

# ダイフェルミオン相関 :2電子系からダイニュートロンまで

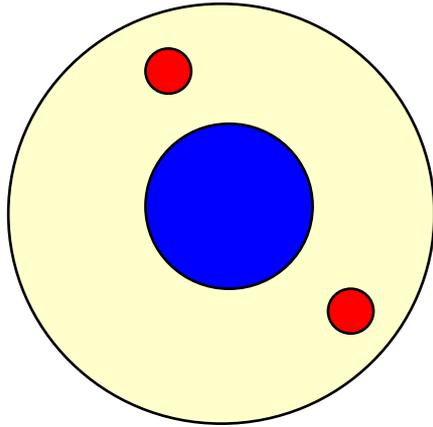
萩野浩一  
京都大学大学院理学研究科



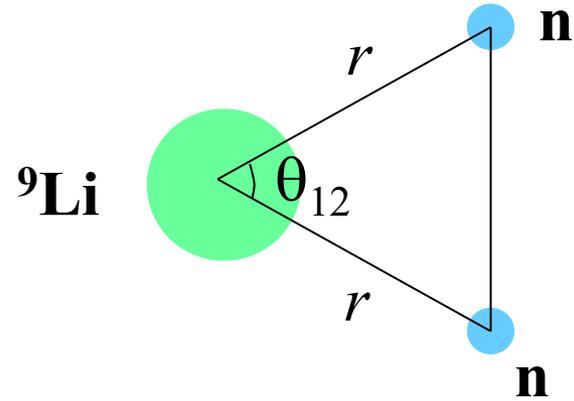
ダイフェルミオン相関:  $nn$ ,  $pp$ ,  $np$ ,  $\Lambda\Lambda$ ,  $ee$  における相関と反相関

1. ダイニュートロンの起源: パリティの重要性
2. 引力相互作用 vs 斥力相互作用
3. どのようにプローブするか?
4. まとめと今後

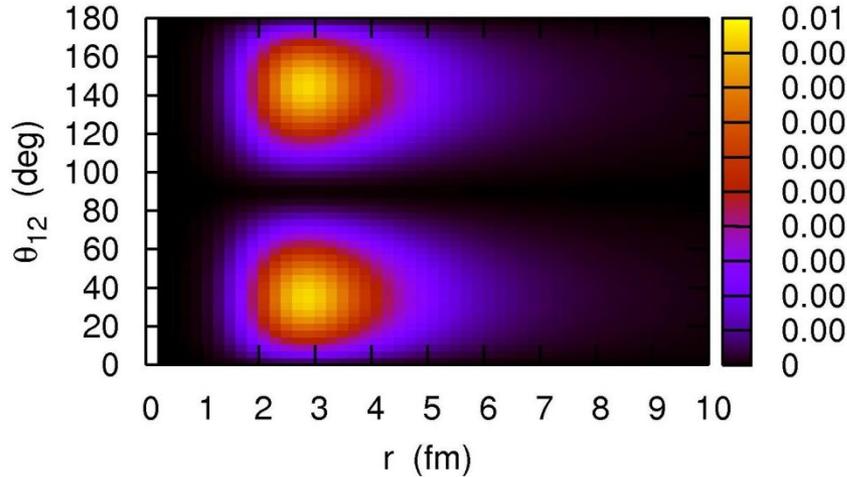
# ダイニュートロン相関



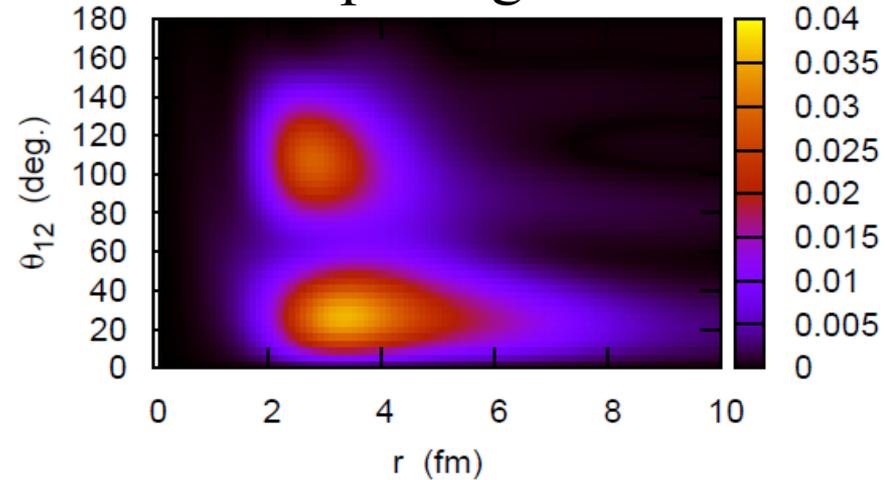
$^{11}\text{Li}$



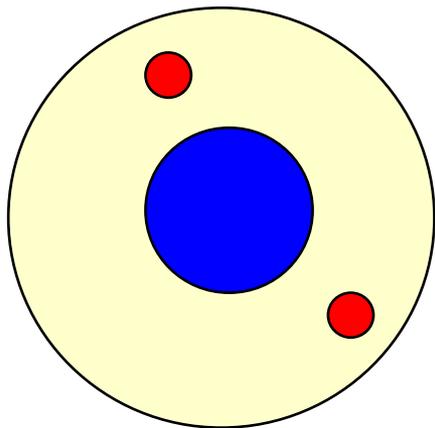
Without pairing  $[1p_{1/2}]^2$



With pairing

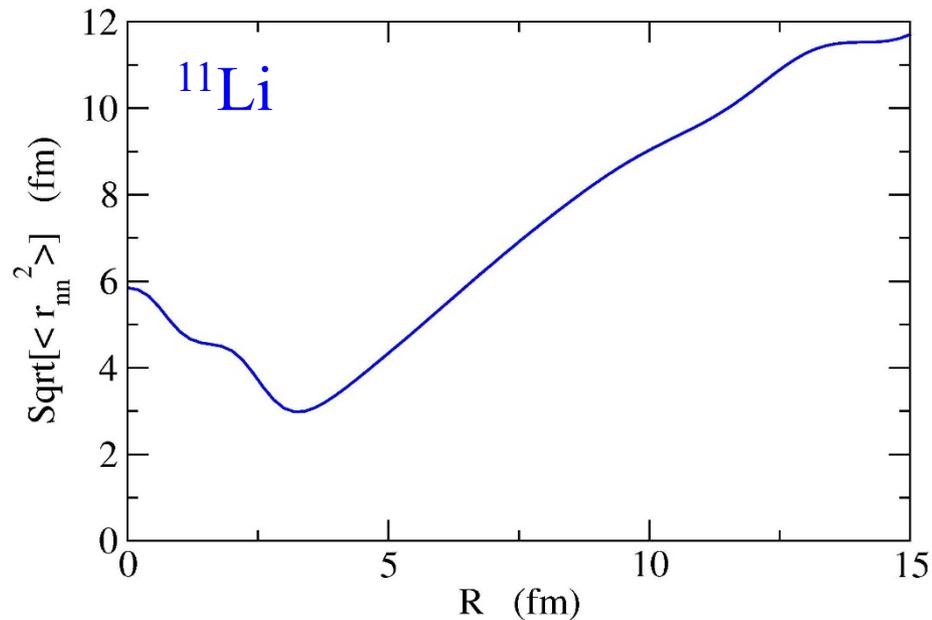
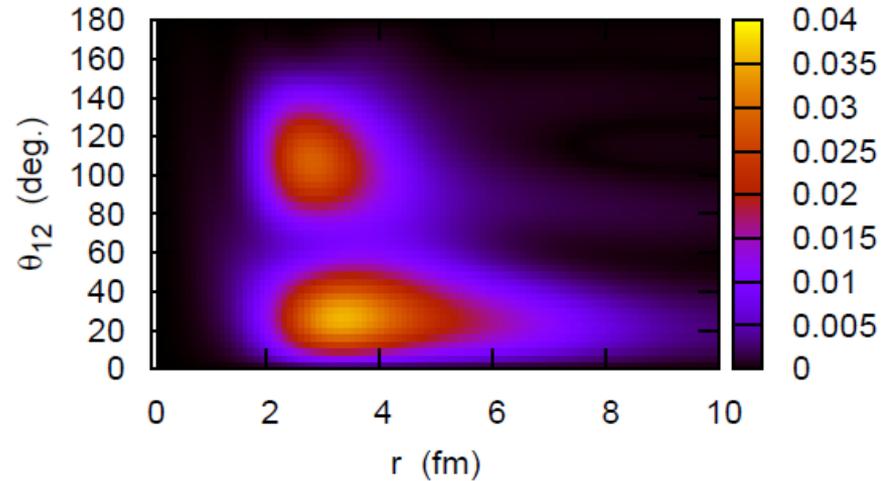
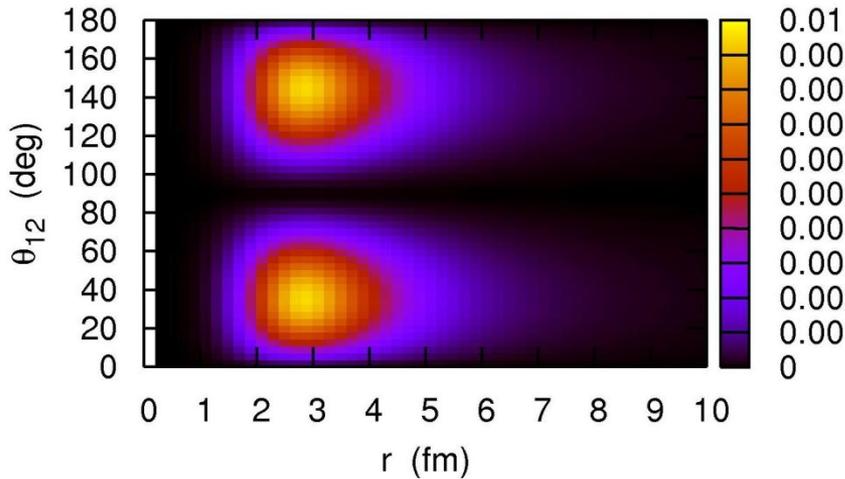


# ダイニュートロン相関



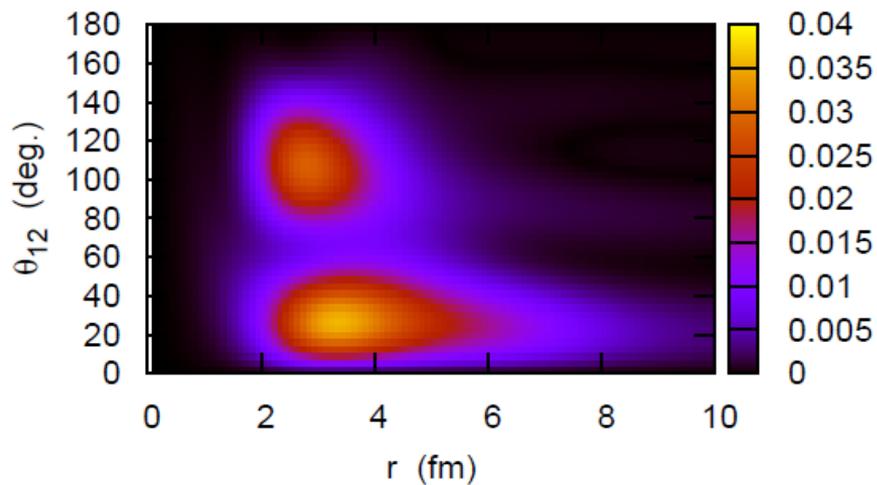
$^{11}\text{Li}$

Without pairing  $[1p_{1/2}]^2$

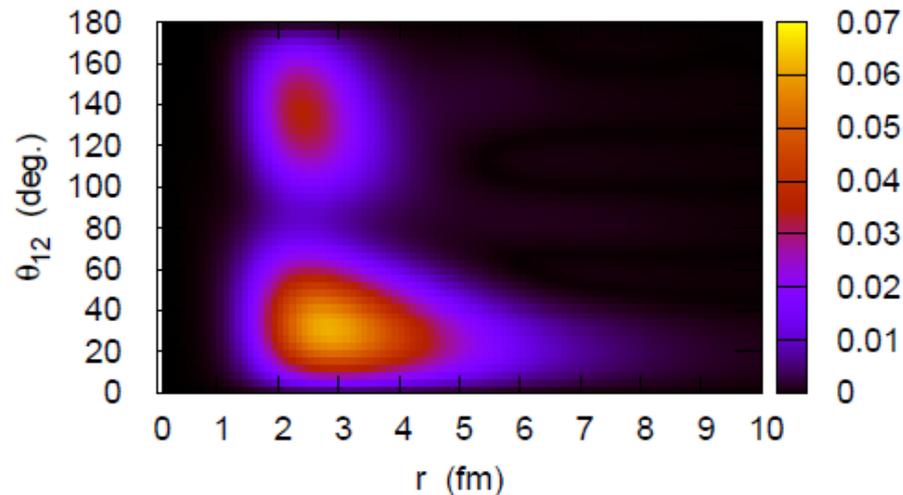


K.H., H. Sagawa, J. Carbonell, and P. Schuck,  
PRL99('07)022506

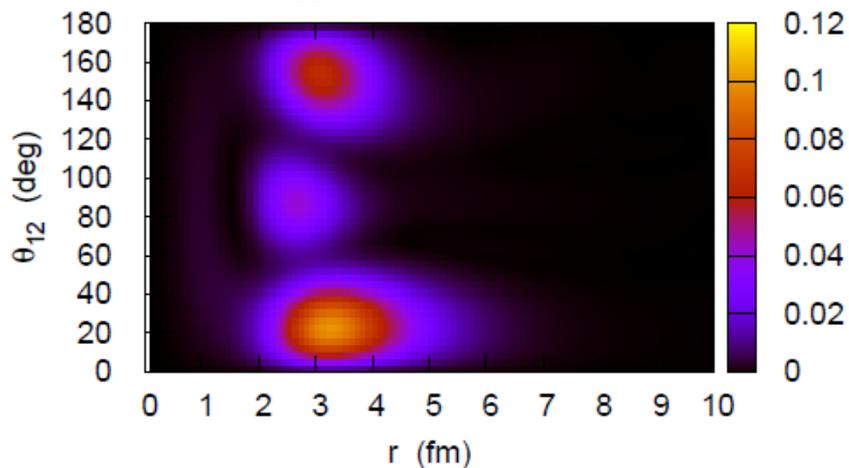
$^{11}\text{Li}$  ( $S_{2n} = 0.376$  MeV)



