

# 杉本先生とその後の 核物理の発展

土岐博  
大阪大学核物理センター

2013.4.7

tokisugimoto@osaka

1

放射線ビームと不安定核物理 –杉本先生とその後の核物理の発展–

池田清美 堀内和 土岐博

3人で座談会をした



原子核を核力から作る  
–パイ中間子のすごさと難しさ–

土岐 博

杉本先生と村岡先生に捧げる

2013.4.7

tokisugimoto@osaka

2

## 放射線ビームと不安定核物理

- ◆1975-1982: ニューマトロン計画
- ◆杉本核研所長を中心とする日米のLBL-INSの共同実験計画「不安定原子核ビーム実験手法の創設とその手法による実験」
- ◆1985:  $^{11}\text{Li}$ に代表される不安定核の異常核半径
- ◆1985: 山崎核研所長のもとに大ハドロン計画推進作業部会(Eアレーナは4つの柱のひとつ)
- ◆1987: クラスターに関する国際会議の準備研究(田中一代表)と重イオン反応物理学の研究(石原正泰代表)の合同研究会—理論の参加

2013.4.7

tokisugimoto@osaka

3

## 原子核理論の発展

- 1987: ソフトダイポールの提案(池田)
- 原子核のハロー構造
- 池田ノート(1994)「不安定核構造は1950年代から35年余りの日本の蓄積と経験がすべて生きてくる研究領域であることが特徴であることで重要である。別の言い方をすれば, 1950年代からこれ迄の我々のここ35年余の核物理の研究の歴史の真価を発揮して, 研究対象領域の広がった核子多体系研究の次の歴史を”我が国で”創り出す絶好の機会」

2013.4.7

tokisugimoto@osaka

4

## 不安定核の理論研究

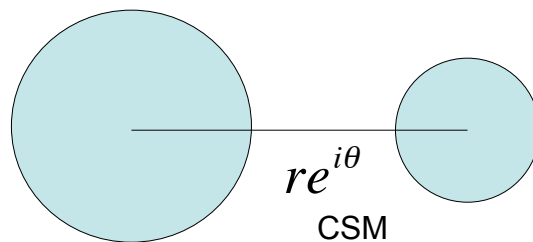
- **クラスター核物理**が世界の注目する所になった: 不安定核は基底状態が核子のしきい値にあるので取扱い法がクラスター研究の手法
- 実験データが近くで得られ、常に議論出来る
- シェルモデル(N、Z: 系統的研究)
- 北大の複素スケーリング法(CSM)
- 新潟のCOSM
- 京大のAMD
- $^{11}\text{Li}$ でのテンソル力の役割: TOSMの誕生

