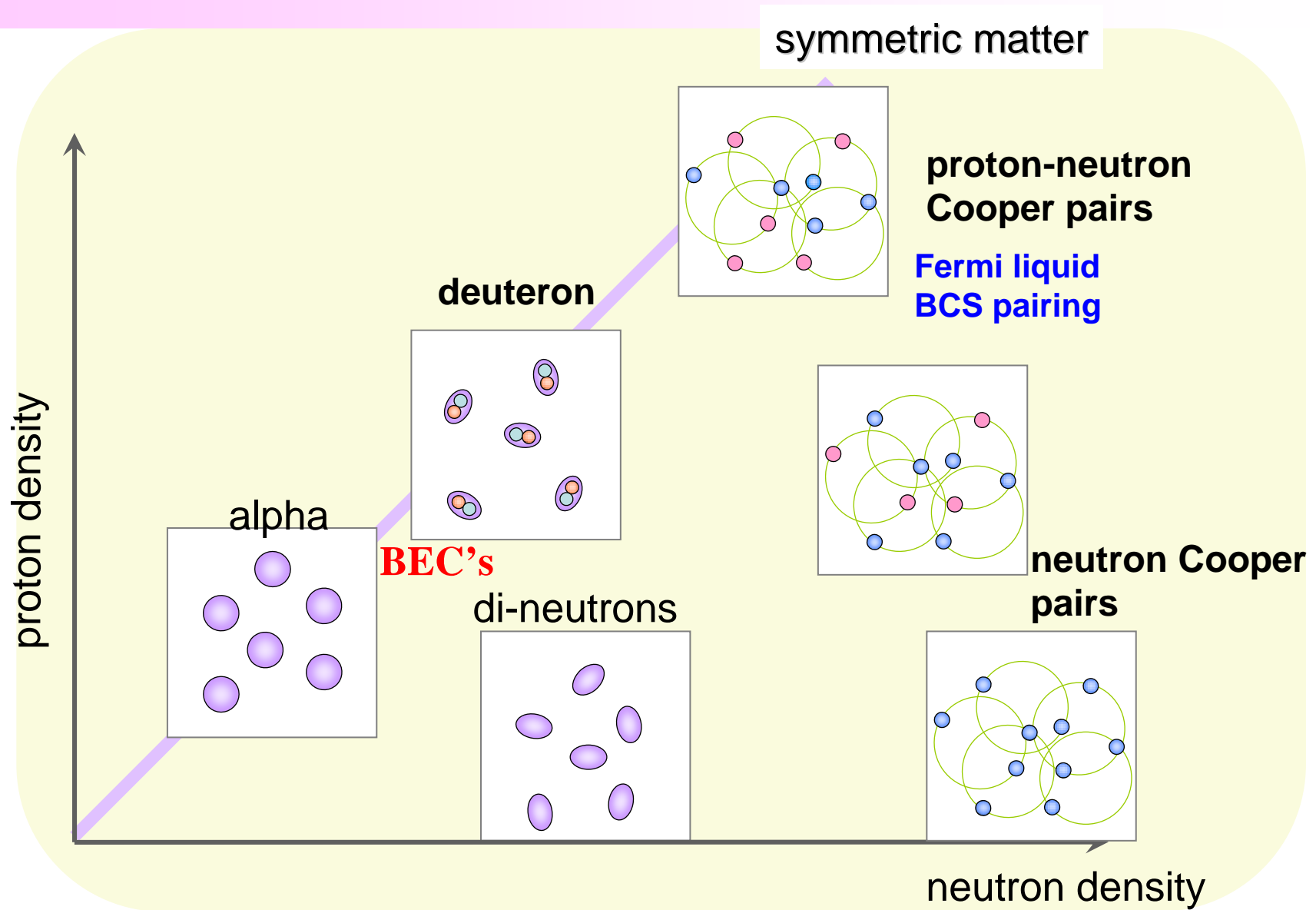


Stronger correlation

Interactions are no more weak



希薄核子系での相関と凝縮



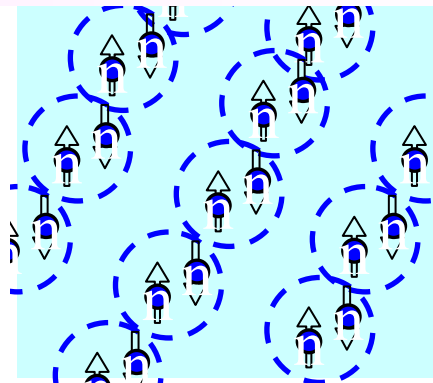
Drawing by Y. En'yo

asymmetric matter

「不安定核」にかかわる様々な可能性

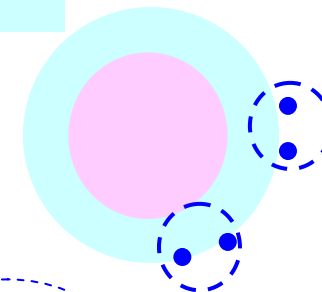
強結合対相関＝ダイニュートロン相関に関連して

- 中性超流体の集団励起 (Anderson-Bogoliubov モード、フォノンの流体力学モード)?
- ダイニュートロン型励起?

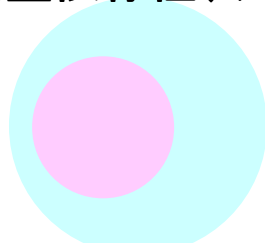


希薄中性子層 (スキン、ハロー)、弱束縛中性子に関連して

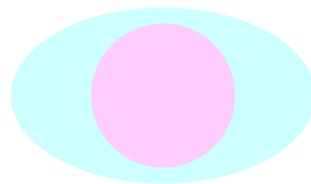
- 希薄中性子層 (過剰中性子) を新たな自由度とする集団的励起モード
- 弱束縛中性子を自由度とする励起モード