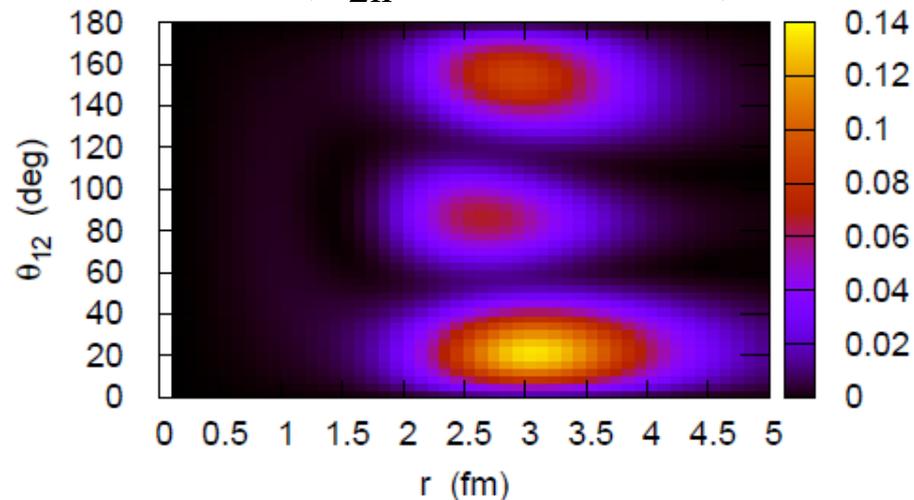
$^6\text{He}$  ( $S_{2n} = 0.978$  MeV)



$^{16}\text{C}$  ( $S_{2n} = 5.47$  MeV)

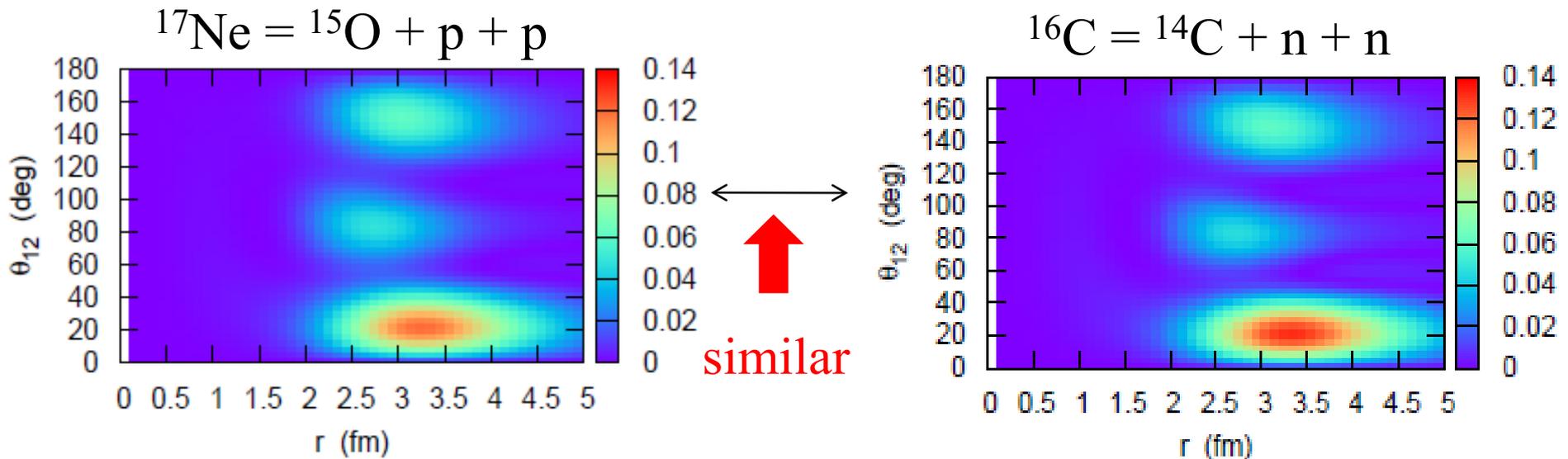
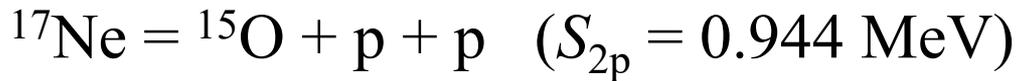


$^{18}\text{O}$  ( $S_{2n} = 12.2$  MeV)



「閾値測」とはあまり関係がなさそう

## cf. ダイ・プロトン相関



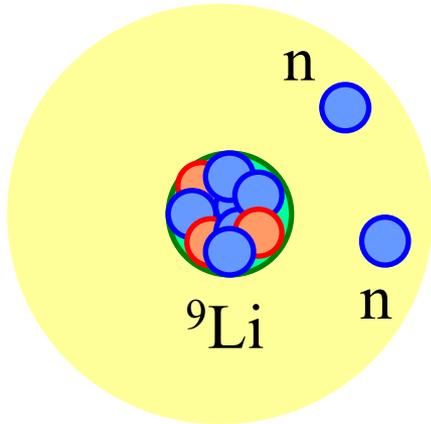
T. Oishi, K. Hagino, and H. Sagawa,  
PRC82, 024315 (2010).

## cf. ダイニュートロンとダイクォーク

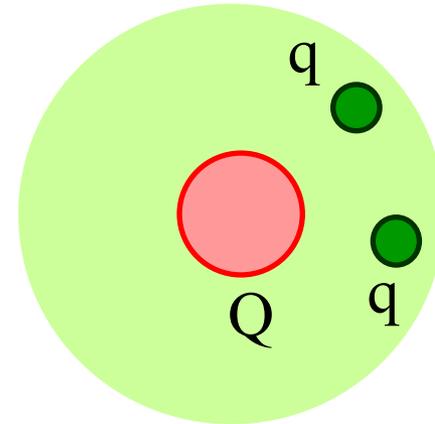
### ➤ 3体系の物理

$${}^6\text{He} = {}^4\text{He} + n + n$$

$${}^{11}\text{Li} = {}^9\text{Li} + n + n$$



チャーム・クォークを  
含んだバリオン

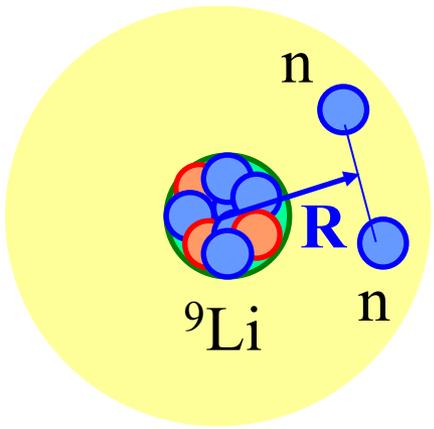


cf. ダイニュートロンとダイクォーク

➤ 3体系の物理

$${}^6\text{He} = {}^4\text{He} + n + n$$

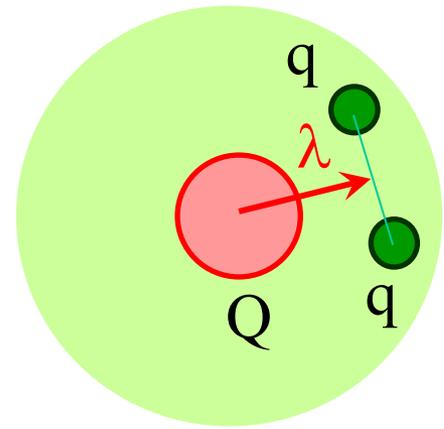
$${}^{11}\text{Li} = {}^9\text{Li} + n + n$$



$$\hat{T}_{E1} \propto R$$

E1励起

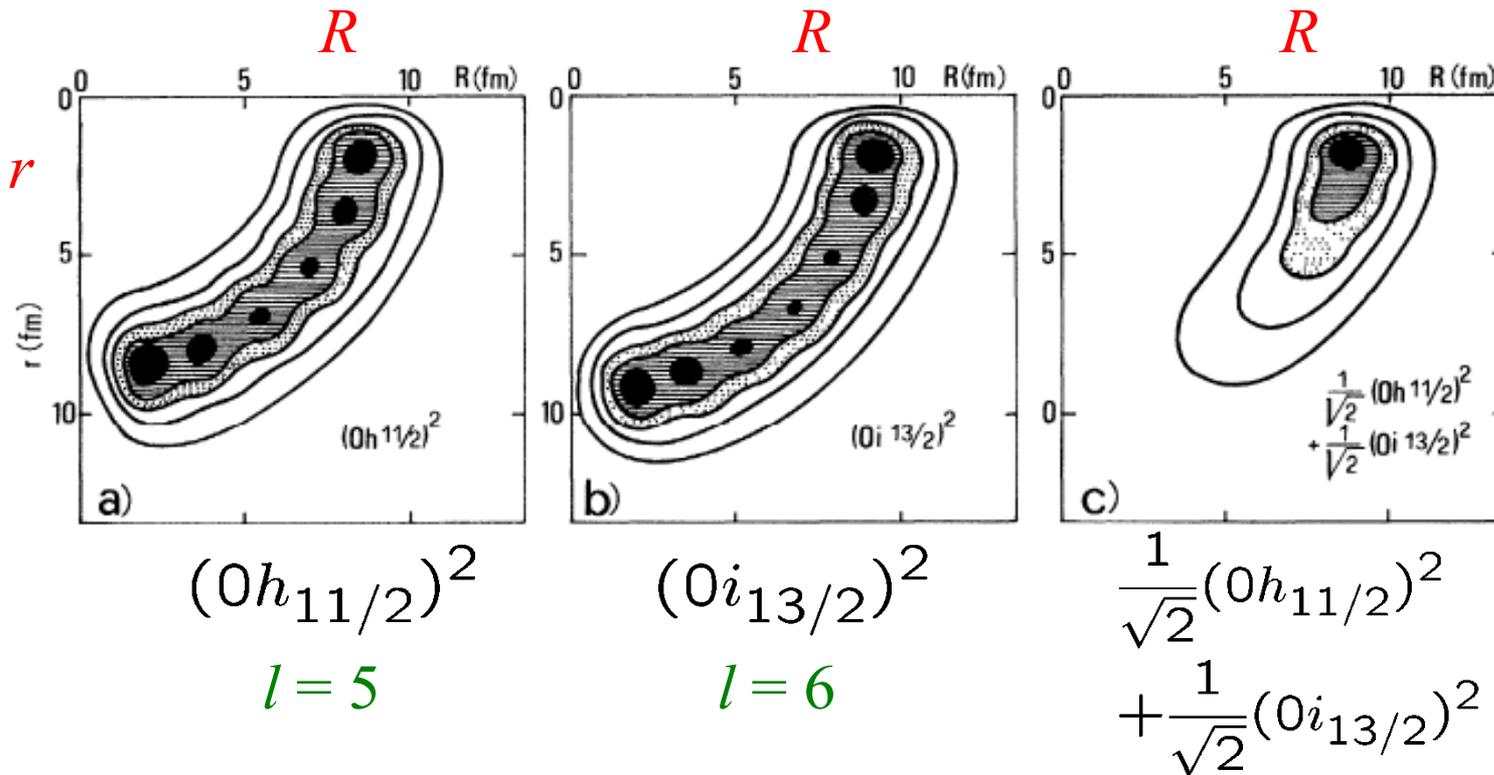
チャーム・クォークを  
含んだバリオン



$\lambda$ モード

# ダイニュートロン相関の起源: 異なるパリティからなる配位の混合

$$|\Psi\rangle = \sum_{j,l} C_{jl} |[jl]^2\rangle$$



F. Catara, A. Insolia, E. Maglione,  
and A. Vitturi, PRC29('84)1091

## ダイニュートロン相関の起源：異なるパリティからなる配位の混合

$$|\Psi\rangle = \sum_{j,l} C_{jl} |[jl]^2\rangle$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi(\mathbf{r}, \mathbf{r}) = [C_e \phi_e(\mathbf{r})^2 + C_o \phi_o(\mathbf{r})^2] |S=0\rangle \\ \Psi(\mathbf{r}, -\mathbf{r}) = [C_e \phi_e(\mathbf{r})^2 - C_o \phi_o(\mathbf{r})^2] |S=0\rangle \end{array} \right.$$