2013.4.7

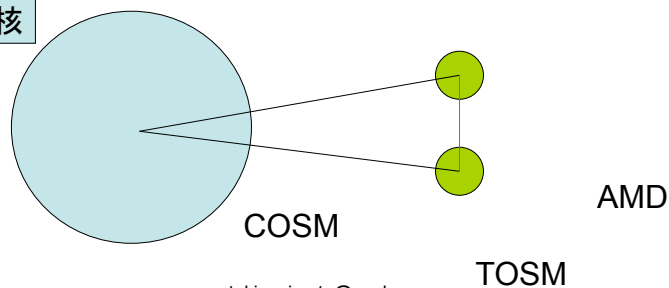
tokisugimoto@osaka

5

### クラスター構造



### 不安定核

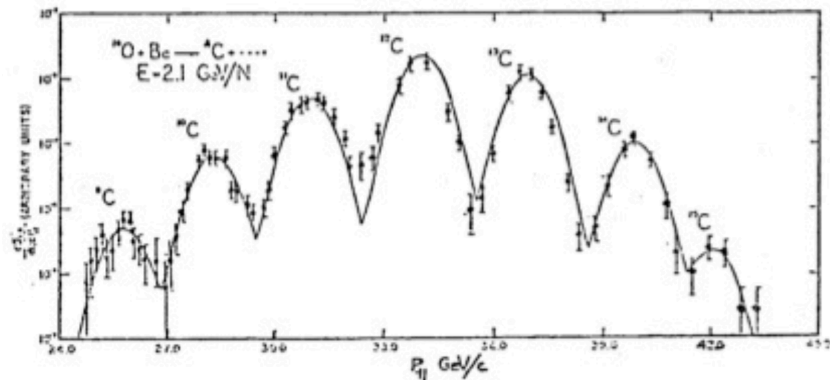


2013.4.7

tokisugimoto@osaka

6

不安定核の物理はこのスペクトルから始まった



Heckmanの実験

2013.4.7

tokisugimoto@osaka

7



新潟での2回の国際会議: その一場面(1994)

2013.4.7

tokisugimoto@osaka

8

## 杉本村岡の教科書

- 1988「原子核物理」
- 「歴史的発展の経緯からは、研究を進める上での多くの指針を学び取ることができる。」
- 実験の詳細な記述、その方法により得られた実験データとその持つ意味を簡単な理論で説明
- 素晴らしい本である。

2013.4.7

tokisugimoto@osaka

9

## 本の序論の最後に書かれている言葉

安定核の基底状態近傍において観測される現象を理解するために、今までに提案され成功を収めてきた核模型には、核内核子の軌道運動にもとづく殻模型(shell model)または核子の集団運動に着目した集団模型(collective model)などがある。これらの核構造論は、しかしながら本質的には未だ現象論の段階にとどまっている。このことは次の2つの困難が未解決なことにもよるものである。その1つは少数多体系から多体系にわたる自由度の多い有限個の量子系の取扱いが困難であることと、いま1つは核力についての知識が、核子自身のもつ内部構造の問題が未解決でもあり、核構造を理解するのに十分ではないことである。したがって、なお将来に解答が待たれる課題を多く残している。

2013.4.7

tokisugimoto@osaka

10

## パイ中間子のすごさと難しさ

- Yukawa(1934) predicted pion as a mediator of nuclear interaction to form nucleus
- Mayer-Jensen(1949) introduced shell model—beginning of Nuclear Physics
- Nambu(1960) introduced the chiral symmetry and its breaking produced mass and the pion as pseudo-scalar particle

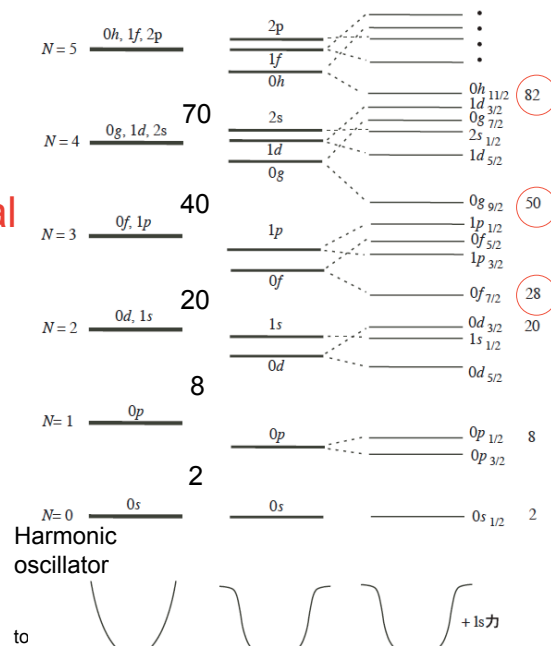
2013.4.7

tokisugimoto@osaka

11

### Shell model (Meyer-Jensen)

- Phenomenological
- Strong spin-orbit interaction added by hand
- Magic number
- 2,8,20,28,50,82



