

$\alpha+N+N$ 三体模型による $A=6$ 系の構造の アイソスピン依存性の研究

栗原 希美

北大理

共同研究者

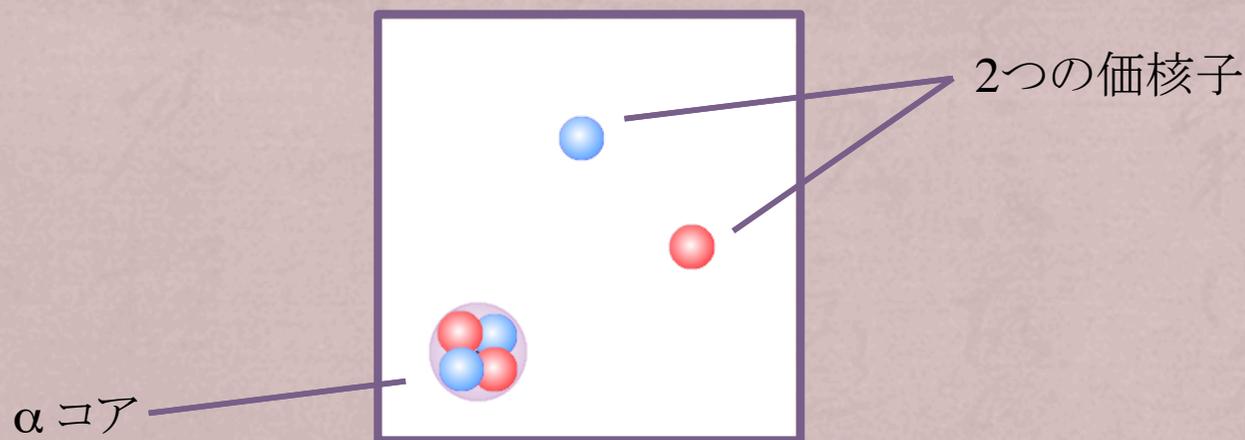
菊地 右馬^A、加藤 幾芳

^A阪大RCNP

Introduction

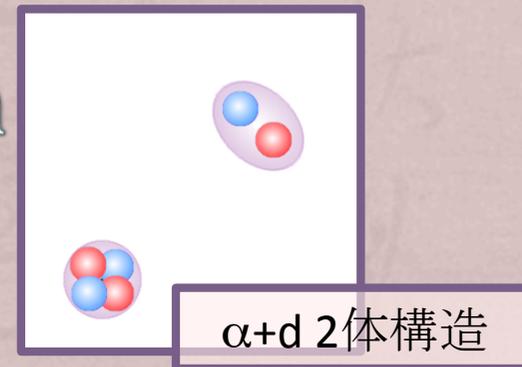
+ A=6系に共通する特徴的な構造

- 構成する6核子のうちの2つの陽子と2つの中性子が他に比べて比較的強く束縛し、 α クラスターを形成している。
- このため、A=6系は基本的に $\alpha+N+N$ (N:核子)の3体構造を持つ。
 - $\alpha+N+N$ 3体クラスターモデルによって良く記述する事の出来る系である。
 - 大きな質量数の一般的な原子核とは異なった構造を持っている。
Ex.) 飽和性は成り立っていない。



A=6系の $\alpha+N+N$ 3体構造の模式図

Introduction



+ A=6系に存在する様々な2価核子相関

- ${}^6\text{Li}$

T=0の状態では、価陽子と価中性子が原子核内で局在して重陽子クラスターを作っており、 $\alpha+d$ の2体構造を持つ事が古くから知られている。

一方、T=1の場合は真空中でも陽子と中性子は束縛せず、核内でも重陽子クラスター構造は持たず、結果 ${}^6\text{Li}$ は $\alpha+p+n$ の3体構造を持つ。

- ${}^6\text{He}$ ($\alpha+n+n$, n : 中性子)

真空中では束縛しない2つの価中性子が空間的に局在している2中性子相関が理論研究から示唆されている。さらに、近年の不安定核の実験からは2価中性子の空間的密度分布が広がっている2中性子ハロー構造が存在する事が知られている [1]。