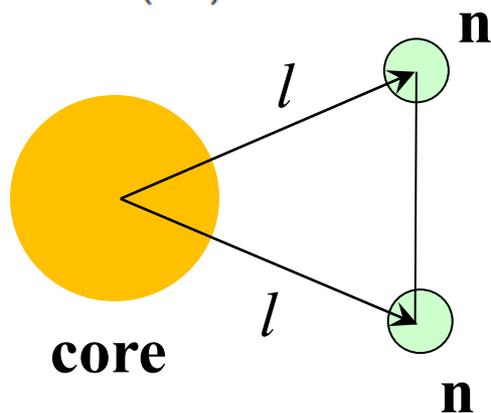
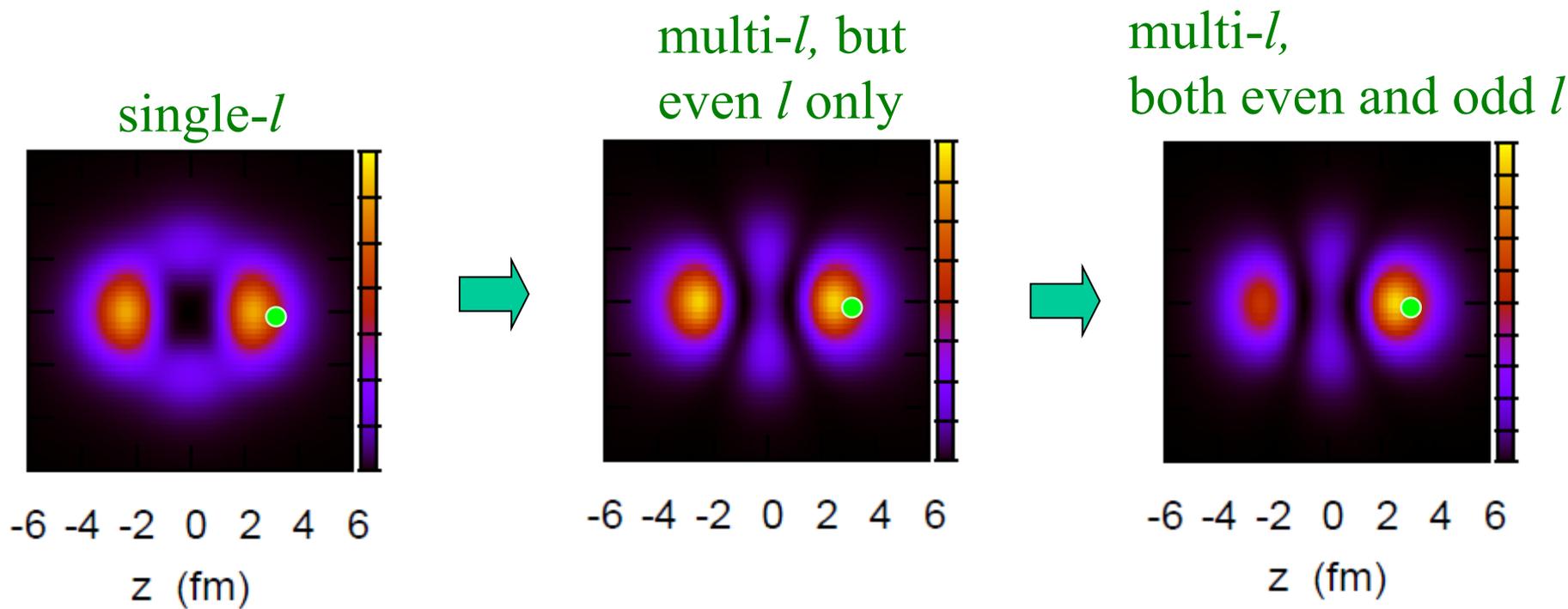
$$\phi_e(-\mathbf{r}) = \phi_e(\mathbf{r})$$

$$\phi_o(-\mathbf{r}) = -\phi_o(\mathbf{r})$$

→もし  $C_e$  と  $C_o$  が同符号なら  $r' = r$  が増幅され  
ダイニュートロン相関

# ダイニュートロン相関の起源：異なるパリティからなる配位の混合

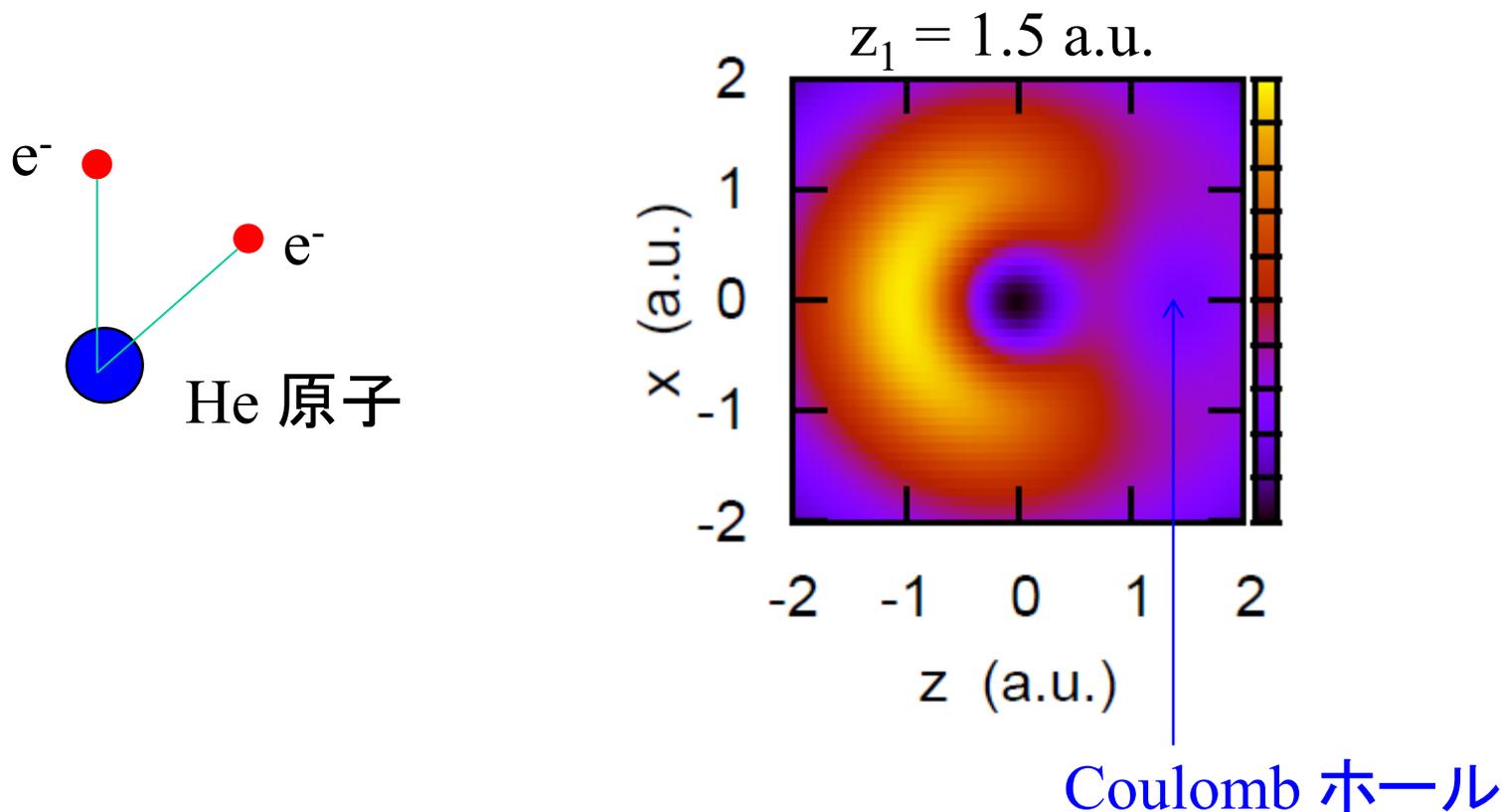
$$^{18}\text{O} = ^{16}\text{O} + \text{n} + \text{n} \rightarrow \rho_2(\mathbf{r}) = |\Psi_{\text{g.s.}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')|_{\mathbf{r}'=z_0}^2$$



K. Hagino, H. Sagawa, P. Schuck,  
J. of Phys. G 37, 064040 (2010)

# ダイニュートロン相関の起源：異なるパリティからなる配位の混合

相互作用が斥力の場合： He原子(電子間はクーロン斥力)

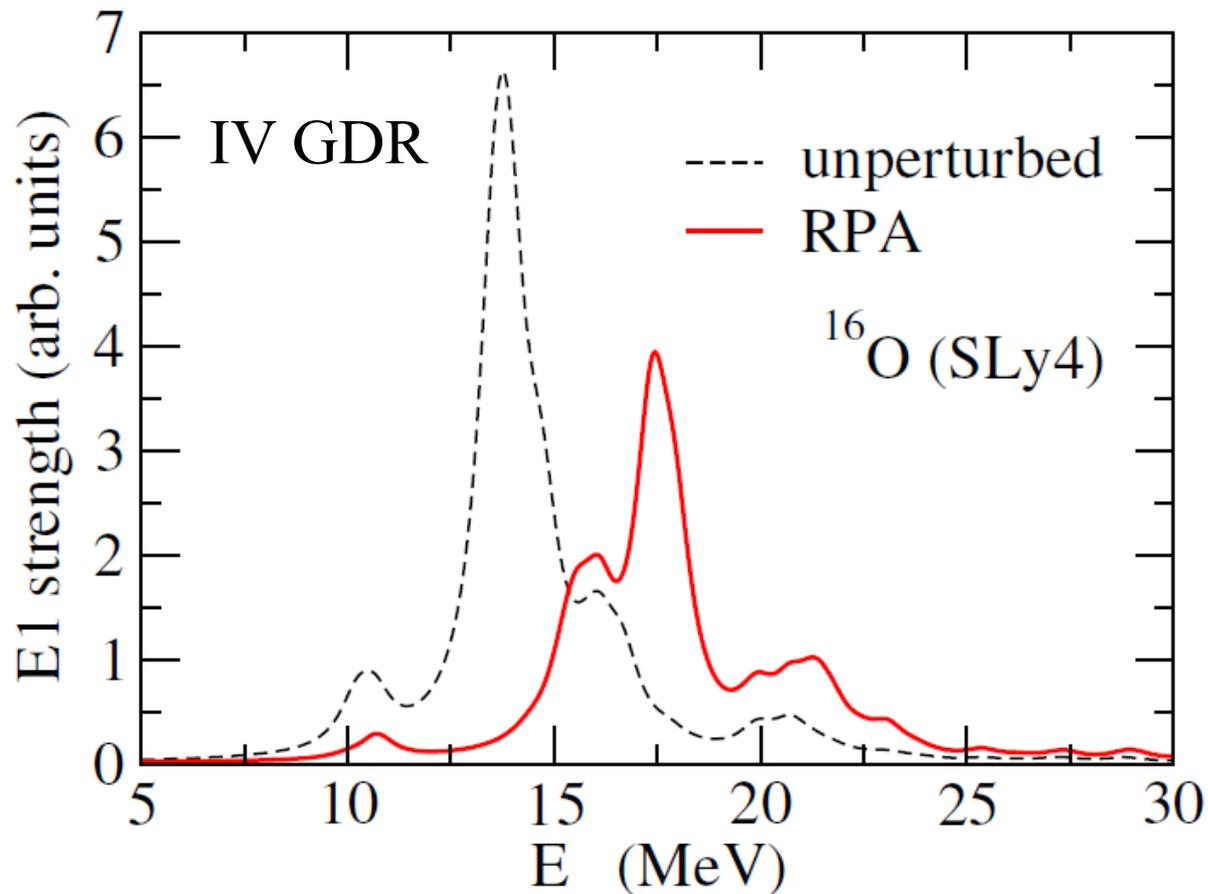


$$\Psi(\mathbf{r}, -\mathbf{r}) = [C_e \phi_e(\mathbf{r})^2 - C_o \phi_o(\mathbf{r})^2] |S = 0\rangle$$

# ダイニュートロン相関の起源：異なるパリティからなる配位の混合

相互作用が斥力の場合：原子核系では？

アイソベクトル( $T=1$ )の粒子空孔相互作用は斥力



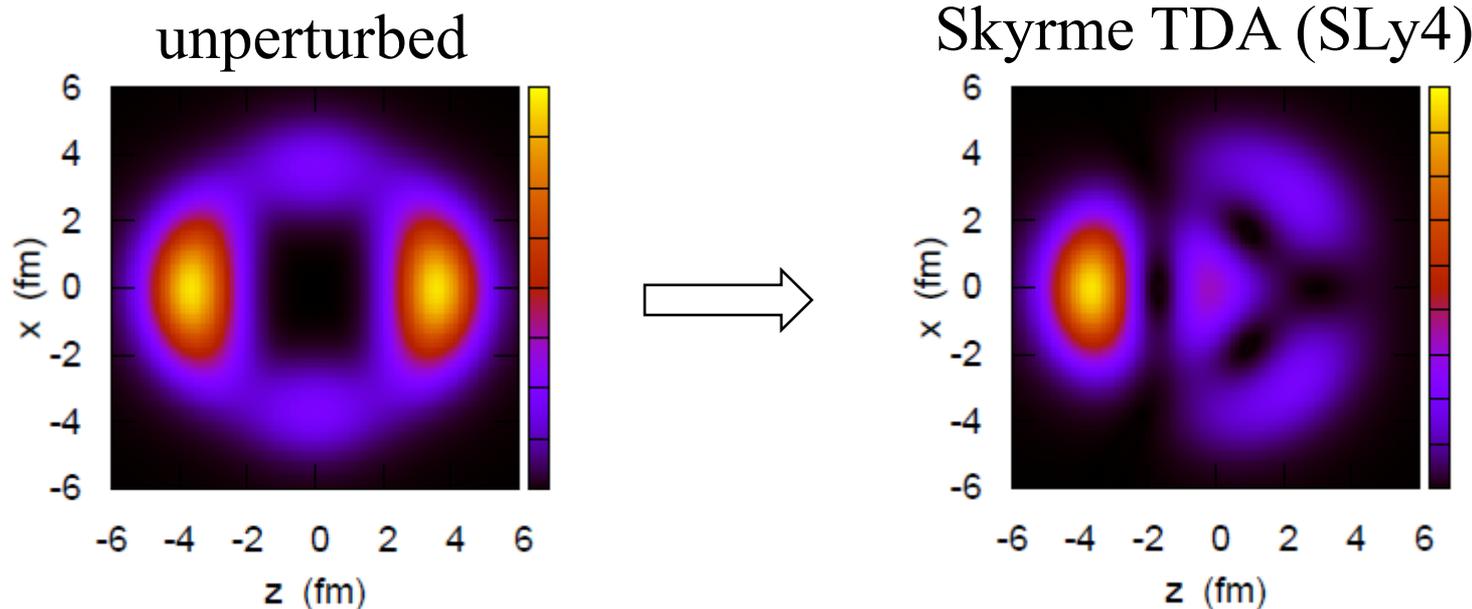
# ダイニュートロン相関の起源：異なるパリティからなる配位の混合

相互作用が斥力の場合：原子核系では？

アイソベクトル(T=1)の粒子空孔相互作用は斥力

$${}^{56}\text{Co} = {}^{56}\text{Ni} + n - p \quad |{}^{56}\text{Co}\rangle = \sum_{p,h} C_{ph} a_{\nu p}^\dagger a_{\pi h} |{}^{56}\text{Ni}\rangle$$