2013.4.7

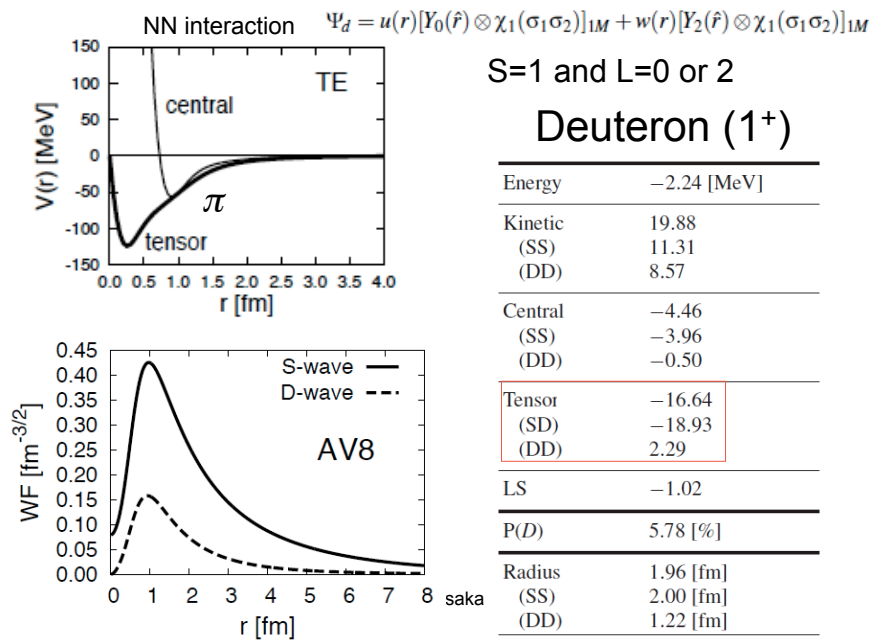
## Content

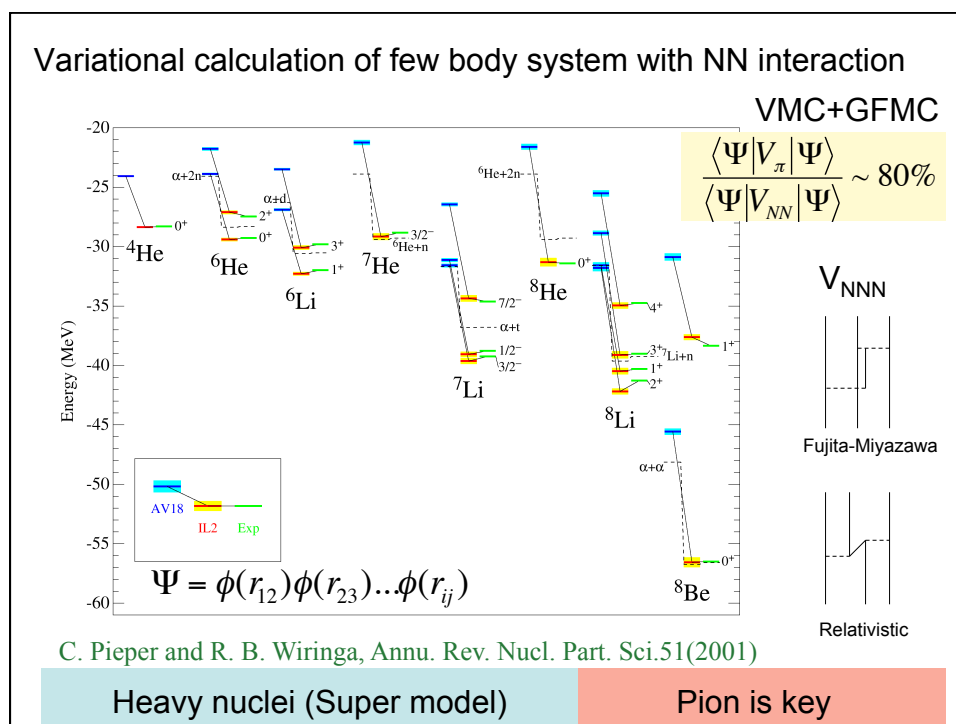
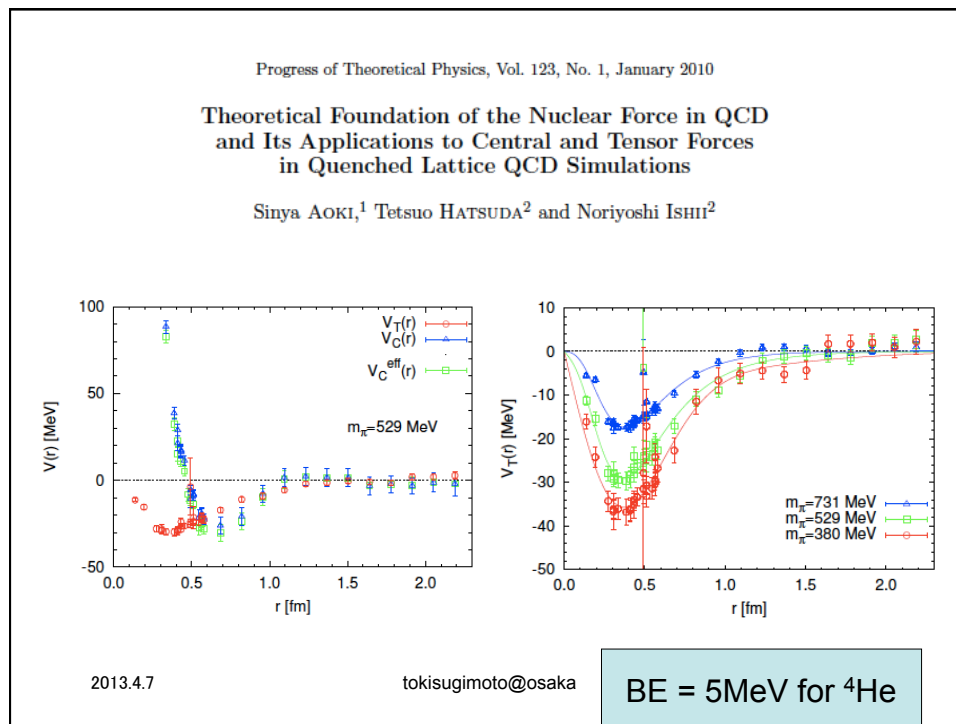
- Importance of pion (tensor force) in light nuclei - what the NN interaction tells?
- Tensor optimized shell model (TOSM)  
[ 0p + 2p2h states ]
- (open)TOSM for light nuclei
- Strongly tensor correlated Hartree-Fock theory
- Conclusion



Kobe: 10Pflops=京

The importance of tensor force is clear in deuteron





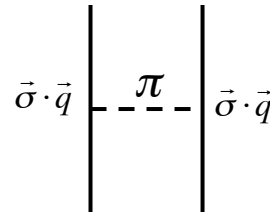


## Pion is important in nucleus

- 80% of attraction is due to pion
- Tensor interaction is particularly important

$$\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{q} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{q} = \frac{1}{3} q^2 S_{12}(\hat{q}) + \frac{1}{3} \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2 q^2 \quad S_{12}(\hat{q}) = \sqrt{\frac{24\pi}{5}} [Y_2(\hat{q}) [\sigma_1 \sigma_2]_2]_0$$

|      |        |           |
|------|--------|-----------|
| Pion | Tensor | spin-spin |
|------|--------|-----------|