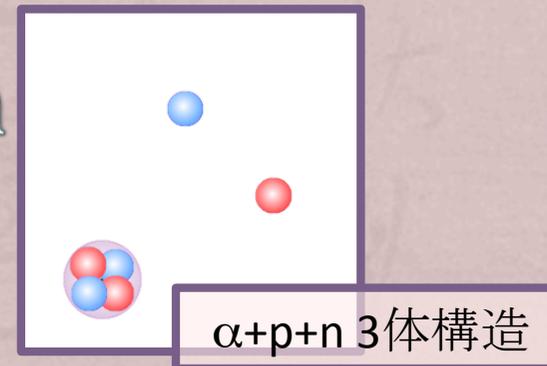
- ${}^6\text{Be}$ ($\alpha+p+p$, p : 陽子)

2中性子相関と同じように2つの価陽子が相関しながら崩壊する可能性がある。最近の理論研究によって示唆され、実験が始められている[2]。

[1] : M.V. Zhukov, et al., Physics Reports **231** (1993), 151

[2] : L.V. Grigorenko, et al., Phys. Rev. **C 80** (2009), 034602

Introduction



+ A=6系に存在する様々な2価核子相関

- ${}^6\text{Li}$

T=0の状態では、価陽子と価中性子が原子核内で局在して重陽子クラスターを作っており、 $\alpha+d$ の2体構造を持つ事が古くから知られている。

一方、T=1の場合は真空中でも陽子と中性子は束縛せず、核内でも重陽子クラスター構造を持たず、結果 ${}^6\text{Li}$ は $\alpha+p+n$ の3体構造を持つ。

- ${}^6\text{He}$ ($\alpha+n+n$, n : 中性子)

真空中では束縛しない2つの価中性子が空間的に局在している2中性子相関が理論研究から示唆されている。さらに、近年の不安定核の実験からは2価中性子の空間的密度分布が広がっている2中性子ハロー構造が存在する事が知られている [1]。

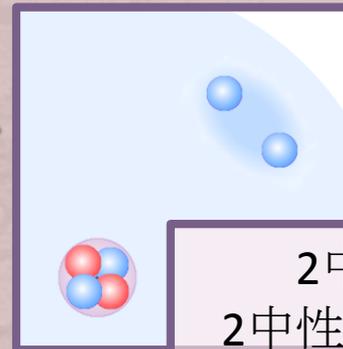
- ${}^6\text{Be}$ ($\alpha+p+p$, p : 陽子)

2中性子相関と同じように2つの価陽子が相関しながら崩壊する可能性がある。最近の理論研究によって示唆され、実験が始められている[2]。

[1] : M.V. Zhukov, et al., Physics Reports **231** (1993), 151

[2] : L.V. Grigorenko, et al., Phys. Rev. **C 89**(2009), 034602

Introduction



2中性子相関と
2中性子ハロー構造の
模式図

+ A=6系に存在する様々な2価核子相関

- ${}^6\text{Li}$

T=0の状態では、価陽子と価中性子が原子核内で局在して重陽子クラスターを作っており、 $\alpha+d$ の2体構造を持つ事が古くから知られている。

一方、T=1の場合は真空中でも陽子と中性子は束縛せず、核内でも重陽子クラスター構造は持たず、結果 ${}^6\text{Li}$ は $\alpha+p+n$ の3体構造を持つ。

- ${}^6\text{He}$ ($\alpha+n+n$, n : 中性子)

真空中では束縛しない2つの価中性子が空間的に局在している**2中性子相関**が理論研究から示唆されている。さらに、近年の不安定核の実験からは2価中性子の空間的密度分布が広がっている**2中性子ハロー構造**が存在する事が知られている [1]。

- ${}^6\text{Be}$ ($\alpha+p+p$, p : 陽子)