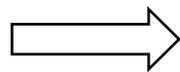
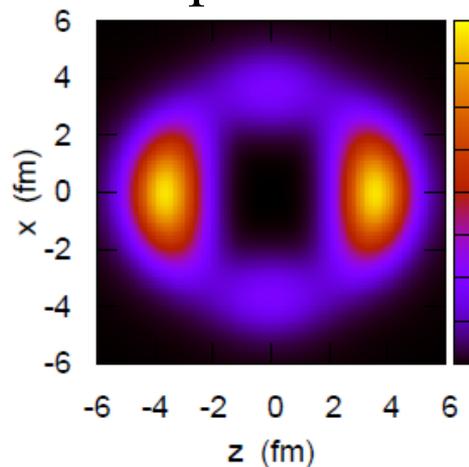
陽子空孔の空間分布： ${}^{56}\text{Co}$  の  $4^+$  状態,  $M=0$  (neutron at 3.4 fm)



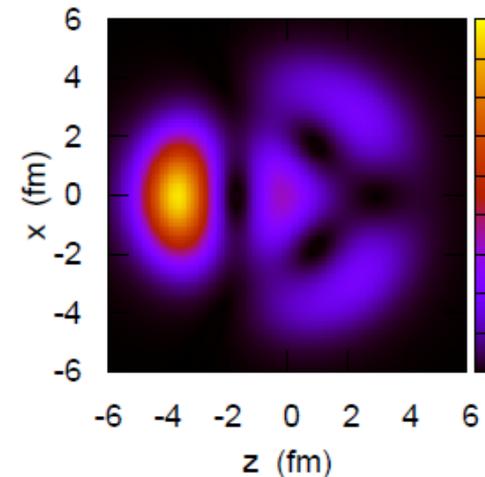
# 陽子空孔の空間分布(中性子は 3.4 fm に固定)

$^{56}\text{Co}$  ( $=^{56}\text{Ni}+n-p$ ) の  $4^+$  状態,  $M=0$

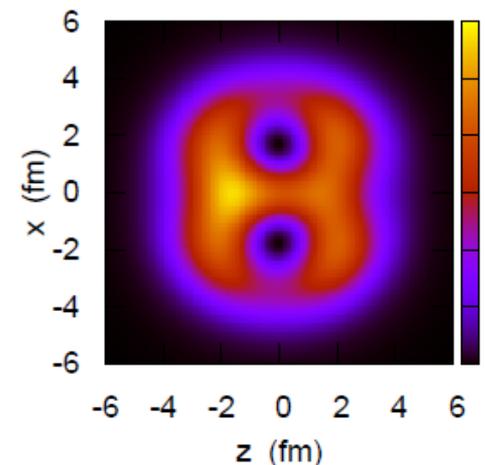
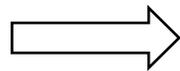
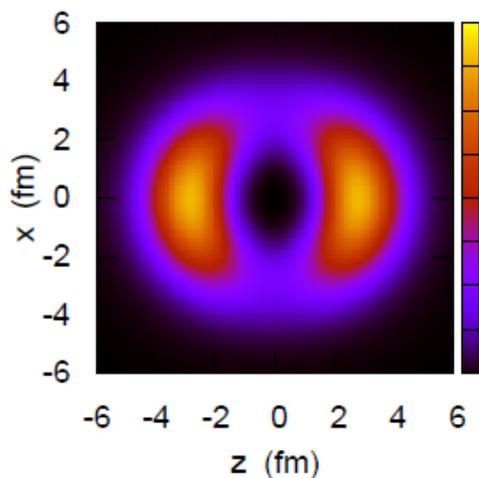
unperturbed



Skyrme TDA (SLy4)



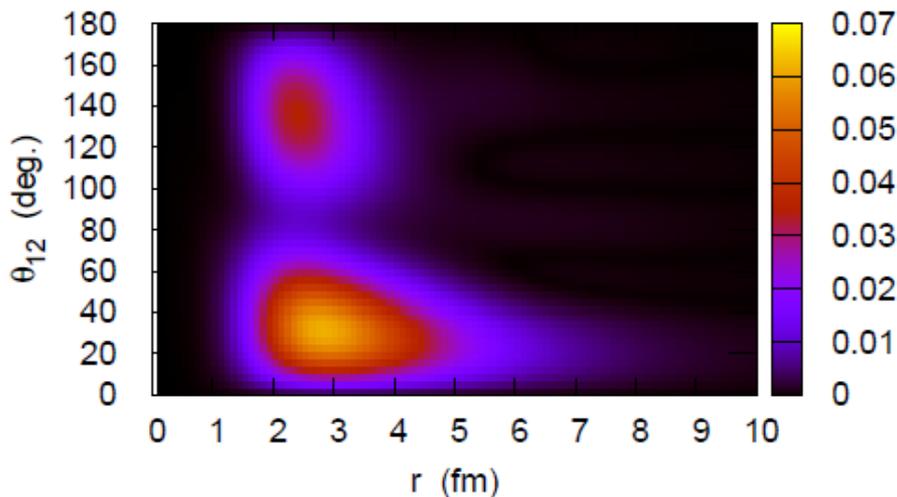
$^{40}\text{K}$  ( $=^{40}\text{Ca}+n-p$ ) の  $3^-$  状態,  $M=0$



# ダイニュートロン相関の起源：異なるパリティからなる配位の混合

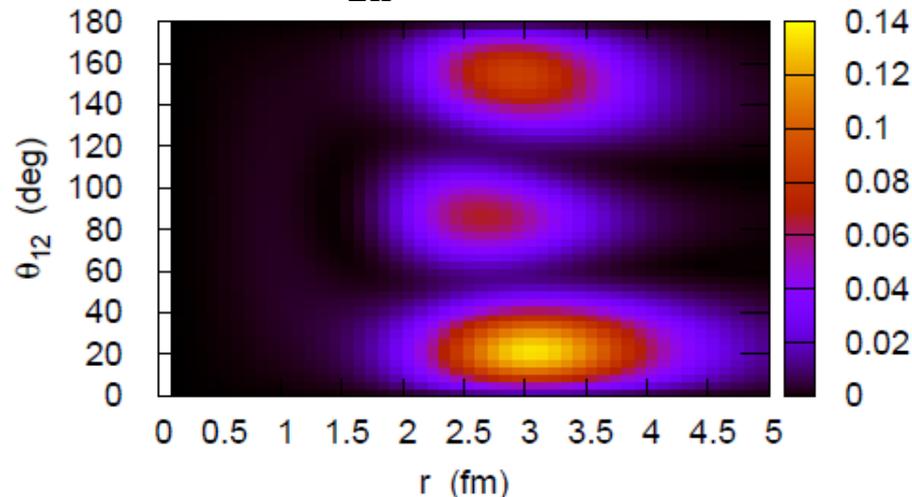
どの程度混合すれば相関が見えるのか？

${}^6\text{He}$  ( $S_{2n} = 0.978$  MeV)



odd<sup>2</sup>: 89.1 % [内、 $(p_{3/2})^2=83\%$ ]  
even<sup>2</sup>: 10.9%

${}^{18}\text{O}$  ( $S_{2n} = 12.2$  MeV)



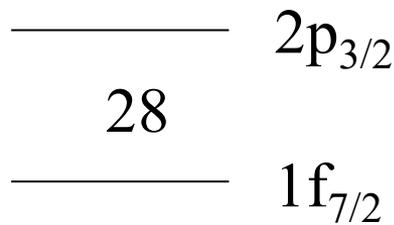
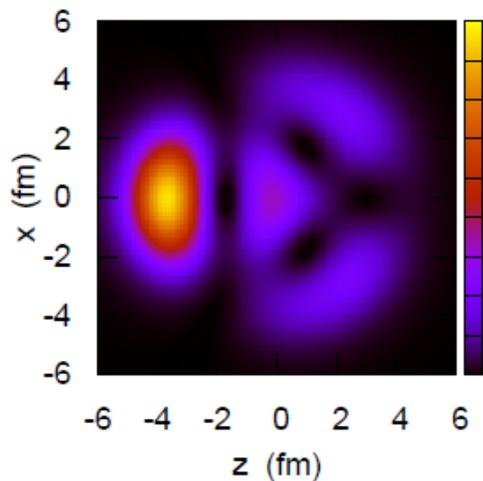
odd<sup>2</sup>: 3.37 %  
even<sup>2</sup>: 96.6% [内、sd殻=94.8%]

混合度合いがあまり大きなくても密度分布の偏りは大きい

# ダイニュートロン相関の起源：異なるパリティからなる配位の混合

どの程度混合すれば相関が見えるのか？

$${}^{56}\text{Co} = {}^{56}\text{Ni} + n - p$$



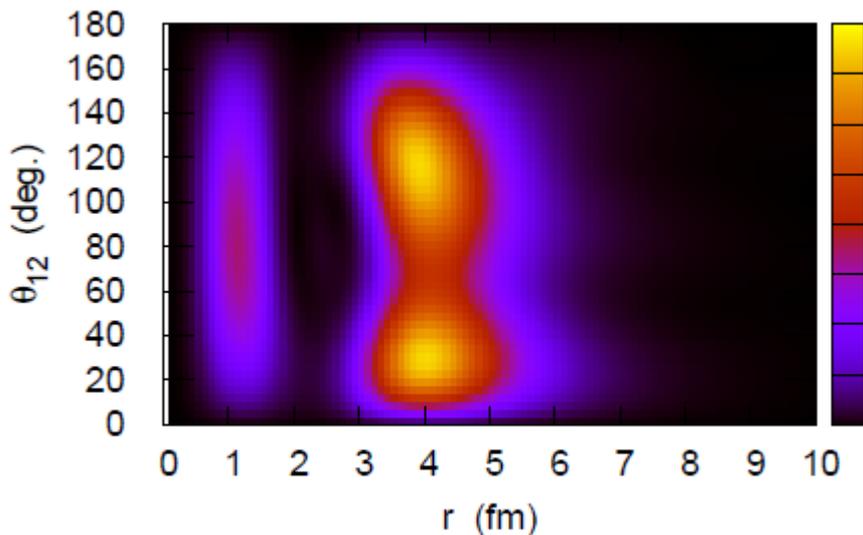
$$(2p_{3/2})_n(1f_{7/2})_p^{-1}: 97.7\%$$

$$(\text{even})_n(\text{even})_p^{-1}: 0.10\%$$

$$(\text{odd})_n(\text{odd})_p^{-1}: 99.9\%$$

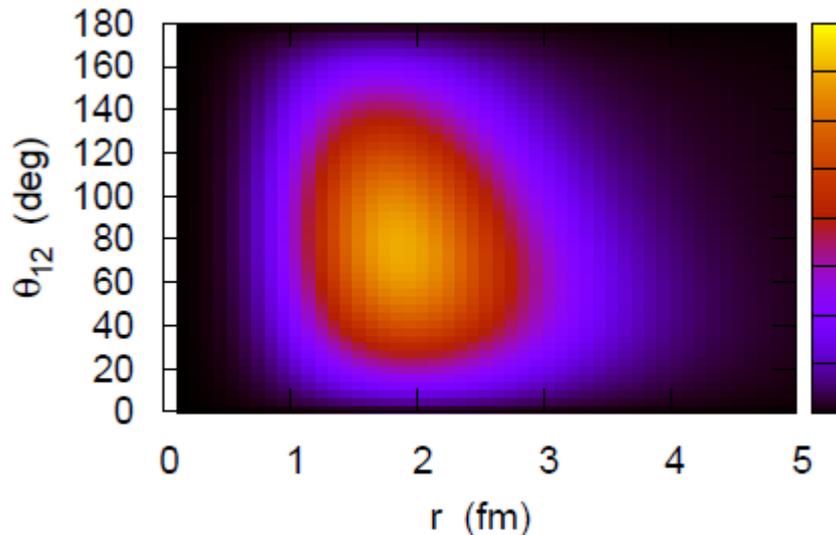
# ダイニュートロン相関の起源：異なるパリティからなる配位の混合

どの程度混合すれば相関が見えるのか？



odd<sup>2</sup>: 2.49 %  
even<sup>2</sup>: 97.5% [内、(s<sub>1/2</sub>)<sup>2</sup>=93.6%]

$$\langle \theta_{12} \rangle = 84.1 \text{ deg.}$$



odd<sup>2</sup>: 1.45 %  
even<sup>2</sup>: 98.5% [内、(1s<sub>1/2</sub>)<sup>2</sup>=97.2%]