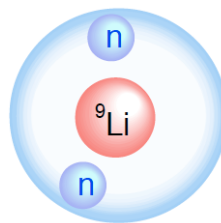


2013.4.7

tokisugimoto@osaka

17

### Tensor optimized shell model

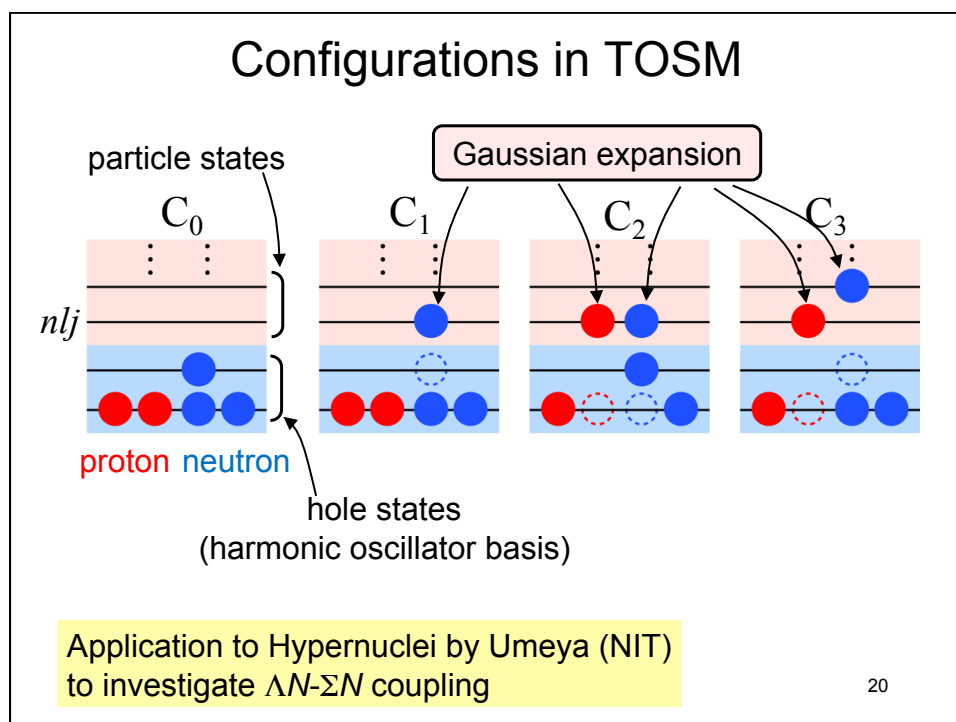
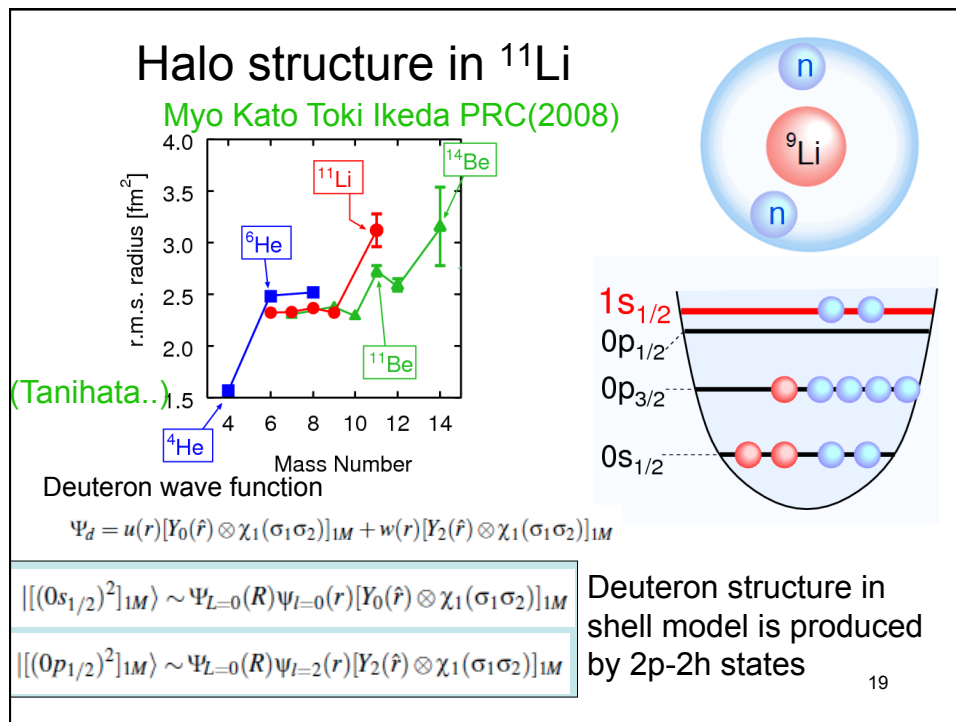