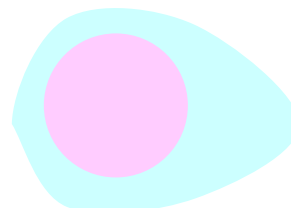
核力の運動量依存性、アイソスピン自由度の活性



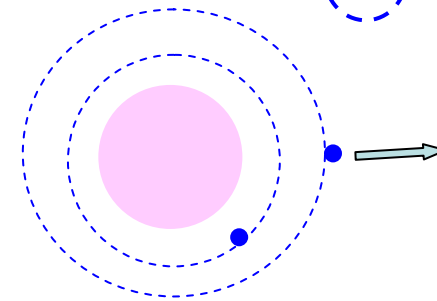
Dipole 1-



Quadrupole 2+

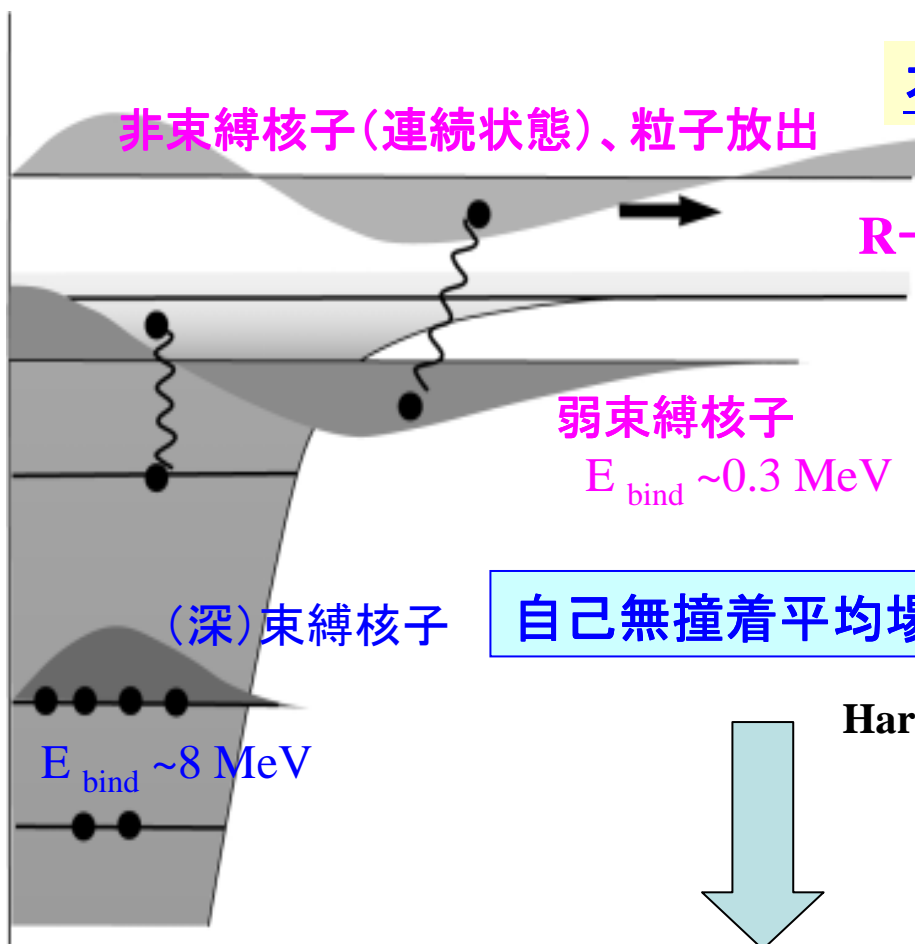


Octupole 3-



中質量、重質量領域から核物質、中性子星内殻, rプロセス、まで統一的に理解する

不安定核への量子多体論アプローチ



不安定核の特異性

- 弱束縛粒子、粒子放出
- 非局在波動関数
- 殻構造の変化
- 飽和性を大きく破る密度分布
- 強い相関、非飽和領域での有効相互作用

自己無撞着平均場理論・密度汎関数理論に基づく多体論

Hartree-Fock理論 BCS理論 (基底状態)

RPA近似、QRPA近似 (励起モード)

高次相関(モード結合、大振幅)

- 強結合理論、包括理論としての位置づけ＝密度汎関数論の立場
- 不安定核に向けて飛躍的發展中

自己無撞着平均場理論・密度汎関数理論の新展開

不安定核の特異性と超流動・対相関ともに扱える最初の理論（球形基底状態）

1984 座標表示 Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 理論

中質量核から低密度中性子物質までの密度汎関数

1998 Skyrme functional fitted to ab initio neutron matter EOS & finite nuclei

任意形状を記述するHFB理論

球形(1D)、軸対称(2D) → 鏡映対称変形(3D') → 非対称変形(3D) 1998-2001-

不安定核の励起モードの系統的記述を可能にするQRPA理論

2001 Continuum Quasiparticle RPA theory

＝座標表示HFBに基づき、弱束縛粒子、放出1+2粒子相関をも包含する線形応答理論の発見

- 強結合対相関、BEC-BCSクロスオーバーまで
- Effective Field Theory による裸核力との関係付けへの試み
 - その他のbeyond mean field の試み（GCM+量子数射影法）

座標表示Hartree-Fock-Bogoliubov理論と励起モードのための動的な拡張

一般化Bogoliubov変換で構成される多体波動関数 $|\Phi(t)\rangle$: 準粒子状態の直積

自由粒子場 $\psi(\vec{r}, t) = \sum U_i(\vec{r}, t)a_i + V_i(\vec{r}, t)a_i^+$ 核ポテンシャル中の準粒子状態 a_i^+, a_i

密度汎関数(エネルギー汎関数)

$$E[\rho(r, t), \tilde{\rho}(r, t)]$$

密度
対凝縮密度

$$\rho(\vec{r}, t) = \langle \psi^+ \psi \rangle$$

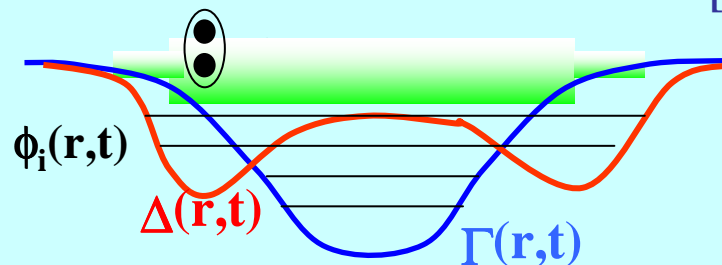
$$\tilde{\rho}(\vec{r}, t) = \langle \psi^+ \psi^+ \rangle$$

準粒子状態の波動関数

$$\phi_i(r, t) = \begin{pmatrix} U_i(r, t) \\ V_i(r, t) \end{pmatrix}$$

[静的+時間依存]変分原理 → 系の基底状態と励起を決定

[時間依存]自己無撞着場: 汎関数の1階変分



対凝縮ポテンシャル $\Delta(\vec{r}, t) = \frac{\partial E}{\partial \tilde{\rho}(\vec{r}, t)}$

HF ポテンシャル $\Gamma(\vec{r}, t) = \frac{\partial E}{\partial \rho(\vec{r}, t)}$

自己無撞着場中の中性子・陽子(準粒子)波動関数 $\phi_i(r, t)$: 座標表示HFB方程式

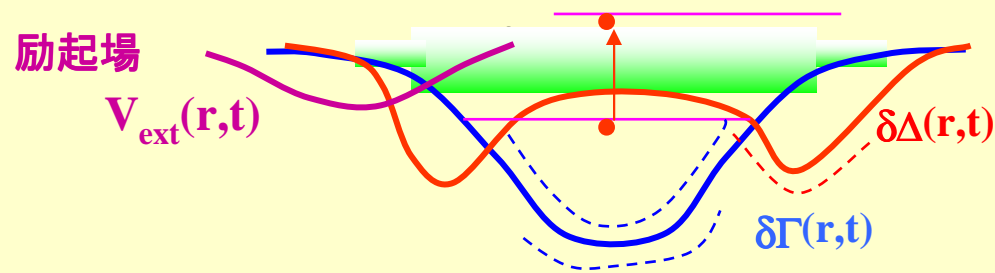
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} U_i(r, t) \\ V_i(r, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T + \Gamma(r, t) + V_{ext}(r, t) - \lambda & \Delta(r, t) \\ -\Delta^*(r, t) & -T - \Gamma(r, t) - V_{ext}(r, t) + \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_i(r, t) \\ V_i(r, t) \end{pmatrix}$$