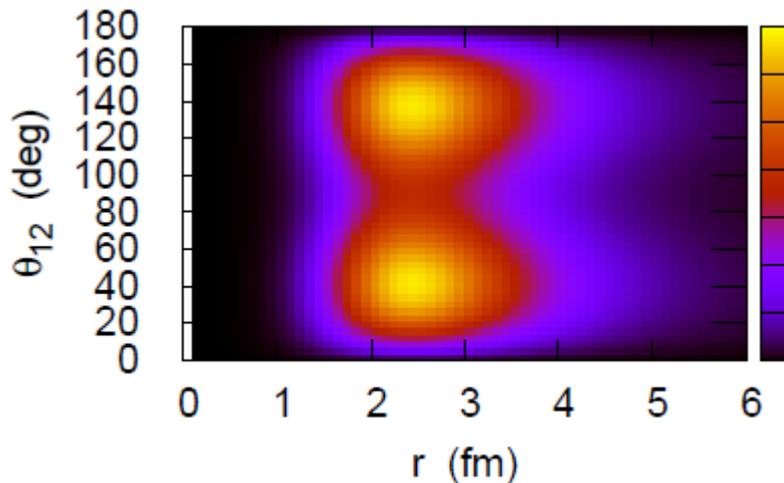
$$\langle \theta_{12} \rangle = 83.0 \text{ deg.}$$

s-wave が主成分だと見えづらいが、混合度合いが小さくてもやはり密度分布に偏りが出る

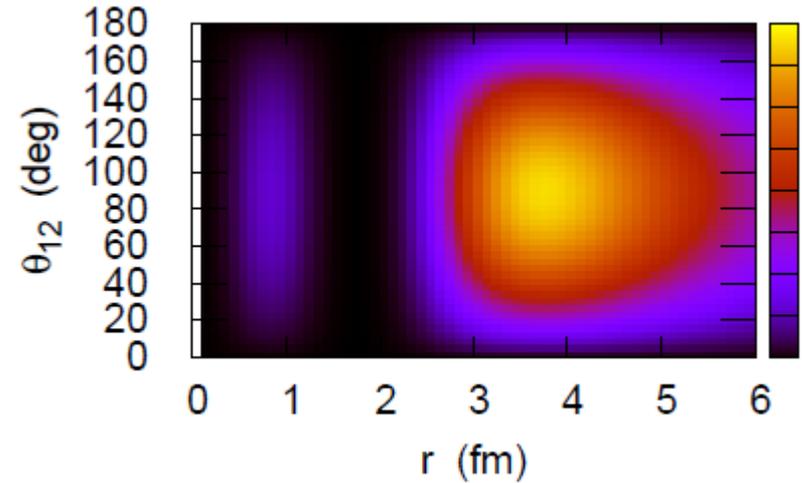
## 2配位モデルによる解析 $|\Psi\rangle = \sqrt{\alpha^2} |(1p_{3/2})^2\rangle + \sqrt{1 - \alpha^2} |(2s_{1/2})^2\rangle$

- ✓  $1p_{3/2}$ ,  $2s_{1/2}$  の波動関数は Woods-Saxon ポテンシャルで生成
- ✓ それぞれの一粒子エネルギーが  $-0.5$  MeV になるように調整

100%  $p_{3/2}$  のとき



100%  $s_{1/2}$  のとき

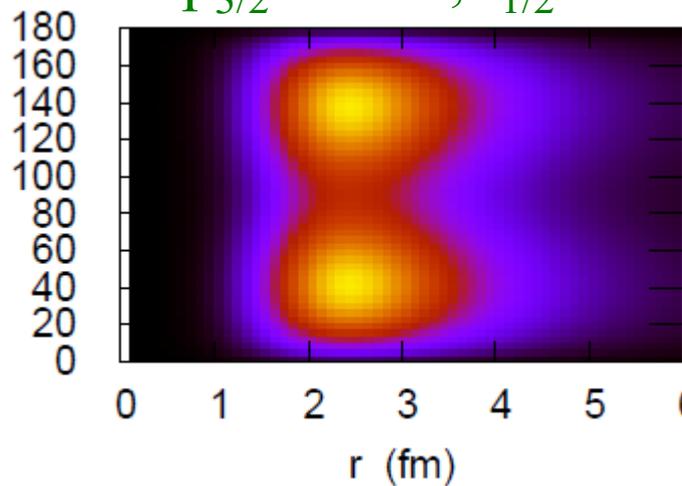


混合度合い  $\alpha$  を変えて密度分布の変化を見る

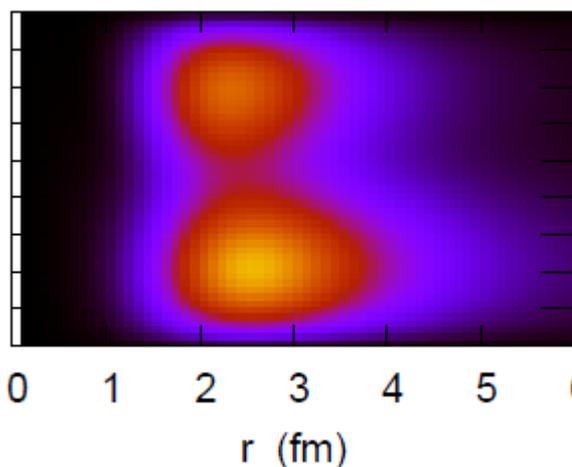
## 2配位模型による解析

$$|\Psi\rangle = \sqrt{\alpha^2} |(1p_{3/2})^2\rangle + \sqrt{1 - \alpha^2} |(2s_{1/2})^2\rangle$$

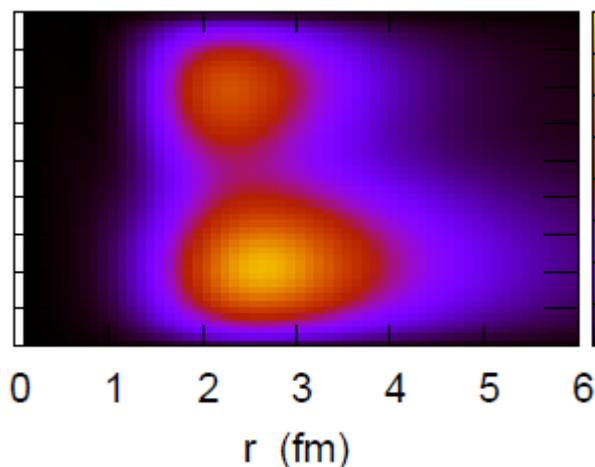
$p_{3/2}$  100%,  $s_{1/2}$  0%



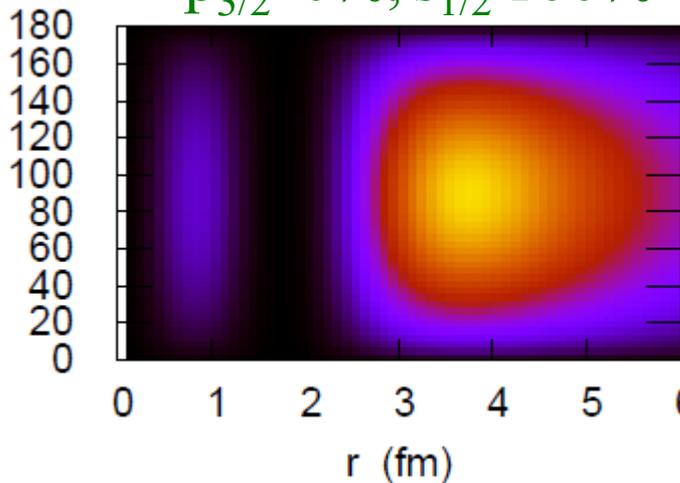
$p_{3/2}$  95%,  $s_{1/2}$  5%



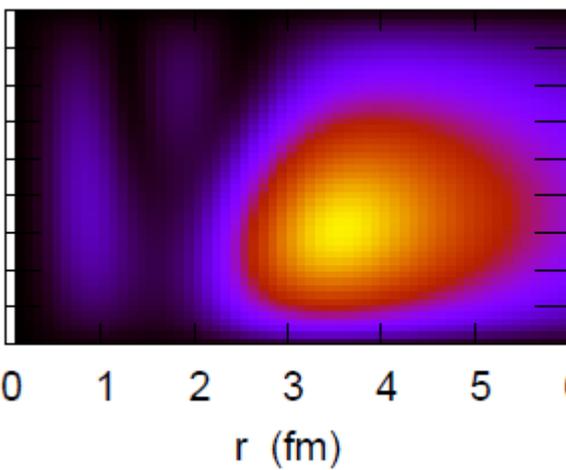
$p_{3/2}$  90%,  $s_{1/2}$  10%



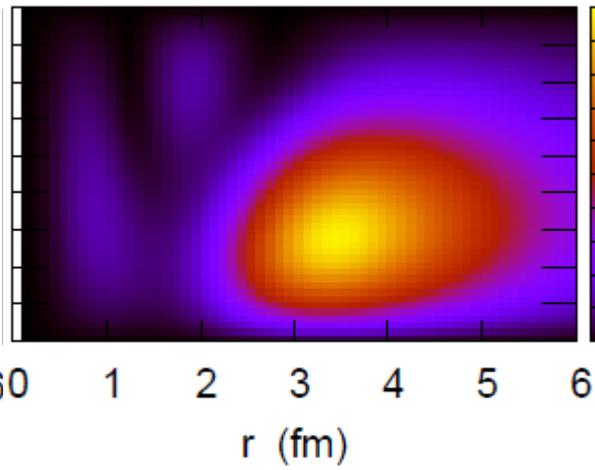
$p_{3/2}$  0%,  $s_{1/2}$  100%



$p_{3/2}$  5%,  $s_{1/2}$  95%



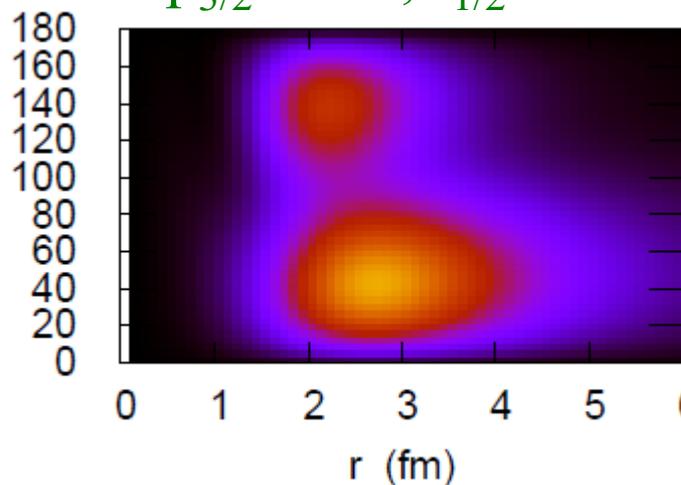
$p_{3/2}$  10%,  $s_{1/2}$  90%



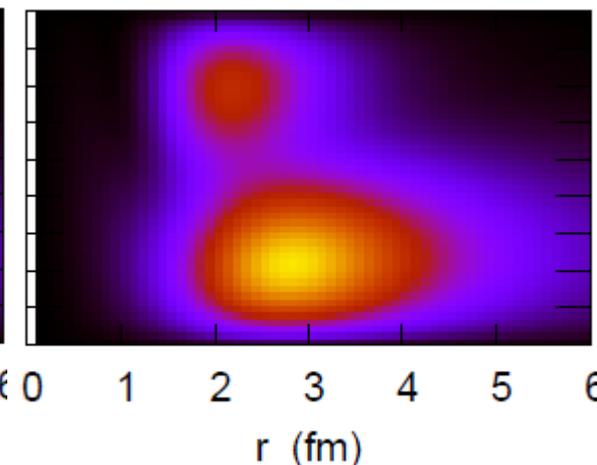
## 2配位模型による解析

$$|\Psi\rangle = \sqrt{\alpha^2} |(1p_{3/2})^2\rangle + \sqrt{1 - \alpha^2} |(2s_{1/2})^2\rangle$$