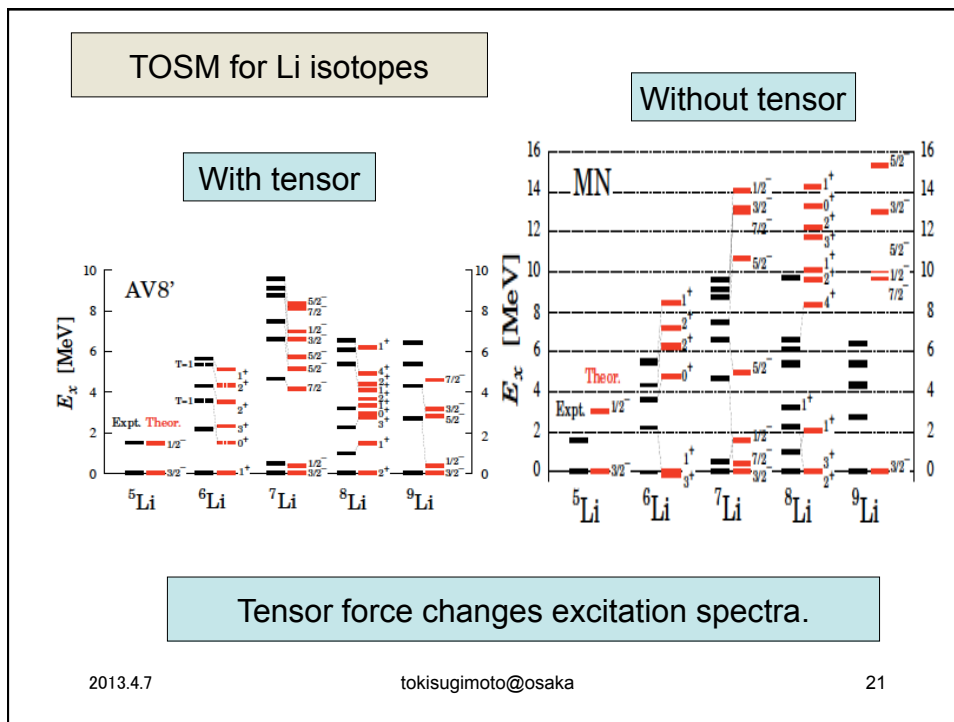
TOSMの誕生

2013.4.7

tokisugimoto@osaka

18





**Heavy nuclei**

Strongly tensor correlated Hartree-Fock theory

2013.4.7
tokisugimoto@osaka
22

### Strongly tensor correlated Hartree-Fock theory

Y.Ogawa H.Toki  
Annals of Physics 326 (2011) 2039

$$\langle 0 | S_{12} | 0 \rangle = 0 \quad S_{12} = \sqrt{\frac{24\pi}{5}} [Y_2(\hat{r}) \times [\sigma_1 \times \sigma_2]_2]^{(0)}.$$

We cannot treat the tensor interaction in HF space.