2中性子相関と同じように2つの価陽子が相関しながら崩壊する可能性がある。最近の理論研究によって示唆され、実験が始められている[2]。

[1] : M.V. Zhukov, et al., Physics Reports **231** (1993), 151

[2] : L.V. Grigorenko, et al., Phys. Rev. **C 89**(2009), 034602

Introduction

- + $A=6$ 系ではこのように様々な構造の共存現象が起こっている。これは、核子間の核力のアイソスピン状態依存性による。
- + わずか6個の核子が様々な構造をとる $A=6$ 系は多様な原子核構造が存在する原子核全体の縮図になっている。従って、 $A=6$ 系の様々な構造の共存現象を一つの模型で系統的に研究する事は、近年の不安定核の研究で様々な構造を持つ事がわかってきた高いアイソスピンを持つ原子核の理解につながるため重要である。
- + しかし、これまでの理論研究では、アイソスピン $T=0$ と $T=1$ の状態を同時に記述し、 $A=6$ 系の構造(束縛・共鳴エネルギーや崩壊幅等)を系統的に研究したものがない。
- + 本研究は $T=0$ と $T=1$ の状態を統一的に扱い、 $A=6$ 系の構造を系統的に初めて理解する事を目標とする。

Method

- + $A=6$ の系を扱う時には以下の2点に気をつける必要がある。
 - 特別な仮定無しに2価核子間の相対運動を正確に解く必要がある。
 - ▶ 核子-核子間の相互作用として有効相互作用ではなく**現実的核力**を用いた三体模型を採用する。
 - $A=6$ 系のほぼ全ての状態が共鳴状態であり、有限の時間で崩壊してしまう。そのため、この系を系統的に調べるためにはこの崩壊の境界条件を正確に取り扱う事の出来る枠組みが必要とされる。
 - ▶ そのような枠組みとして、複素座標スケールリング法 (Complex-scaling method : CSM) [3] を用いる。

これらの二つの方法を組み合わせ、
現実的核力とアイソスピン混合まで含めた
「複素座標スケールされた $\alpha+N+N$ 三体模型」
を本研究では採用する。

Method

+ 三体模型のハミルトニアン

$$H = \sum_{i=1}^3 t(\mathbf{r}_i) - T_G + V_{CN} + V_{NN} + V_{Coul} + V_{Pauli} + V_{\alpha NN}$$

V_{CN} : KKNN potential [4]

V_{NN} : AV8' (現実的核力) [5]

$V_{Pauli} = \lambda |0_{s1/2}\rangle \langle 0_{s1/2}|$ $\lambda = 10^6$

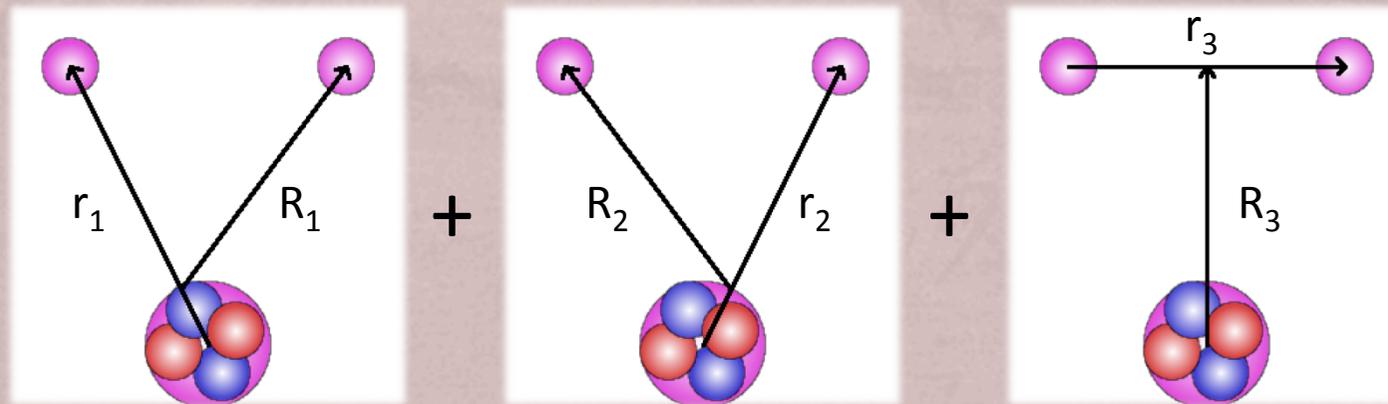
$V_{\alpha NN}$: Three-body force [6]