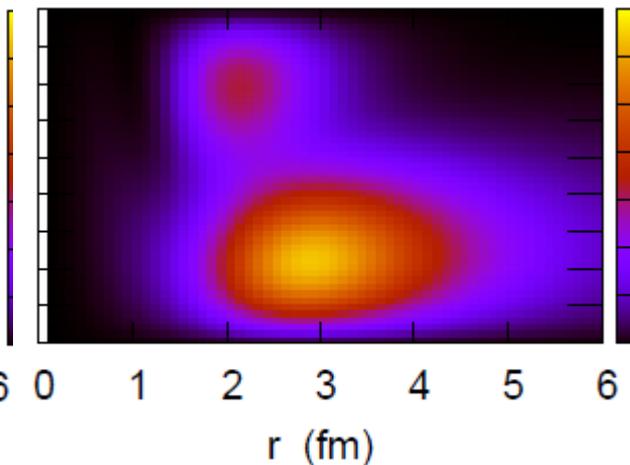
$p_{3/2}$  80%,  $s_{1/2}$  20%



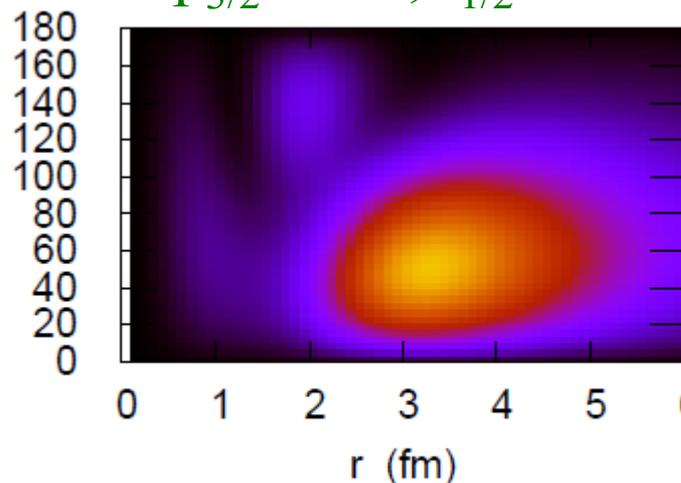
$p_{3/2}$  70%,  $s_{1/2}$  30%



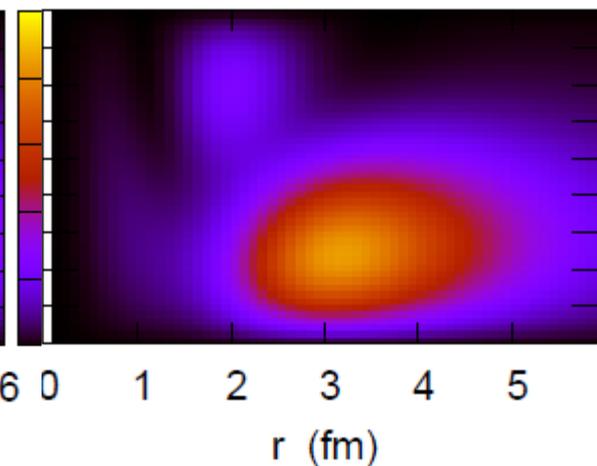
$p_{3/2}$  60%,  $s_{1/2}$  40%



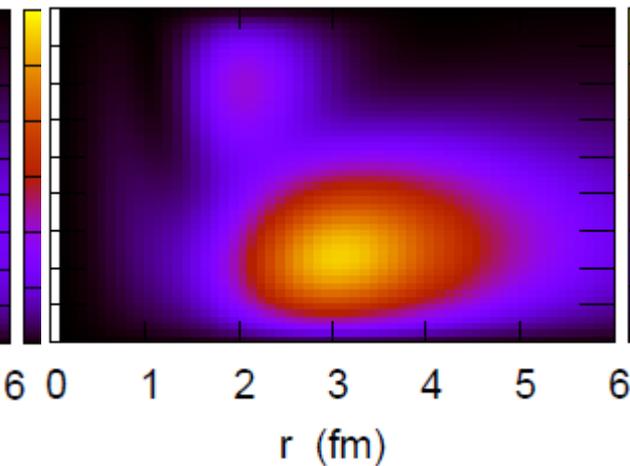
$p_{3/2}$  20%,  $s_{1/2}$  80%



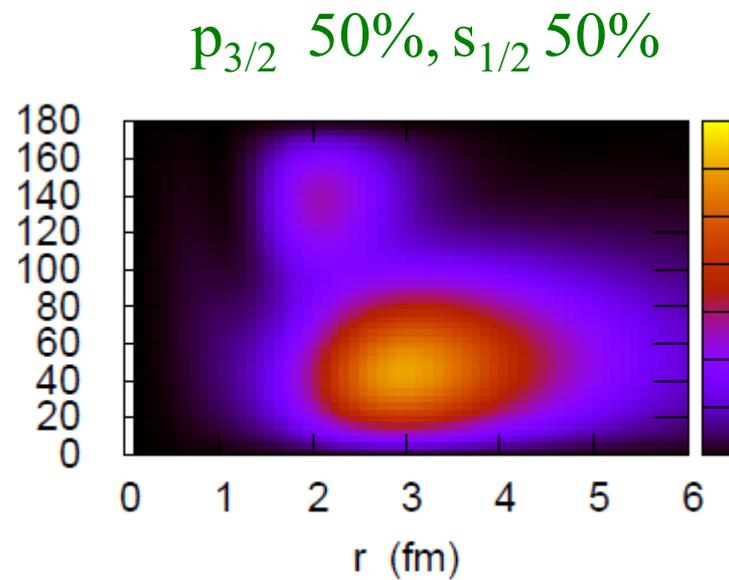
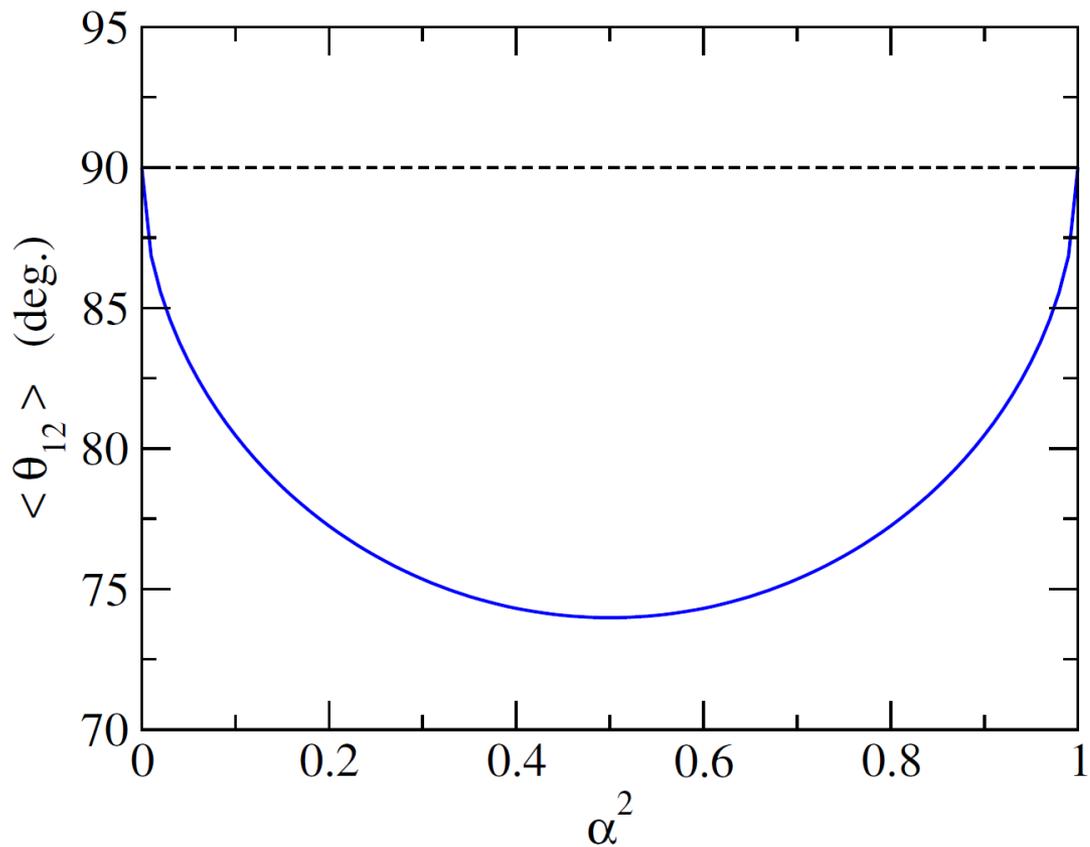
$p_{3/2}$  30%,  $s_{1/2}$  70%



$p_{3/2}$  40%,  $s_{1/2}$  60%



2配位模型による解析  $|\Psi\rangle = \sqrt{\alpha^2} |(1p_{3/2})^2\rangle + \sqrt{1 - \alpha^2} |(2s_{1/2})^2\rangle$



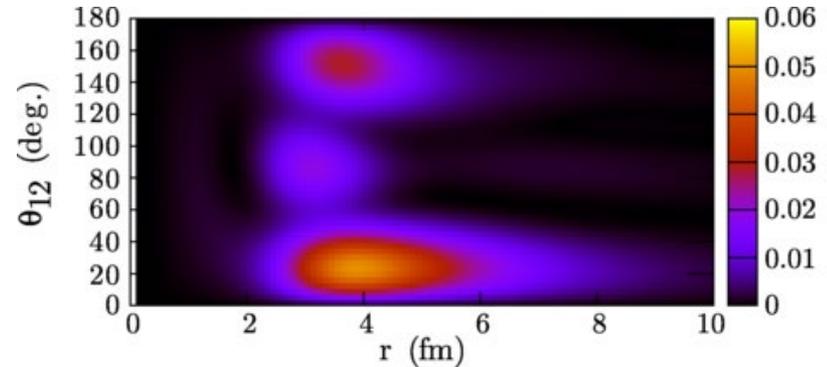
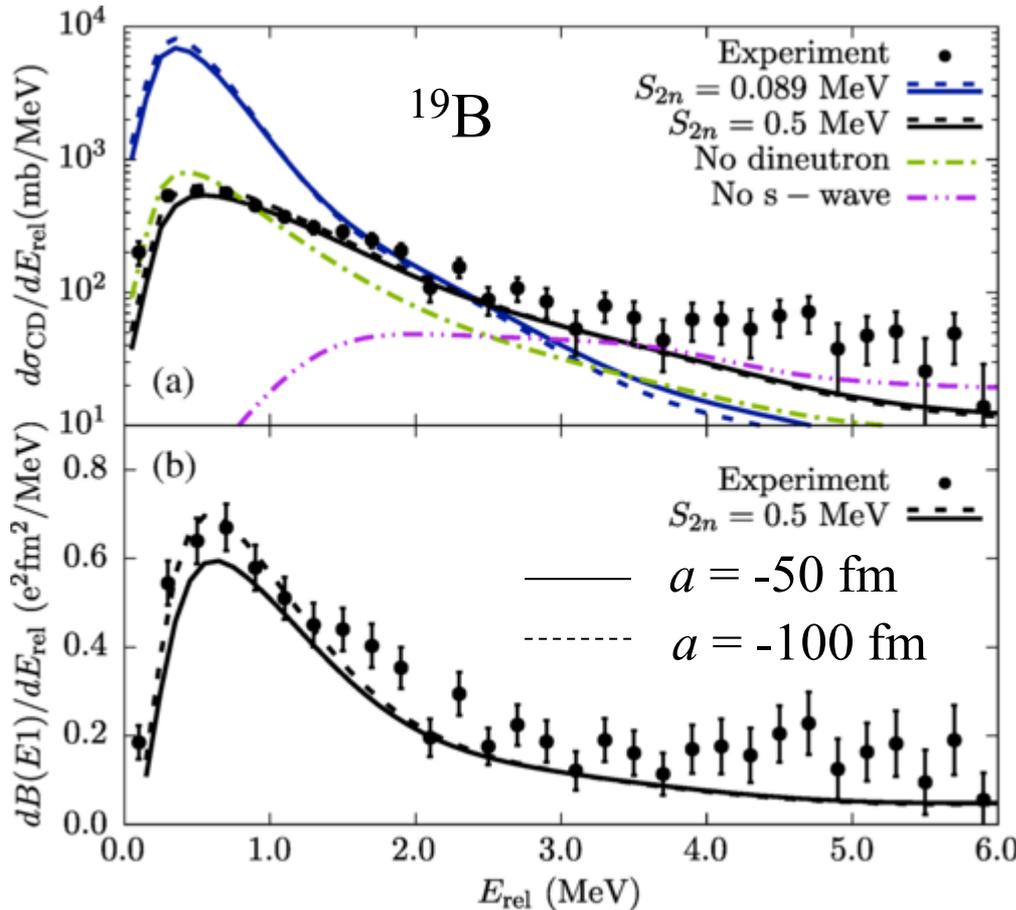
$\alpha^2 = 0.5$  で対称になっている  $\rightarrow$   $s_{1/2}$  かどうかはあまり関係ない

# どのようにダイニュートロンをプローブするか？



## 1. クーロン分解 ← 中村さんのトーク

### 最近の $^{19}\text{B}$ の実験



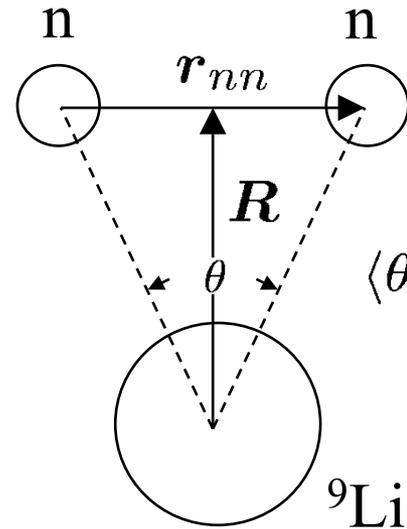
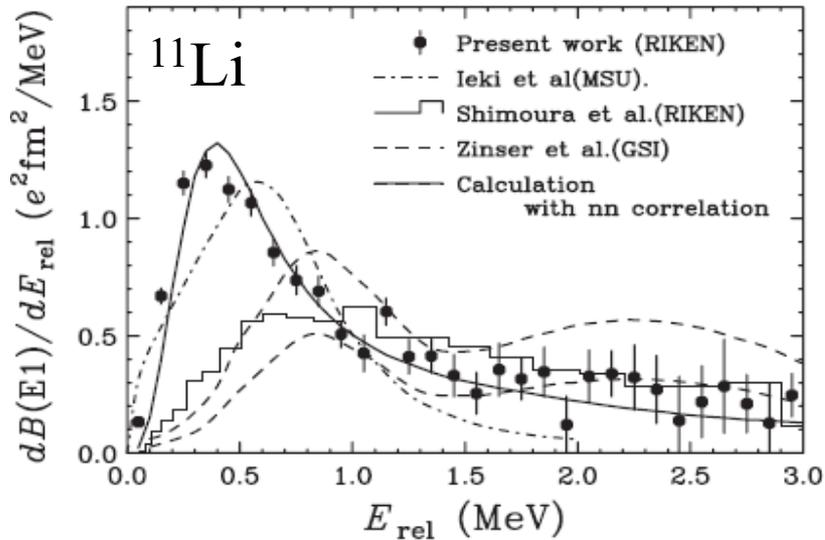
K.J. Cook, T. Nakamura,  
Y. Kondo, K. Hagino, et al.,  
PRL124, 212503 (2020)