- ◎ 座標表示により、不安定核の特質、弱束縛・連続状態の遠方漸近性が正確に取り扱われる
- ◎ 強結合対相関(BCS-BEC)も記述可能である

連続状態QRPA

M. Matsuo, Nucl. Phys. A696, 371 (2001)

M. Matsuo, Prog. Theor. Phys. Suppl. 146, 110 (2002)



揺動自己無撞着場: 汎関数2階変分

pair potential $\delta\Delta(\vec{r}, t) = \frac{\partial^2 E}{\partial \tilde{\rho}^2} \delta\tilde{\rho}(\vec{r}, t)$

HF potential $\delta\Gamma(\vec{r}, t) = \frac{\partial^2 E}{\partial \rho^2} \delta\rho(\vec{r}, t)$

相関密度応答: 摂動の足し上げ (リングダイアグラム)

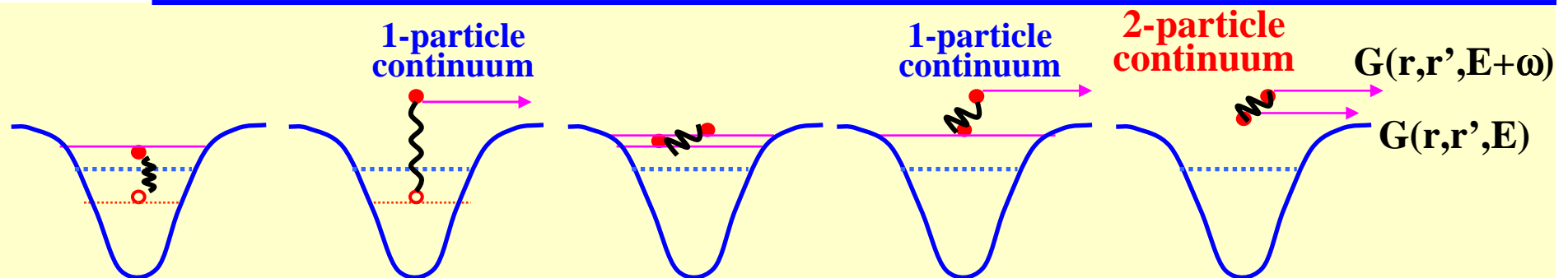


$$\delta\rho, \delta\tilde{\rho}(\vec{r}) = \frac{R_0(\omega)}{1 - R_0(\omega) \frac{\partial^2 E}{\partial \rho^2}} V_{ext}(\vec{r}')$$

密度応答関数

$$R_0(\vec{r}, \vec{r}', \omega) = \frac{1}{2\pi i} \int_c dE G(\vec{r}, \vec{r}', E) G(\vec{r}', \vec{r}, E + \omega) + b.w.$$

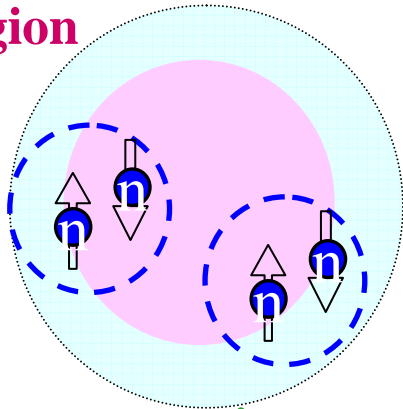
1. 座標表示準粒子グリーン関数 $G(\vec{r}, \vec{r}', E)$: $r \rightarrow \infty$ での漸近性、連続状態での外向波条件
2. 複素エネルギー積分による連続状態の足し上げ