これらの2つのポテンシャルは各々のサブシステムの位相差を良く再現する。

α コアと価核子間のパウリ禁止状態を取り除く項。

3体関連の力。 ${}^6\text{Li}$ の基底状態のエネルギー固有値を合わせるようパラメータを決めている。

+ 波動関数



$$|\Phi\rangle = \sum D_q |[[\phi_{l_1}(\mathbf{r}_c), \phi_{l_2}(\mathbf{R}_c)]_L, \chi_S^\sigma]_J\rangle |\chi_T^T\rangle$$

$$\phi_{l_i}(\mathbf{r}) = N_{l_i}(a_i) r^l \exp\left(-\frac{1}{2} a_i r^2\right) Y_l(\hat{r})$$

3つの座標でガウス関数の重ね合わせで波動関数を用意し、それらを重ね合わせ模型空間を作る。

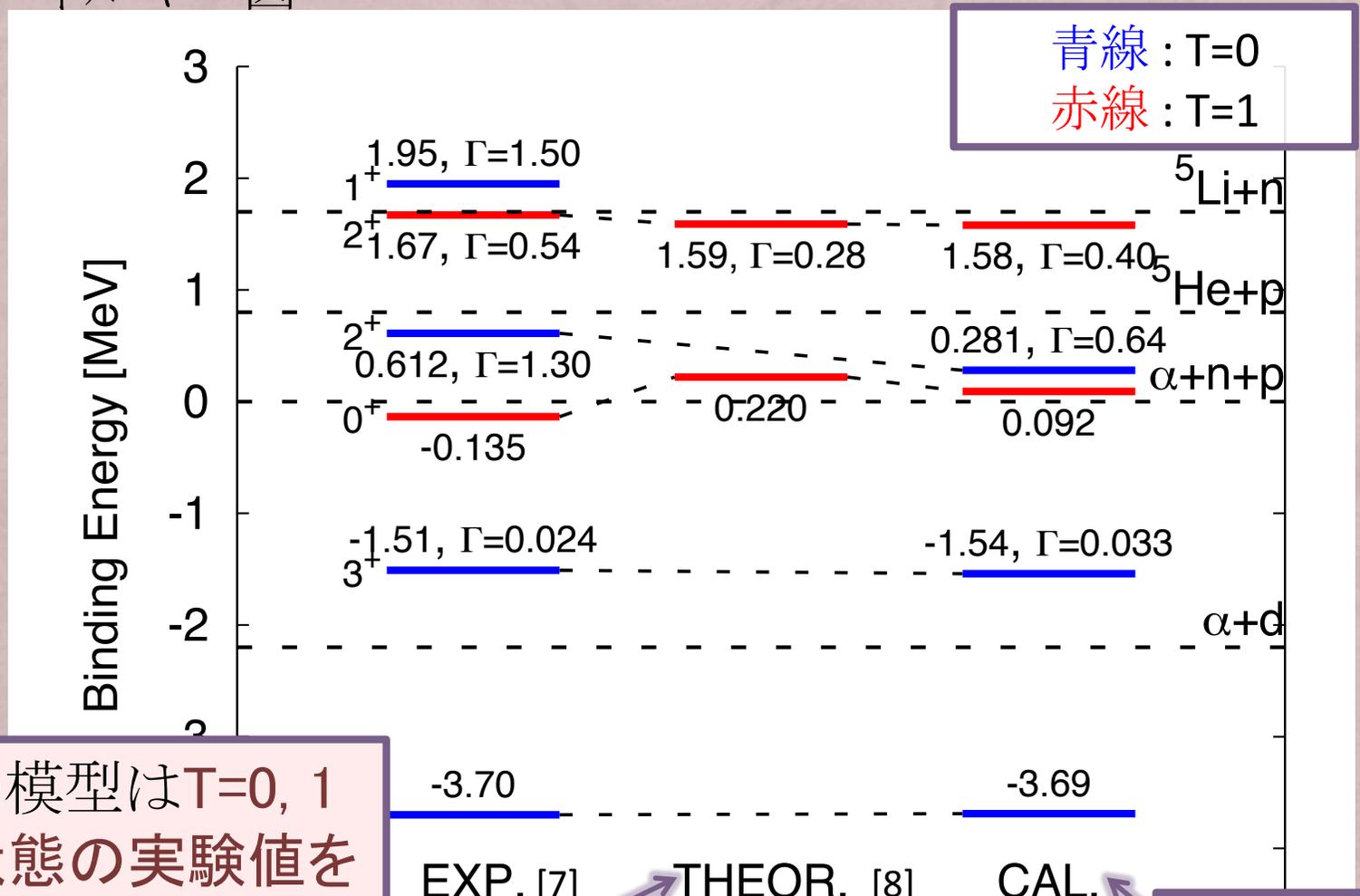
[4] : H. Kanada, et al., Prog. Theor. Phys. **61**(1979), 1327