# どのようにダイニュートロンをプローブするか？



## 1. クーロン分解 ← 中村さんのトーク

### クラスター和則



$$\langle \theta \rangle = 65.2 \pm 12.2$$

K.H. and H. Sagawa,  
PRC76('07)047302

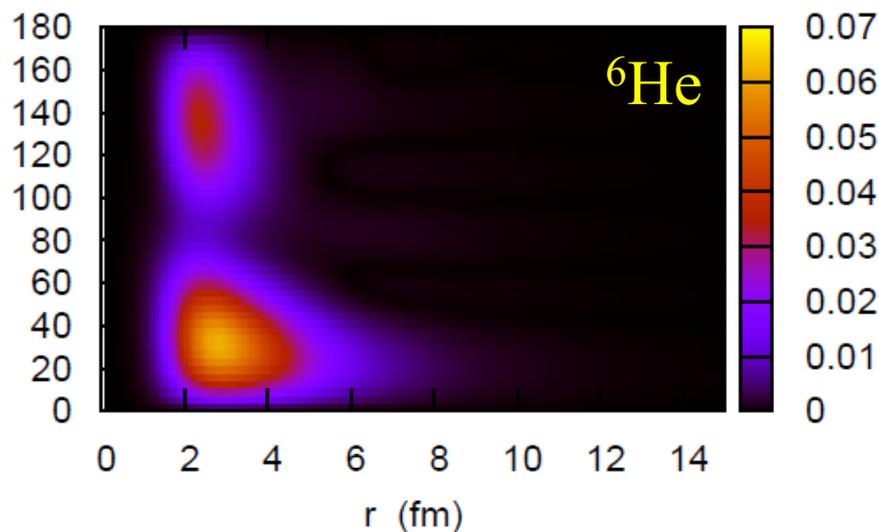
T. Nakamura et al., PRL96 ('06) 252502

## 2. ノックアウト反応 ← 上坂さんのトーク

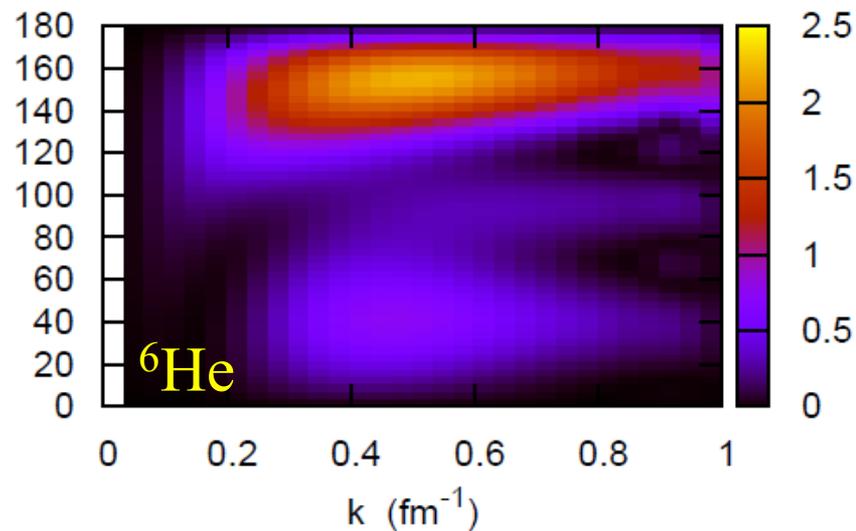
# どのようにダイニュートロンをプローブするか？

## 3. 2p 放出崩壊・2n 放出崩壊

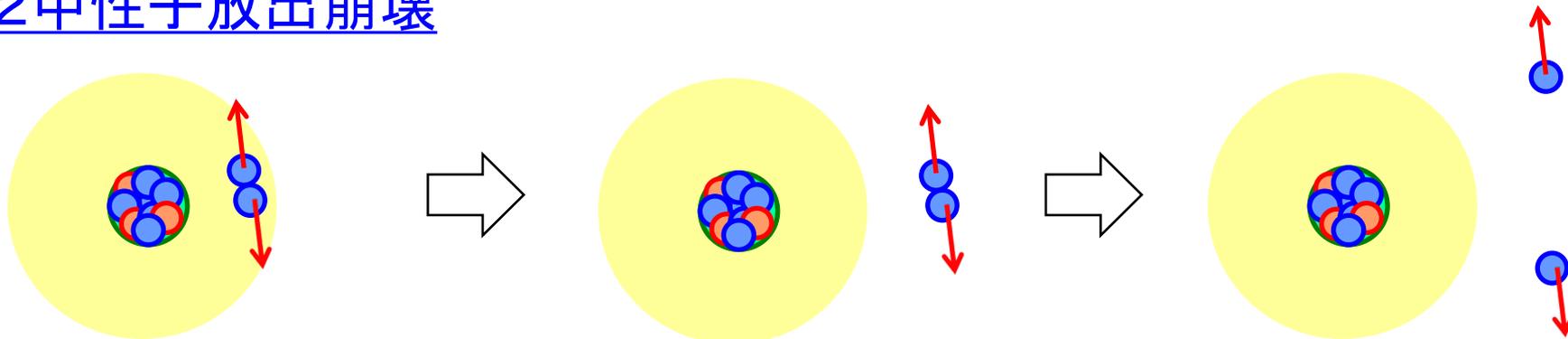
### 座標空間の分布



### 運動量空間の分布



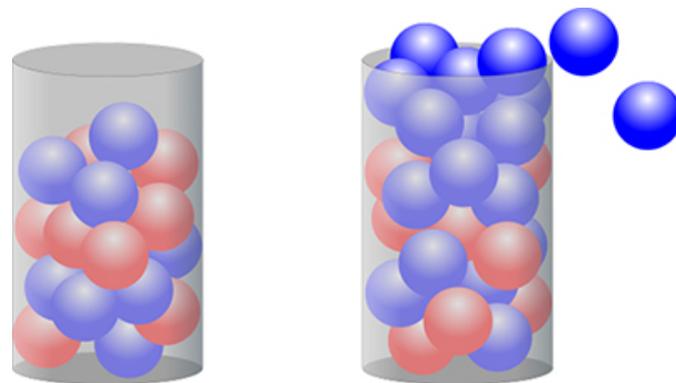
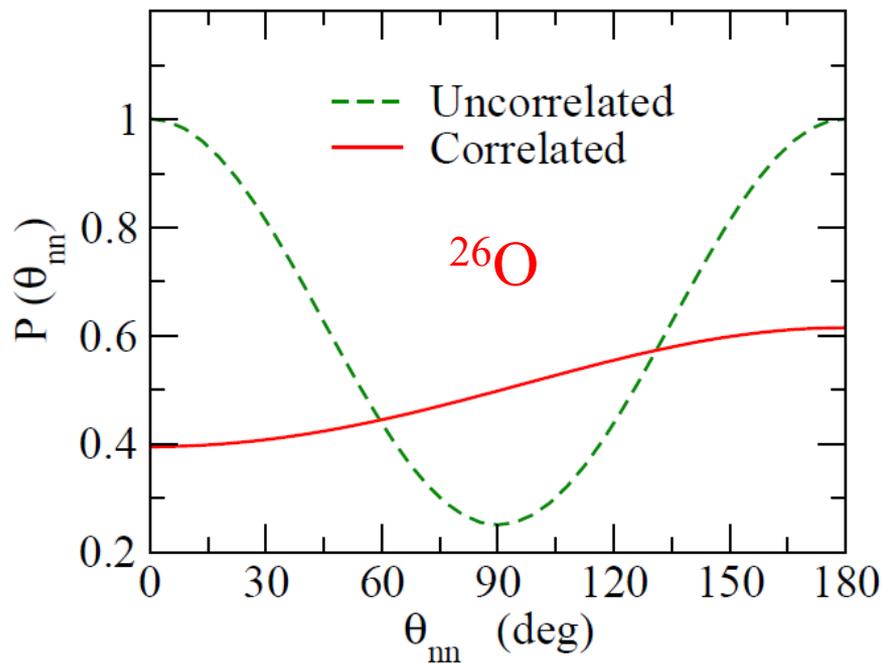
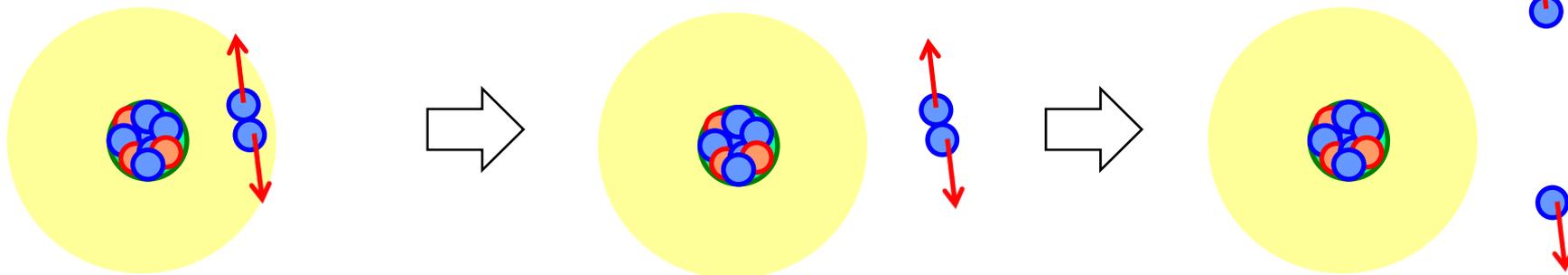
## 2中性子放出崩壊



# どのようにダイニュートロンをプローブするか？

## 3. 2p 放出崩壊・2n 放出崩壊

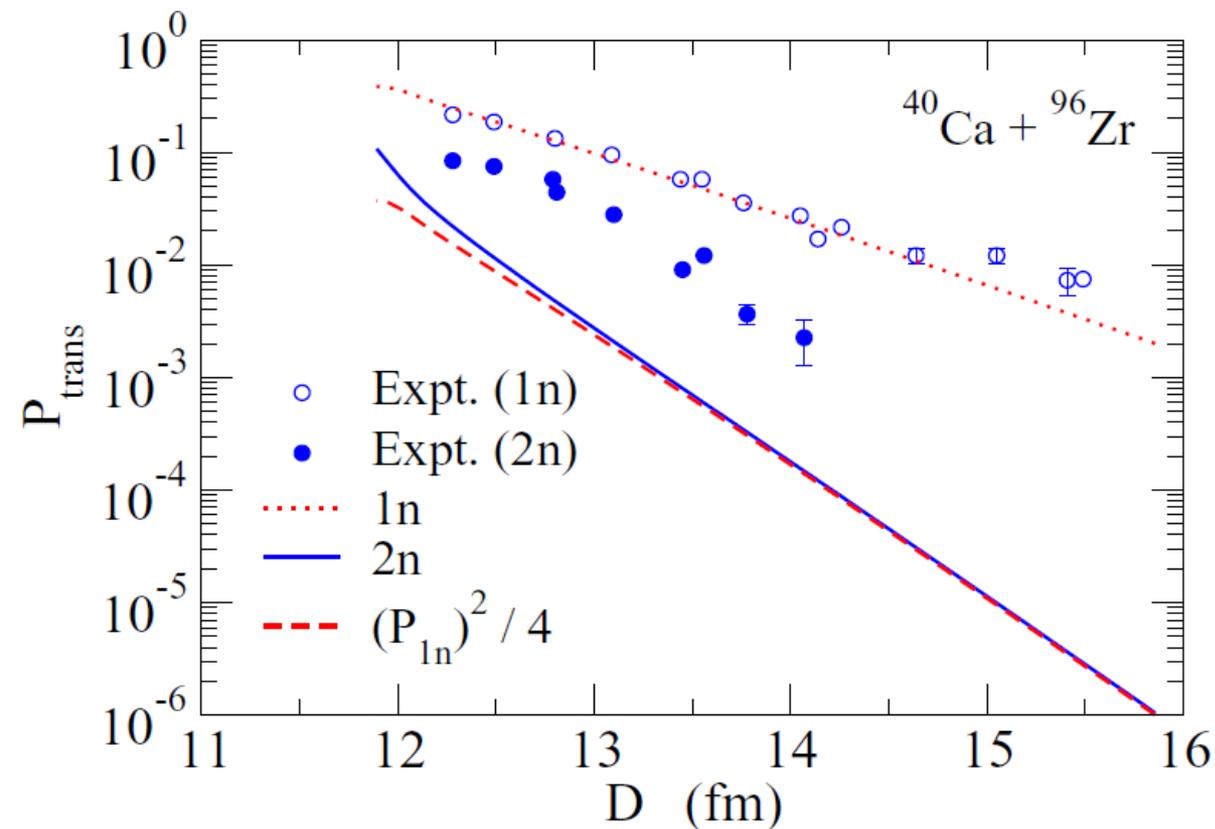
### 2中性子放出崩壊



K.H. and H. Sagawa,  
PRC89 ('14) 014331;  
PRC93 ('16) 034330

# どのようにダイニュートロンをプローブするか？

## 4. 対移行反応 c.f. H. Shimoyama and M. Matsuo, PRC88, 054308 (2013)



2n移行断面積の増幅  
→対相関

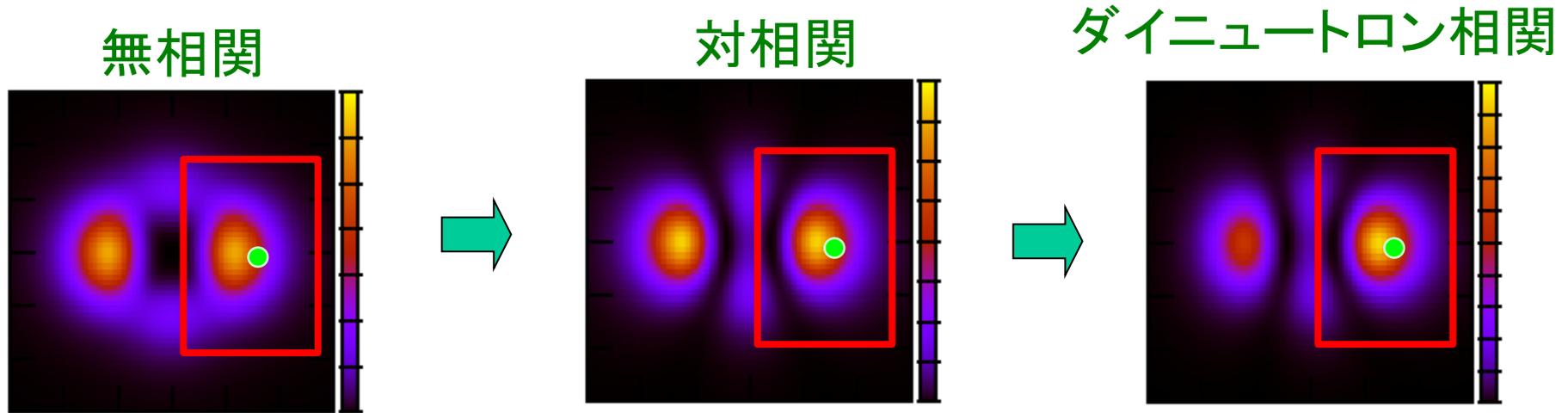
K.H. and G. Scamps, PRC92 ('15) 064602

Data: L. Corradi et al., PRC84 ('11) 034603

# どのようにダイニュートロンをプローブするか？

難しい点：対移行反応はダイニュートロン相関を見ているわけではない？

cf. A. Insolia, R.J. Liotta, and E. Maglione,  
J. of Phhys. G15 ('89) 1249



赤い四角：対移行反応でプローブする領域

→対移行は「無相関」と「対相関」は区別するが、  
「対相関」と「ダイニュートロン相関」は区別しない(?)