不安定核におけるダイニュートロン相関の探究

低密度における強結合対相関は不安定核に現れるか？ その性質は？ 観測できるか？

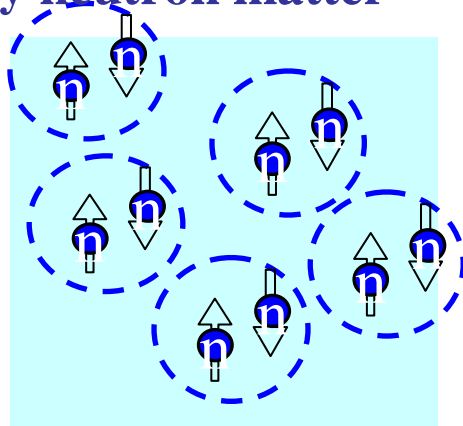
n-rich nuclei
Skin/halo region



Di-neutrons

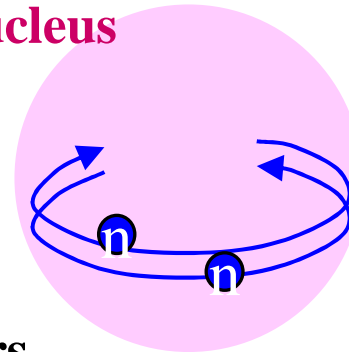
Spatially compact pair

Low density neutron matter



Strong pairing & BCS-BEC crossover

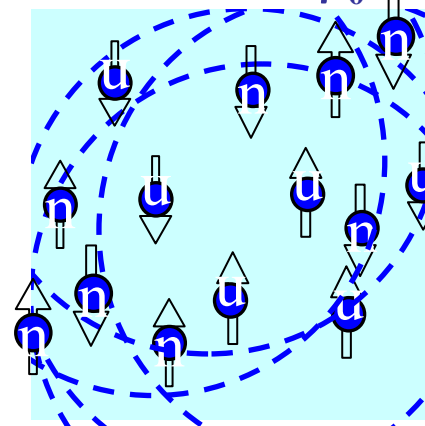
Stable nuclei
inside the nucleus



J=0 jj-pairs

Spatially extended pair

neutron matter around ρ_0



Weak coupling BCS pairing

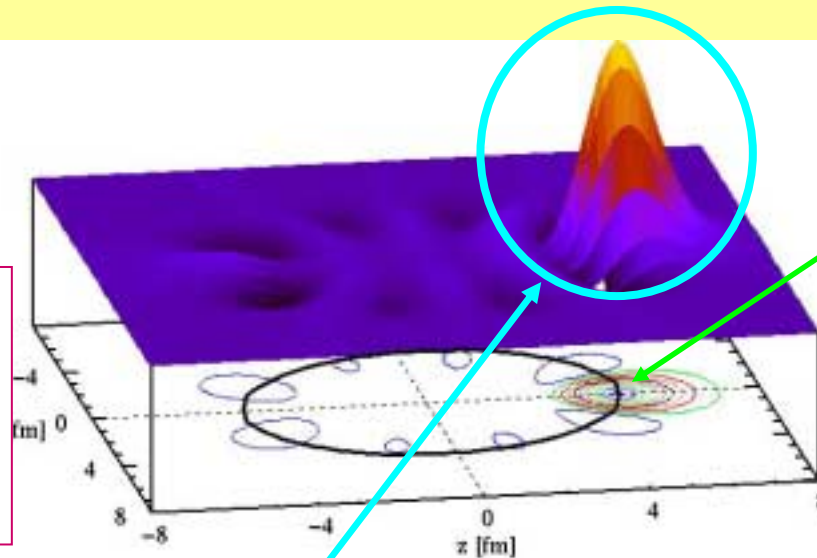
Rプロセスパス近傍核 ^{84}Ni : HFB基底状態におけるダイニュートロン相関

2体相関密度 (スピン反並行)

$$\rho_2^{corr}(\vec{r}'\uparrow; \vec{r}\downarrow) = \sum_{i \neq j} \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) \delta_{\sigma_i \uparrow} \delta(\vec{r}' - \vec{r}_j) \delta_{\sigma_j \downarrow} - \rho_1(\vec{r}'\uparrow) \rho_1(\vec{r}\downarrow)$$
$$\approx |\Psi_{pair}(\vec{r}\uparrow, \vec{r}'\downarrow)|^2 \quad \text{対波動関数}$$

^{84}Ni

Skyrme-Hartree-Fock-Bogoliubov calc. with SLy4 & mix-type DDDI



one neutron fixed at \vec{r}'

ダイニュートロン相関

Strongly correlated at short relative distances $|\mathbf{r}-\mathbf{r}'| < 2-3\text{fm}$

Di-neutron probability

relative weight for $|\mathbf{r}-\mathbf{r}'| < r_d$
 $P(r_d) = 0.27 \quad (r_d = 2)$

^{84}Ni の多重極励起(連続状態QRPA)

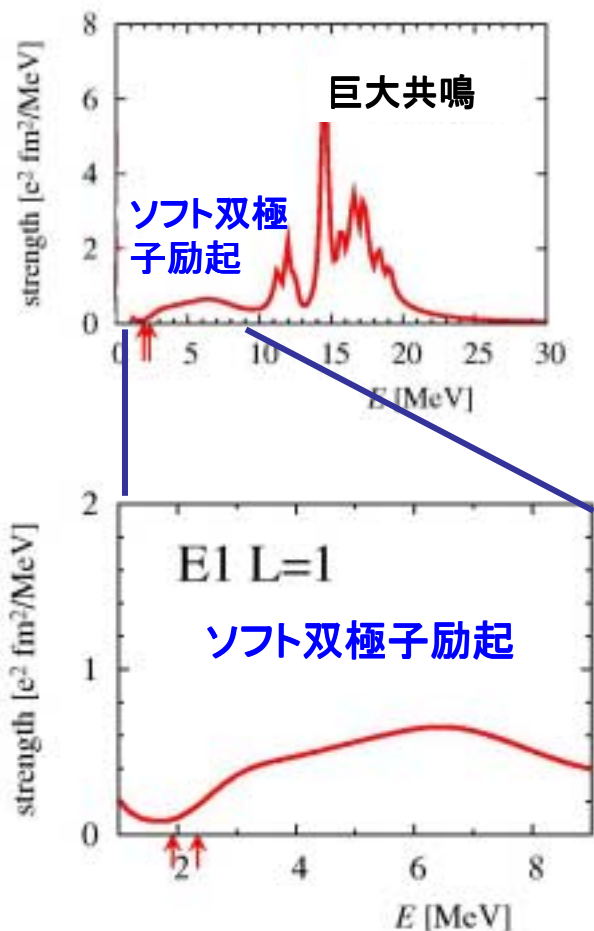
Skyrme-HFB + Continuum QRPA calc.