[5] : B.S. Pudliner, et al., Phys. Rev. C. **56** (1997), 1720

[6] : T. Myo, et al. Phys. Rev. C **63** (2001), 54313

Results

+ ${}^6\text{Li}$ のエネルギー図



本研究のモデルはT=0, 1
 両方の状態の実験値を
 良く再現出来る事が
 確認できる。

比較対象
 崩壊幅を求めている
 先行理論の研究結果

本研究の結果

[7] : D. R. Tilley, et al., NPA. **708**(2002), 3
 [8] : A. Csóto, PRC **49**(1994), 3035

Introduction

- + T=0とT=1の状態を統一的に扱う \Rightarrow **アイソスピン混合**が起こる可能性
- + **アイソスピン混合**
 - ${}^6\text{Li}$ の2価核子はT=0とT=1の両方を組む事ができる。
 - ${}^6\text{Li}$ の低励起エネルギー領域にはT=0, 1の両方の状態が共存している。
 - このT=0とT=1の状態が**混合している可能性**がある。
 - 電磁気力と核力のアイソスピン対称性のわずかな破れにより起こる。
 - × ${}^6\text{Li}$ のT=1の状態は ${}^6\text{He}$ の基底状態(ハロー構造)のアナログ状態である。
 - × 対称性より空間的に広がった構造を取る可能性が高い。
 - × 長距離力である電磁気力によりアイソスピン混合が起こっている可能性がある
と期待される。なお、空間的に広がった構造に着目するため、核力のアイソスピン対称性の破れの影響は今回は考慮しない。
- + ${}^6\text{Li}$ はA=6系の中でも全アイソスピンT=0とT=1の状態が共存する系であるため、**アイソスピンに依存する様々な構造の共存現象を系統的に調べるのに適した系**である。
- + アイソスピン混合が ${}^6\text{Li}$ のT=0, 1各状態の構造に与える影響を調べる。