TOSM ansatz

$$|\Psi\rangle = C_0 |0\rangle + \sum_{\alpha} C_{\alpha} |2p-2h:\alpha\rangle$$

$$\delta \frac{\langle \Psi | H | \Psi \rangle}{\langle \Psi | \Psi \rangle} = 0 \quad \langle \Psi | \Psi \rangle = |C_0|^2 + \sum_{\alpha} |C_{\alpha}|^2 = 1$$

2013.4.7

tokisugimoto@osaka

23

### Total energy

$$\begin{aligned} \langle \Psi | H | \Psi \rangle &= |C_0|^2 \langle 0 | H | 0 \rangle + C_0^* \sum_{\alpha} C_{\alpha} \langle 0 | H | 2p-2h:\alpha \rangle \\ &+ C_0 \sum_{\alpha} C_{\alpha}^* \langle 2p-2h:\alpha | H | 0 \rangle + \sum_{\alpha\beta} C_{\alpha}^* C_{\beta} \langle \alpha | H | \beta \rangle \\ &|2p-2h:\alpha\rangle \equiv |\alpha\rangle \end{aligned}$$

### Variational principle

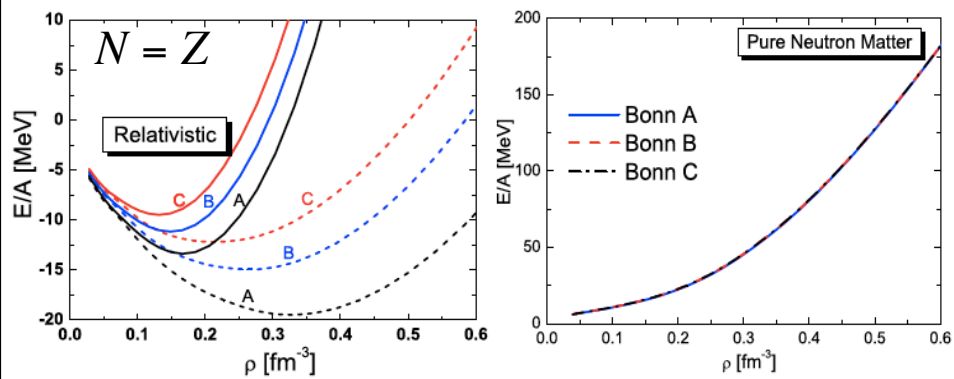
$$\frac{\partial}{\partial C_{\alpha}^*} \langle \Psi | H - E | \Psi \rangle = 0$$

$$C_0 \langle \alpha | H | 0 \rangle + \sum_{\beta} C_{\beta} \langle \alpha | H | \beta \rangle = E C_{\alpha}$$

$$\frac{\partial}{\partial \psi_a^*(x)} \left[ \langle \Psi | H | \Psi \rangle - \sum_b e_b \psi_b^*(x) \psi_b(x) \right] = 0 \quad |0\rangle = \prod_a \psi_a(x)$$

$$|C_0|^2 \frac{\partial}{\partial \psi_a^*} \langle 0 | H | 0 \rangle + C_0^* \sum_{\alpha} C_{\alpha} \frac{\partial}{\partial \psi_a^*} \langle 0 | H | \alpha \rangle + \sum_{\alpha\beta} C_{\alpha}^* C_{\beta} \frac{\partial}{\partial \psi_a^*} \langle \alpha | H | \beta \rangle = e_a \psi_a(x)$$