with SLy4 (Landau-Migdal approx) & mix-type DDDI

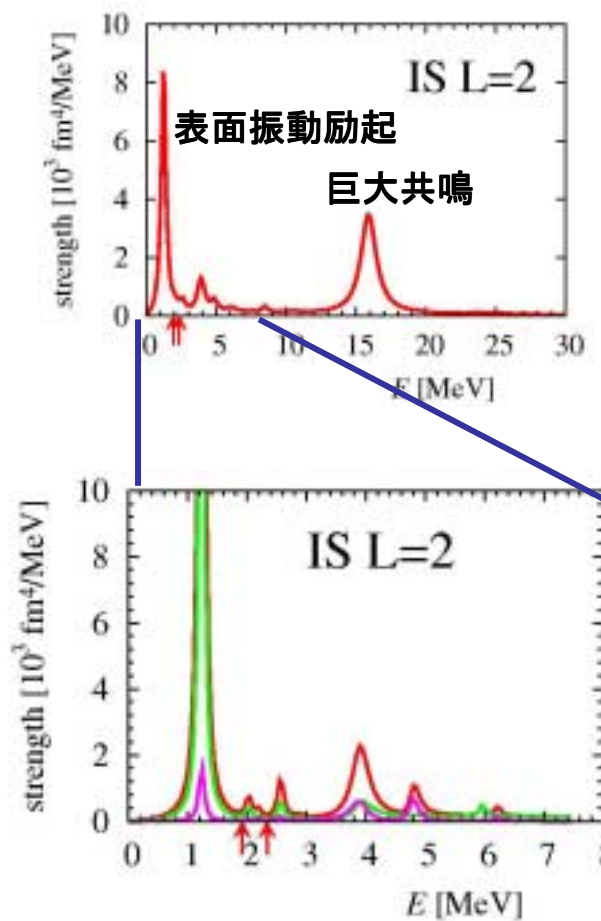
^{84}Ni

多重極場遷移強度

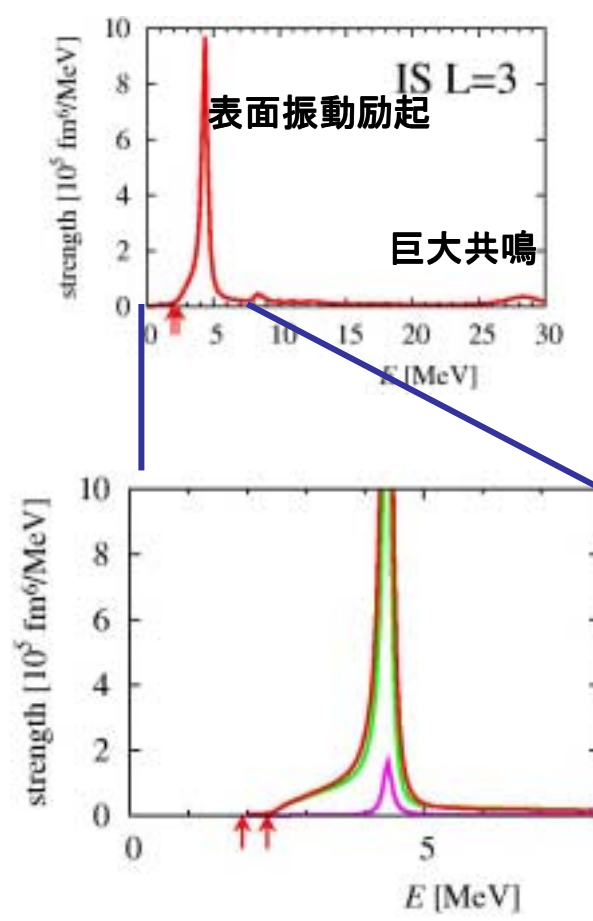
双極子応答



4重極応答

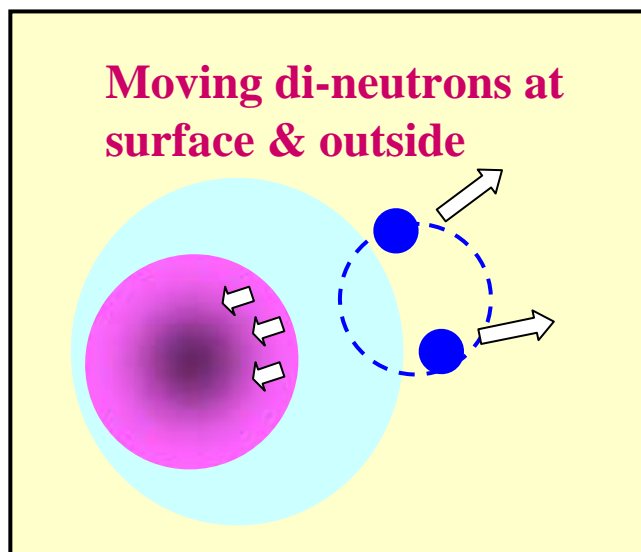
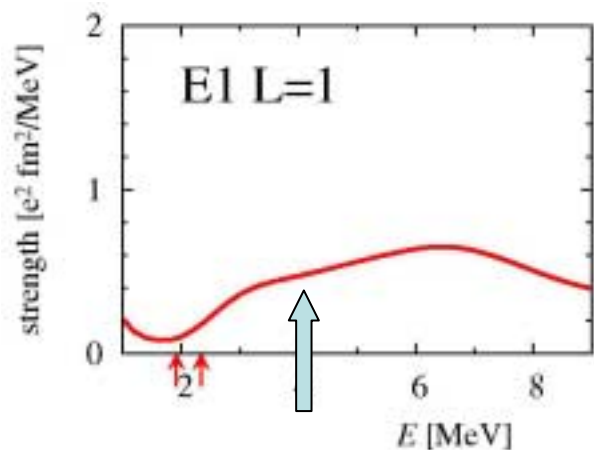


8重極応答

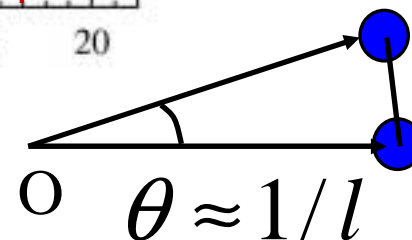
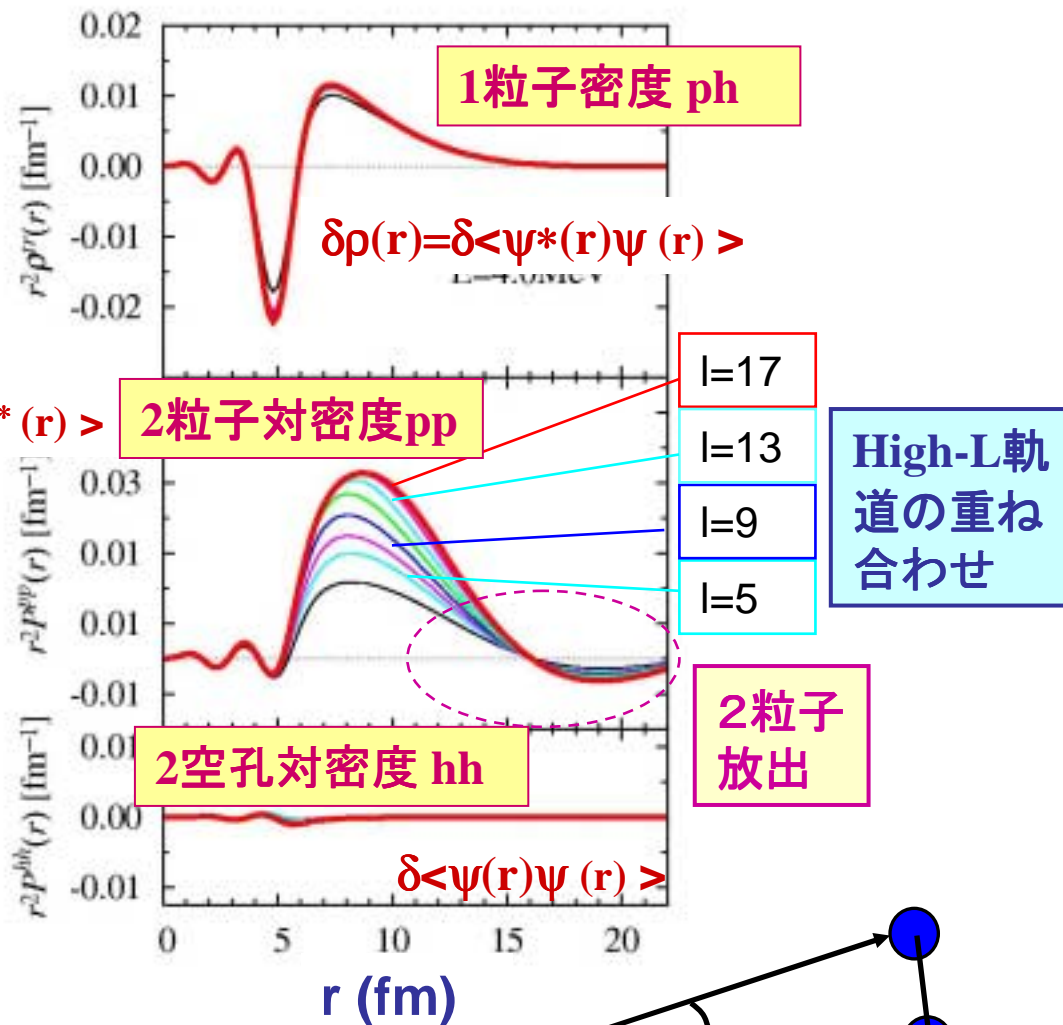