Results

+ ${}^6\text{Li}$ の各状態のアイソスピン混合の割合

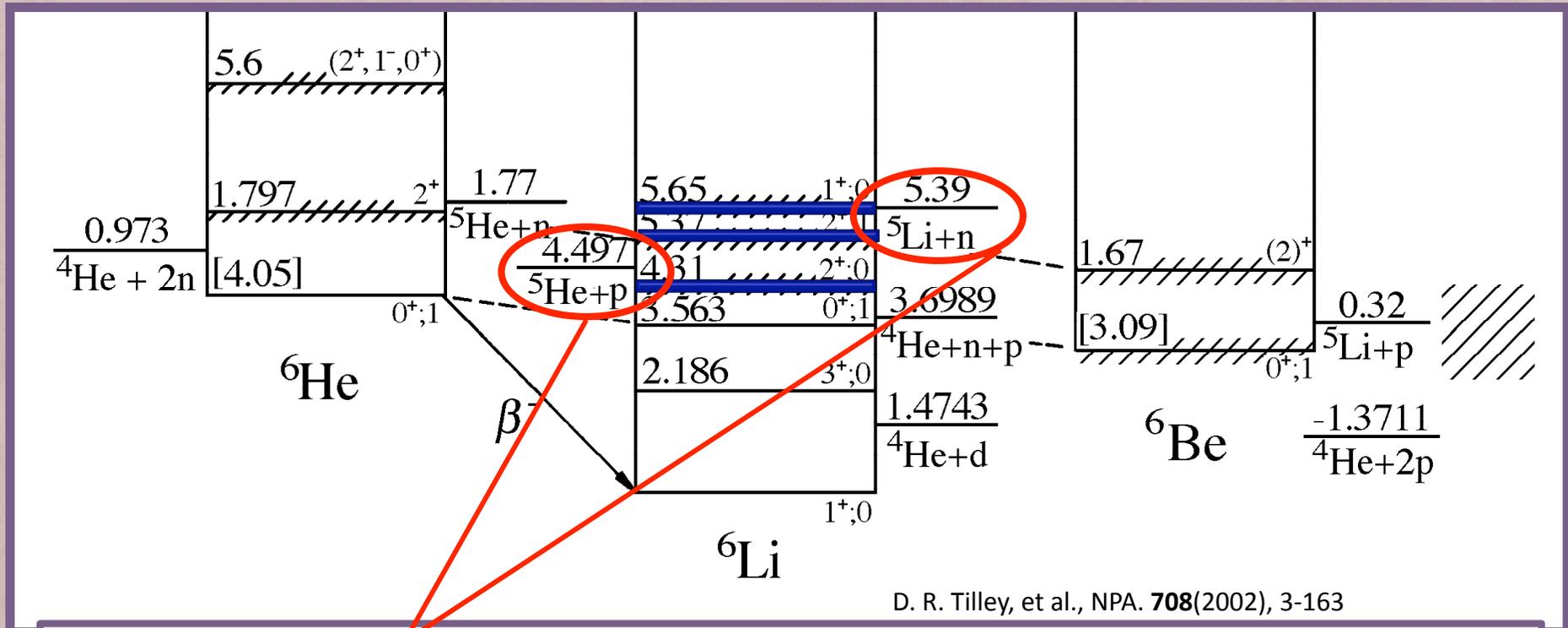
	T=0 component (%)		T=1 component (%)		total (%)
	real	imaginary	real	imaginary	
1^+ (T=0, our result)	99.99		0.01		100.00
3^+ (T=0, our result)	99.97	$+i7.33 \times 10^{-8}$	0.03	$-i7.33 \times 10^{-8}$	100.00
0^+ (T=1, our result)	0.12	$+i9.77 \times 10^{-8}$	99.88	$-i9.77 \times 10^{-8}$	100.00
(T=1, GSM result) [9]	0.5		99.5		100.00
2^+_{1} (T=0, our result)	99.83	$+i6.59 \times 10^{-6}$	0.17	$-i6.59 \times 10^{-6}$	100.00
2^+_{2} (T=1, our result)	-1.68	$-i1.96 \times 10^{-6}$	101.68	$+i1.96 \times 10^{-6}$	100.00

赤枠 : 実験から予測されているアイソスピンとは異なるアイソスピン成分の混合の割合 (%)
 青枠 : 比較のための先行研究の値

全ての束縛・低励起状態でアイソスピン混合の割合は低い

Introduction

+ ${}^6\text{Li}$ のアイソスピン混合を引き起こす他の要因



これらの崩壊チャンネルはアイソスピンの固有状態ではなく、電荷の固有状態である。従って、これらの崩壊チャンネルとのcouplingにより、 ${}^6\text{Li}$ の4~5MeV付近の共鳴状態では、アイソスピン混合が起こっている可能性がある。
 →連続状態のアイソスピン混合の影響も考える必要がある。
 アイソスピン混合を考慮に入れなければ、 ${}^5\text{He}+p$ と ${}^5\text{Li}+n$ の崩壊チャンネルの閾値を再現する事はできない(縮退してしまう)。

Method

+ Continuum Level Density (CLD)