### EOS of nuclear matter (N=Z) and (N only)

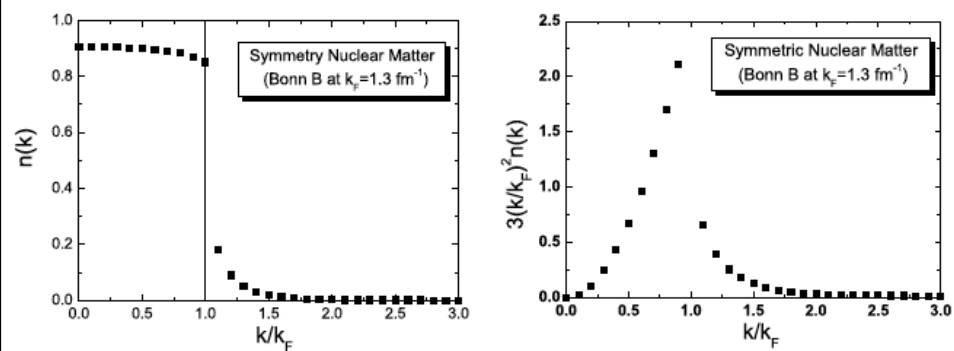


2013.4.7

tokisugimoto@osaka

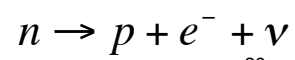
25

### Momentum distribution



### High momentum components

### URCA過程

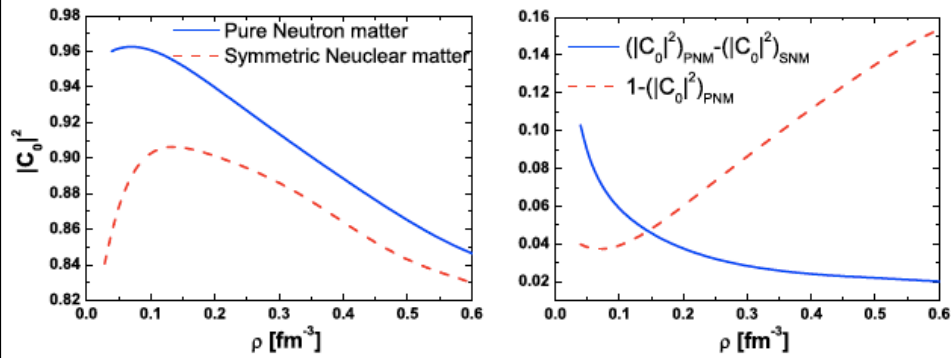


2013.4.7

tokisugimoto@osaka

26

### Tensor correlation and Short range correlation



1. Short range correlation increases with density
2. Tensor correlation decreases with density

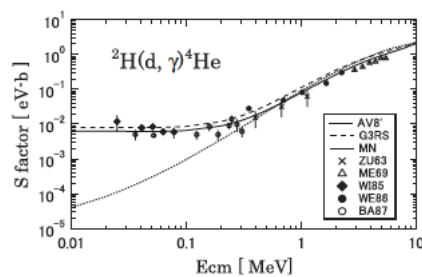
2013.4.7

tokisugimoto@osaka

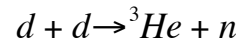
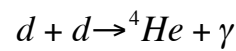
27

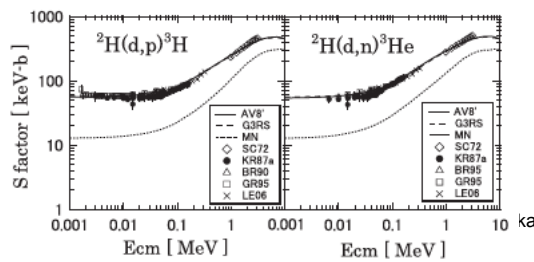
### Tensor Force Manifestations in *Ab Initio* Study of the $^2\text{H}(d, \gamma)^4\text{He}$ , $^2\text{H}(d, p)^3\text{H}$ , and $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$ Reactions

PRL(2011)

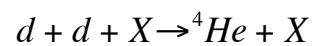
K. Arai,<sup>1,\*</sup> S. Aoyama,<sup>2</sup> Y. Suzuki,<sup>3,4</sup> P. Descouvemont,<sup>5</sup> and D. Baye<sup>6,5</sup>

テンソル力が重要



$$S = 2 \quad L = 0 \text{ channel}$$


大きいエネルギーの開放



$$S = 0 \quad L = 0 \text{ channel}$$

28

## 杉本先生とともに

- 不安定核の物理は理論の新たな強い相互作用系の物理の発展を促した
- 不安定核物理は日本が引っ張る新しい研究分野
- 京コンピュータは理論の分野の再編  
(素粒子、原子核、天体) + (物理と工学)
- 実験の発展と理論の発展は同時に起こることを実感した

2013.4.7

tokisugimoto@osaka

29