ソフト双極子励起モードにおける ダイニュートロン相関

E1遷移強度

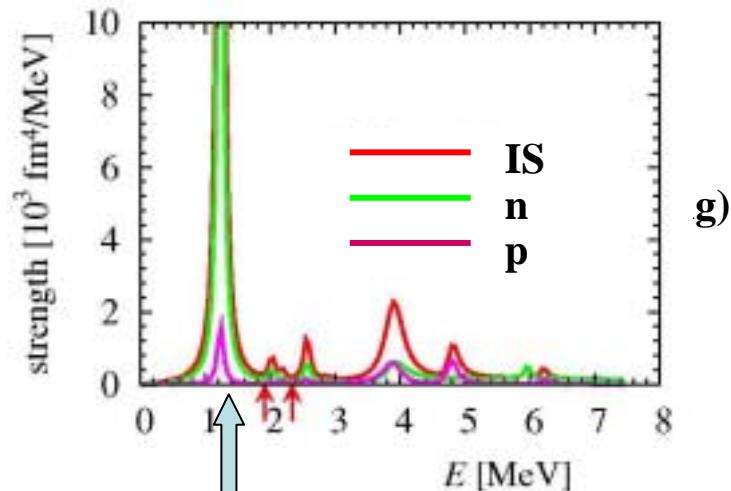


中性子遷移密度 @ E=4.0MeV



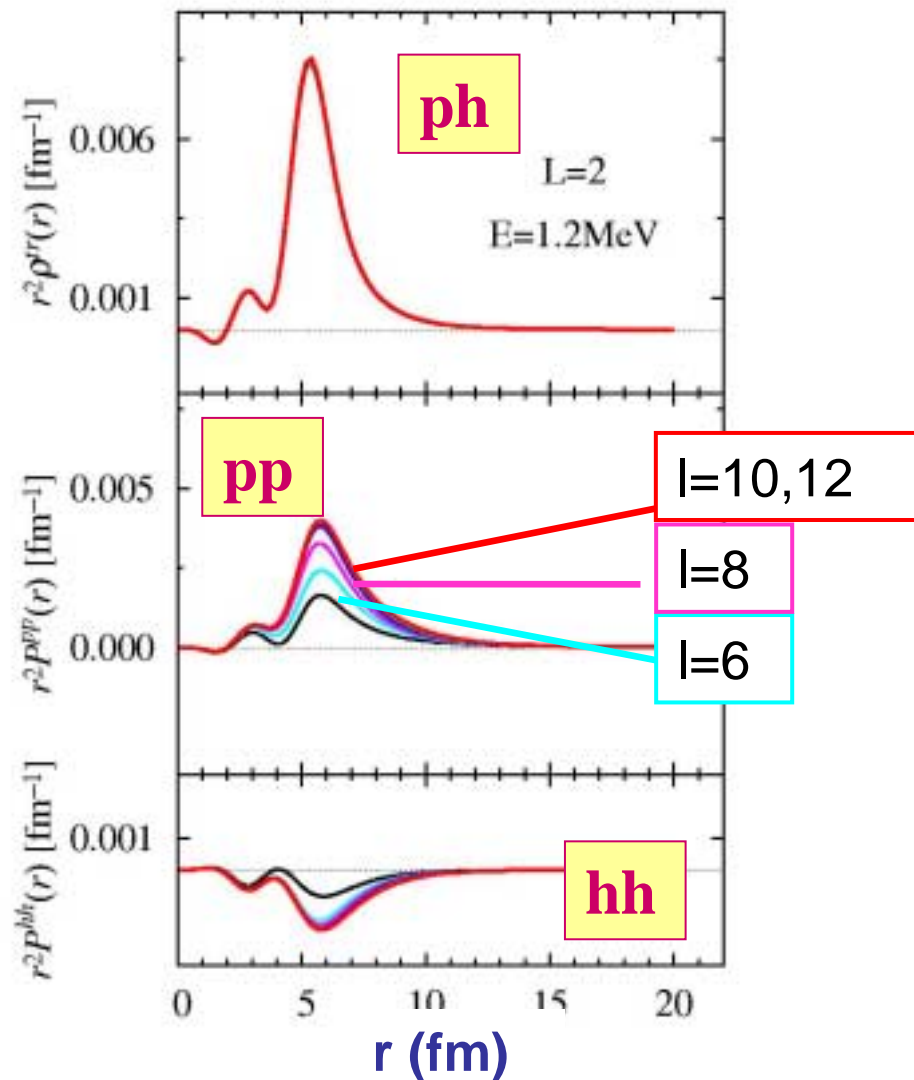
4重極応答

遷移強度



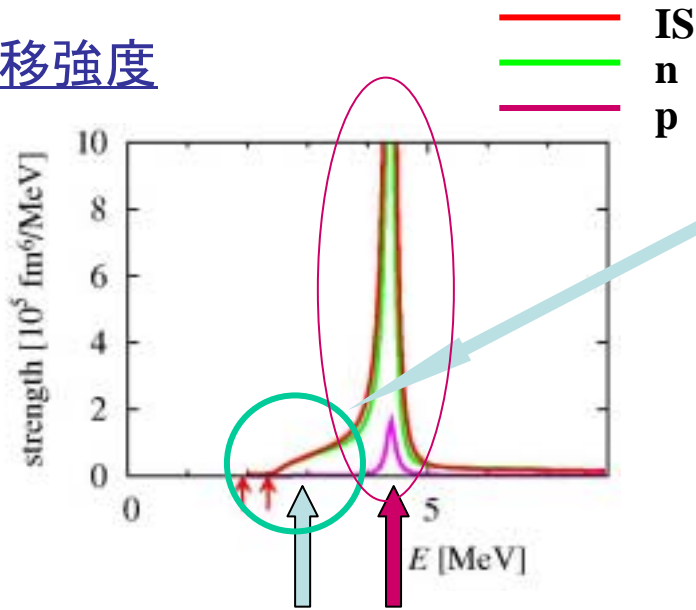
1. 顕著な低振動モード
2. 主として粒子空孔型の表面振動
3. ダイニュートロン性は強くない