漸近領域のハミルトニアンによる
Level Density

$$\rho_{\text{CLD}} = \left(\rho^{6\text{Li}} - \rho_0^{6\text{Li}} \right) - \left(\rho^{5\text{Li}-n} - \rho_0^{5\text{Li}-n} \right) - \left(\rho^{5\text{He}-p} - \rho_0^{5\text{He}-p} \right) - \left(\rho^{d-\alpha} - \rho_0^{d-\alpha} \right)$$

全系のハミルトニアンによる
Level Density

ここでは、連続状態のアイソスピン混合を調べるため
通常のCLDに対してアイソスピン射影を行い、

$$\rho^{T=0} = \text{Tr} \left[\frac{|\chi_{T=0}^{\tau}\rangle\langle\chi_{T=0}^{\tau}|}{E - \hat{H}} \right] = -\frac{1}{\pi} \Im m \left[\sum_i \frac{\langle\psi_i^{\theta}|\chi_{T=0}^{\tau}\rangle\langle\chi_{T=0}^{\tau}|\psi_i^{\theta}\rangle}{E - E_i^{\theta}} \right]$$

$$\rho_0^{T=0} = \text{Tr} \left[\frac{|\chi_{T=0}^{\tau}\rangle\langle\chi_{T=0}^{\tau}|}{E - \hat{H}_0} \right]$$

$$\rho^{T=1} = \text{Tr} \left[\frac{|\chi_{T=1}^{\tau}\rangle\langle\chi_{T=1}^{\tau}|}{E - \hat{H}} \right] = -\frac{1}{\pi} \Im m \left[\sum_i \frac{\langle\psi_i^{\theta}|\chi_{T=1}^{\tau}\rangle\langle\chi_{T=1}^{\tau}|\psi_i^{\theta}\rangle}{E - E_i^{\theta}} \right]$$

$$\rho_0^{T=1} = \text{Tr} \left[\frac{|\chi_{T=1}^{\tau}\rangle\langle\chi_{T=1}^{\tau}|}{E - \hat{H}_0} \right]$$

と定義する。

Method

+ Continuum Level Density (CLD)

各サブシステムの2体のみ(${}^5\text{Li}$, ${}^5\text{He}$, d)
が相互作用しているLevel Density

$$\rho_{\text{CLD}} = \underbrace{(\rho^{6\text{Li}} - \rho_0^{6\text{Li}})}_{\text{3体全系のハミルトニアンによる Level Density}} - \underbrace{(\rho^{5\text{Li}-n} - \rho_0^{5\text{Li}-n})}_{\text{}} - \underbrace{(\rho^{5\text{He}-p} - \rho_0^{5\text{He}-p})}_{\text{}} - \underbrace{(\rho^{d-\alpha} - \rho_0^{d-\alpha})}_{\text{}}$$

ここでは、連続状態のアイソスピン混合を調べるため
通常のCLDに対してアイソスピン射影を行い、

$$\rho^{T=0} = \text{Tr} \left[\frac{|\chi_{T=0}^{\tau}\rangle\langle\chi_{T=0}^{\tau}|}{E - \hat{H}} \right] = -\frac{1}{\pi} \Im m \left[\sum_i \frac{\langle\psi_i^{\theta}|\chi_{T=0}^{\tau}\rangle\langle\chi_{T=0}^{\tau}|\psi_i^{\theta}\rangle}{E - E_i^{\theta}} \right]$$

$$\rho_0^{T=0} = \text{Tr} \left[\frac{|\chi_{T=0}^{\tau}\rangle\langle\chi_{T=0}^{\tau}|}{E - \hat{H}_0} \right]$$

$$\rho^{T=1} = \text{Tr} \left[\frac{|\chi_{T=1}^{\tau}\rangle\langle\chi_{T=1}^{\tau}|}{E - \hat{H}} \right] = -\frac{1}{\pi} \Im m \left[\sum_i \frac{\langle\psi_i^{\theta}|\chi_{T=1}^{\tau}\rangle\langle\chi_{T=1}^{\tau}|\psi_i^{\theta}\rangle}{E - E_i^{\theta}} \right]$$

$$\rho_0^{T=1} = \text{Tr} \left[\frac{|\chi_{T=1}^{\tau}\rangle\langle\chi_{T=1}^{\tau}|}{E - \hat{H}_0} \right]$$