→新たな視点での研究が必要(これからの課題)

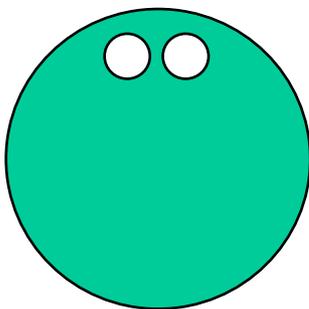
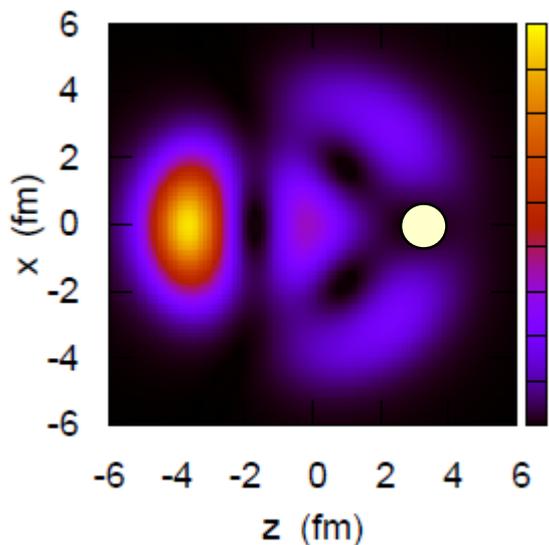
cf. ( $^4\text{He}, ^6\text{He}$ ) 反応@OEDO

# 反ダイニュートロン相関

$^{56}\text{Co}$  ( $^{56}\text{Ni} + n - p$ )

$^{54}\text{Fe}$  ( $^3\text{He}, p$ )  $^{56}\text{Co}$  反応 (重陽子移行反応)

G.F. Bertsch, Phys. Lett. 25B ('67) 62



$^{54}\text{Fe}$  (=  $^{56}\text{Ni} - 2p$ )

$(1f_{7/2})^2$ : 68.2%

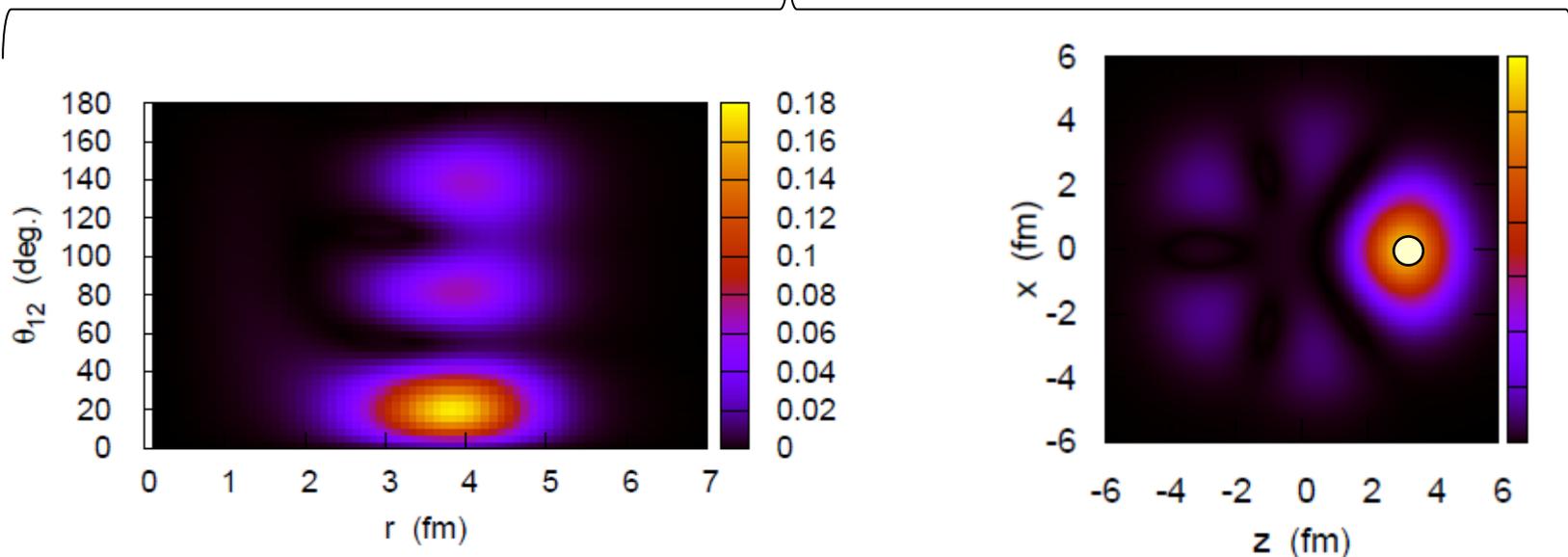
$(1d_{3/2})^2$ : 12.8%

$(1d_{5/2})^2$ : 9.9%

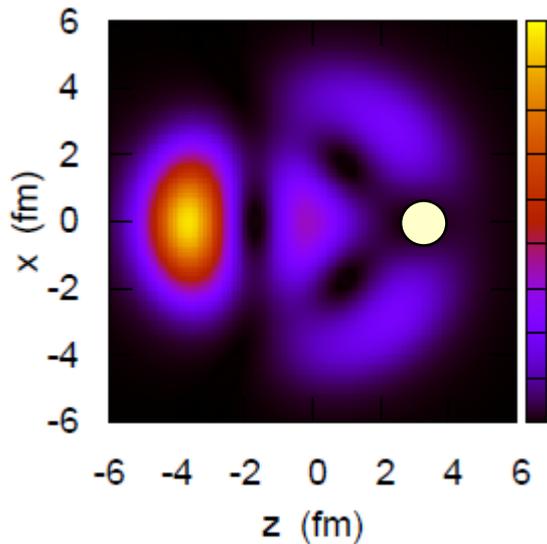
$(2s_{1/2})^2$ : 3.94%

$(1p_{3/2})^2$ : 2.83%

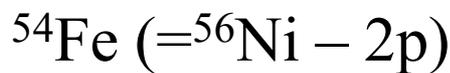
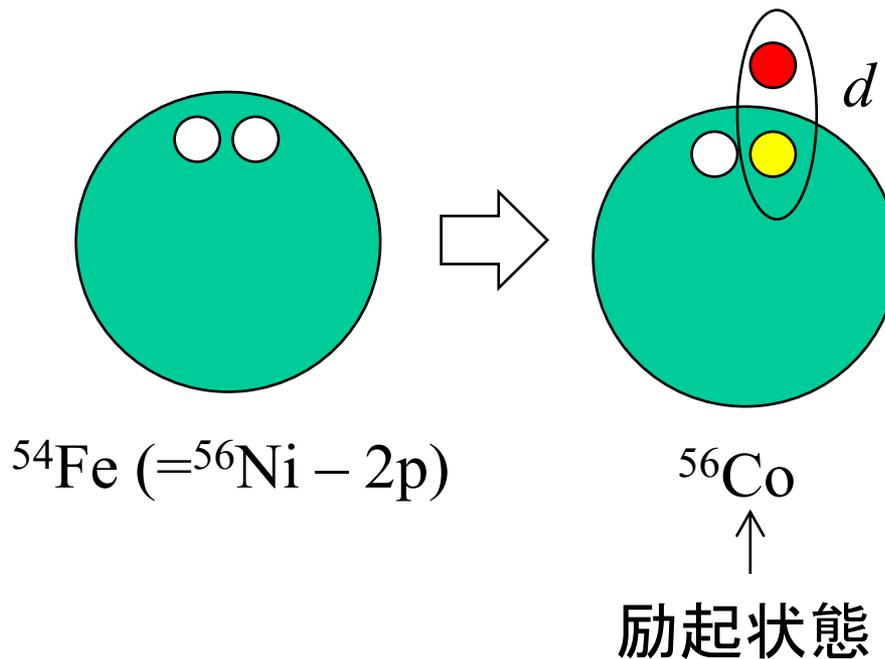
hh-TDA (SLy4)



# 反ダイニュートロン相関



G.F. Bertsch, Phys. Lett. 25B ('67) 62



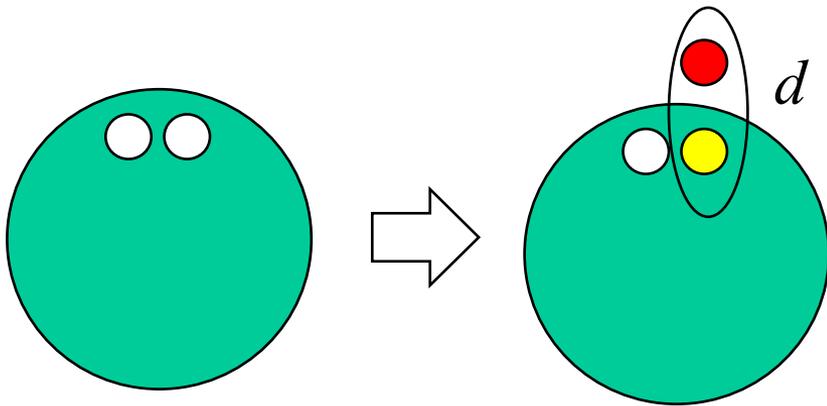
励起状態

${}^{56}\text{Co}$  の基底状態への移行が抑制

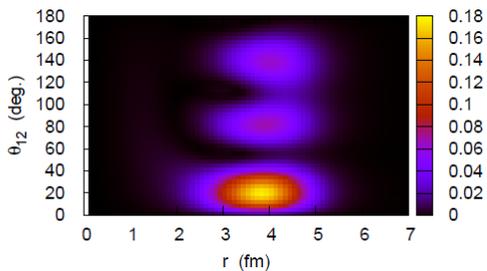
さらに考えを進めると:

- 2陽子空孔状態のダイプロトン相関、
- T=1 粒子空孔状態における反ダイニュートロン相関

がプローブできたことになるのではないかと(ただし、反応計算が必要)。

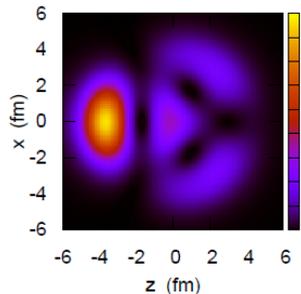


$^{54}\text{Fe} (=^{56}\text{Ni} - 2p)$



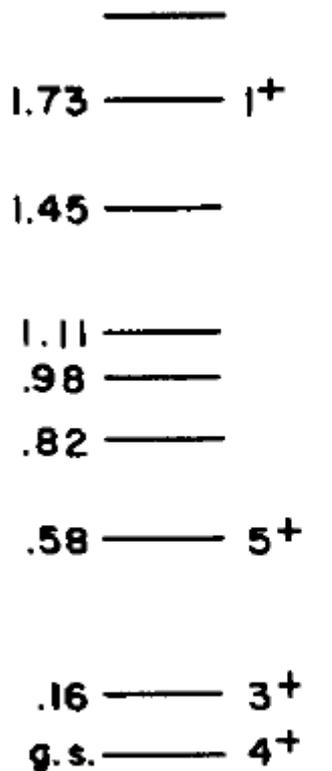
$^{56}\text{Co}$

励起状態



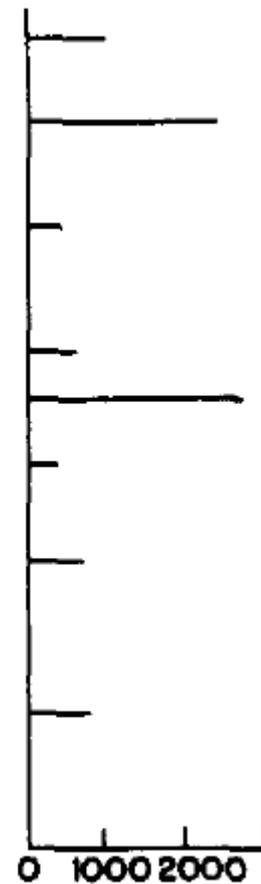
$^{56}\text{Co}$  の基底状態への移行が抑制

ENERGY (MeV)



EXPERIMENTAL  
SPECTRUM

$^{56}\text{Co}$



( $\text{He}^3, p$ )  
REACTION

実験データ

## まとめ

- **ダイニュートロン相関 ← 異なるパリティからなる配位の混合**  
中性子間の引力(対相関)がダイニュートロンの配位を誘起

- ✓ ダイプロトン相関
  - ✓ ダイラムダ相関
- } など

相互作用が斥力であれば反相関

- ✓ 原子における電子間相互作用(クーロン斥力)
- ✓ T=1 粒子空孔相互作用

- **どのようにプローブするか？**

- クーロン分解
- ノックアウト反応
- 2核子放出崩壊
- 2核子移行反応

2空孔核の重陽子ストリッピング反応: ( $^3\text{He}, p$ ) 反応など

→ 2空孔相関、粒子空孔反相関の検証