中性子遷移密度 @ $E=1.2\text{MeV}$



8重極応答

遷移強度



2種モードの混在

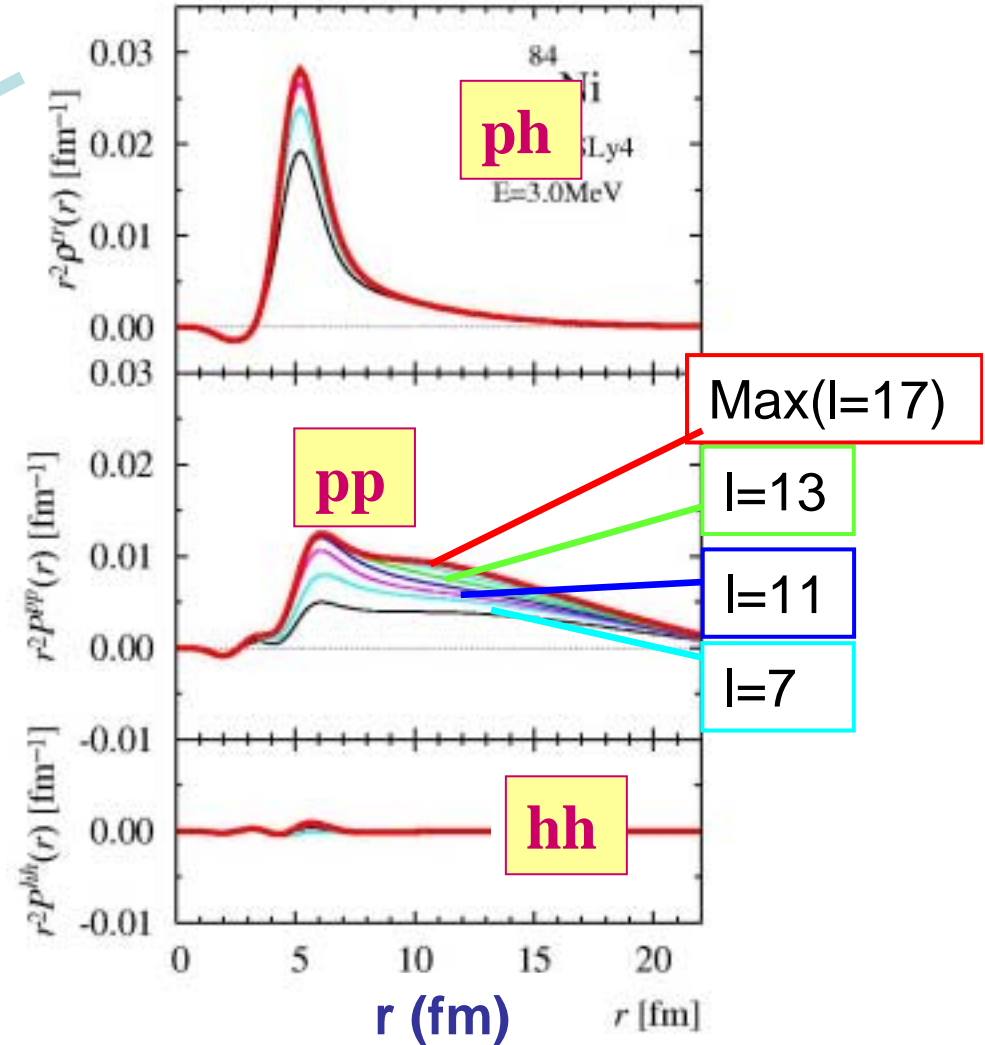
A. 粒子空孔型の表面振動

- Similar to 2_1^+
- Sharp resonance even above E_{th}

B. ダイニュートロン型の連続モード

- emission of di-neutron
- Similar to soft dipole, but the di-neutron feature is slightly weaker

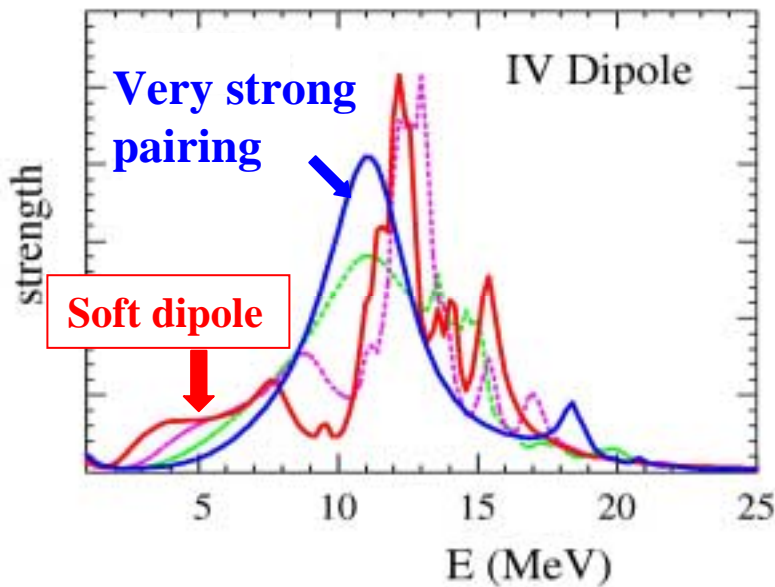
中性子遷移密度 @ E=3.0MeV



Anderson-Bogoliubovモードとソフトダイ ニュートロンモードの関連:

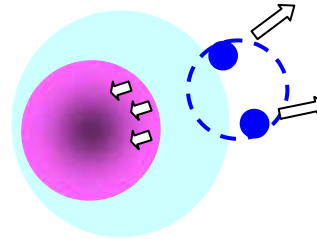
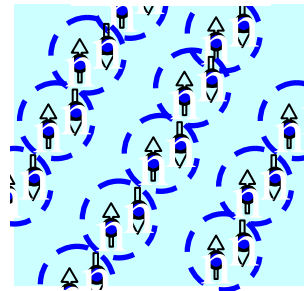
双極子応答の対相関依存性の分析

ドリップライン近傍核 ^{158}Sn

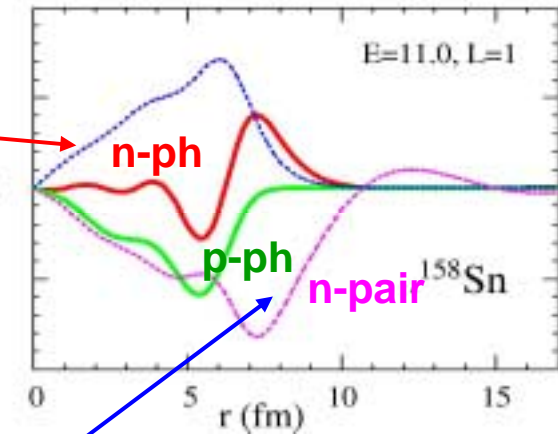


- $\Delta \sim 1-2 \text{ MeV}$
- ⋯ $\Delta \sim 3$
- ⋯ $\Delta \sim 7$
- $\Delta \sim 15$

Anderson-Bogoliubov mode

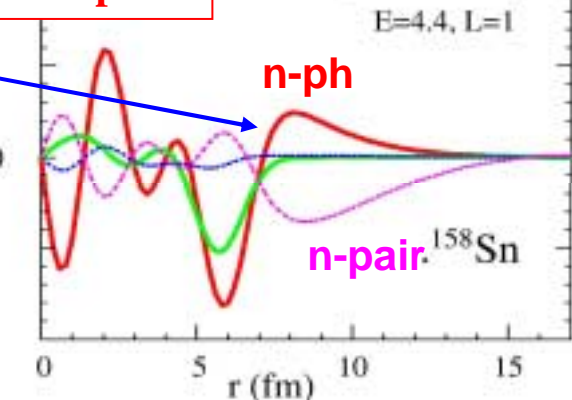


Very strong pairing $\Delta \sim 15 \text{ MeV}$



Normal pairing $\Delta \sim 1-2 \text{ MeV}$

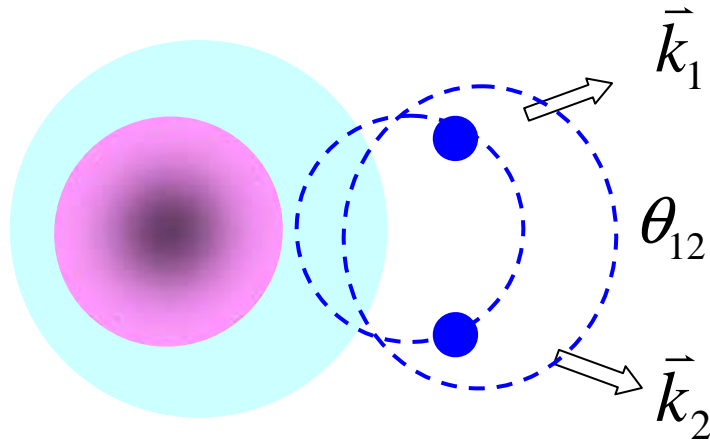
Soft dipole



弱束縛の強結合ペアにと
もなう新しい表面モード?

今後の展開1: ダイニュートロン型強結合対相関の探究

ダイニュートロン相関を直接プローブするために



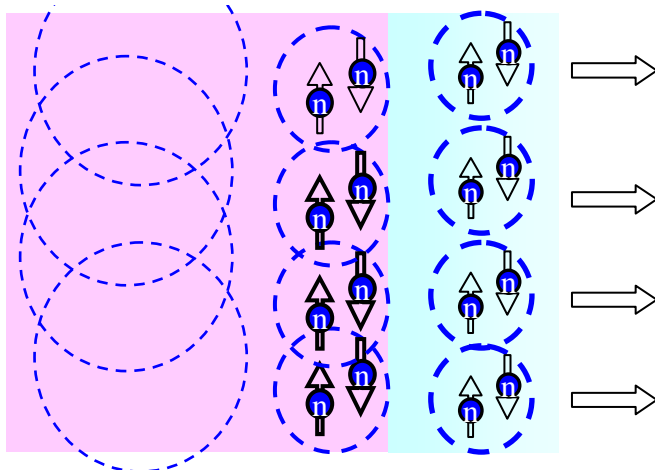
観測量1: 放出2中性子相関

観測量2: 2中性子移行反応

理研RARF/RIBF実験

Nakamura et al. 2006 for ^{11}Li
(SAMURAI)

非対称マター表面のダイニュートロン励起?

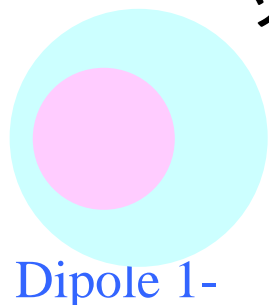


直接分解反応における
2中性子運動量相関

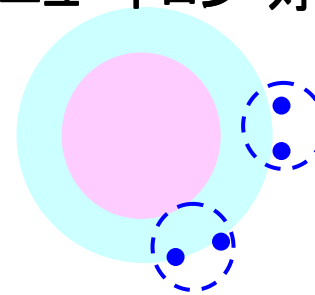
今後の展開2: 中重質量領域不安定核に出現する新しい励起モードの探究

新たな自由度にともなう集団・非集団的励起モード

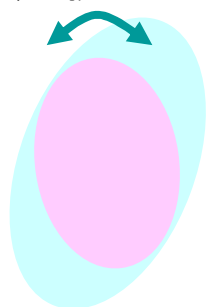
ソフトモード、ピグミー共鳴、巨大共鳴



ダイニュートロン・対相関

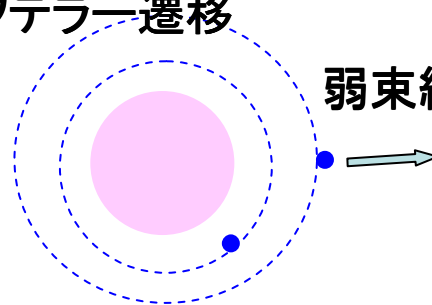
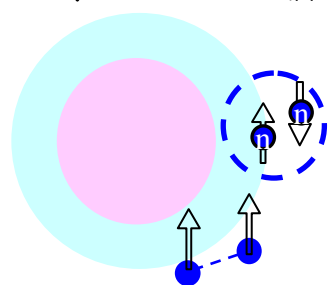


変形不安定核



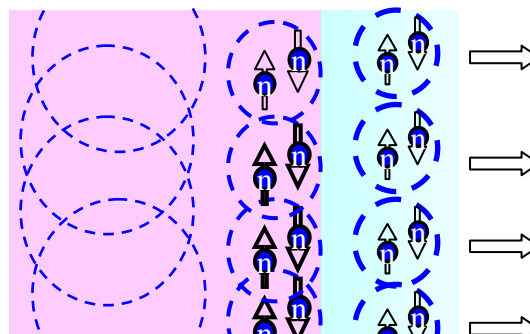
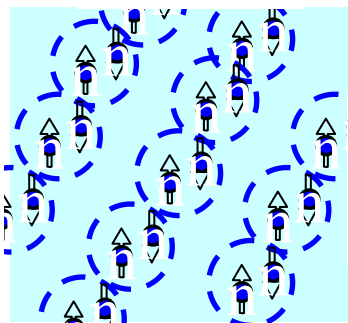
ソフトシザース、 スピン励起 ガモフテラー遷移

M1 1+

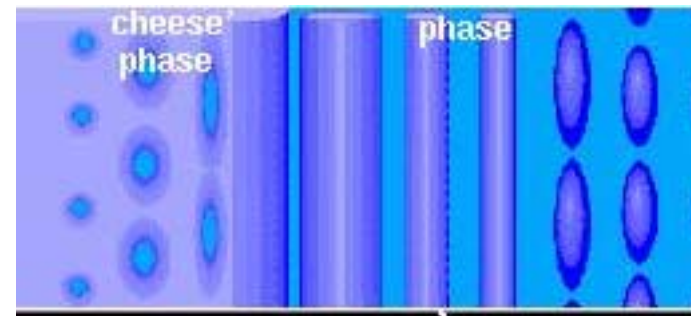


弱束縛

(半)無限系



不均質系



今後の展開3: “座標表示HFB理論+連続状態QRPA理論”を軸とする量子多体論の探究