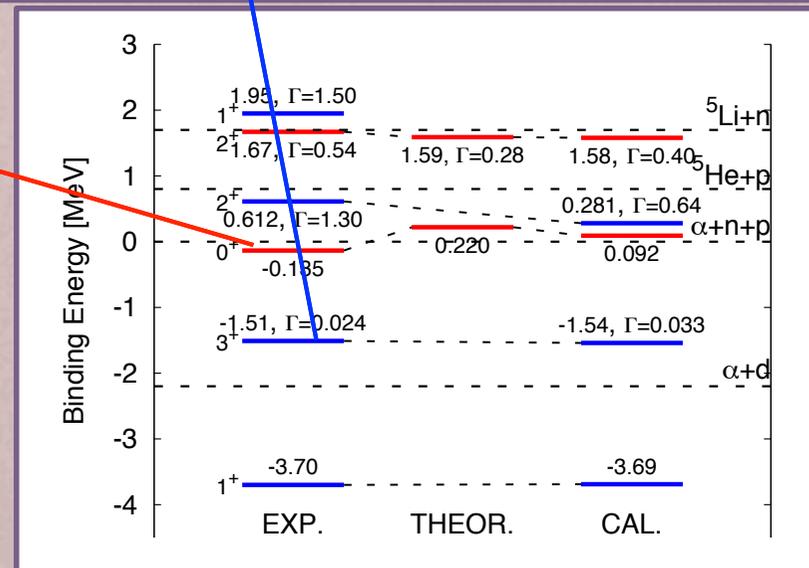
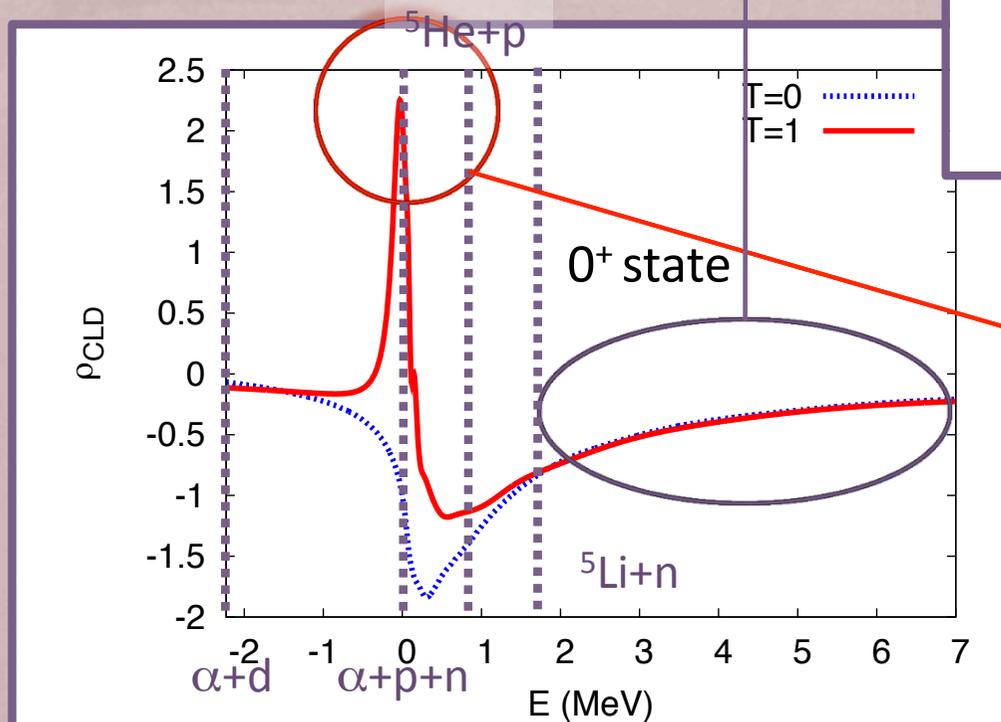
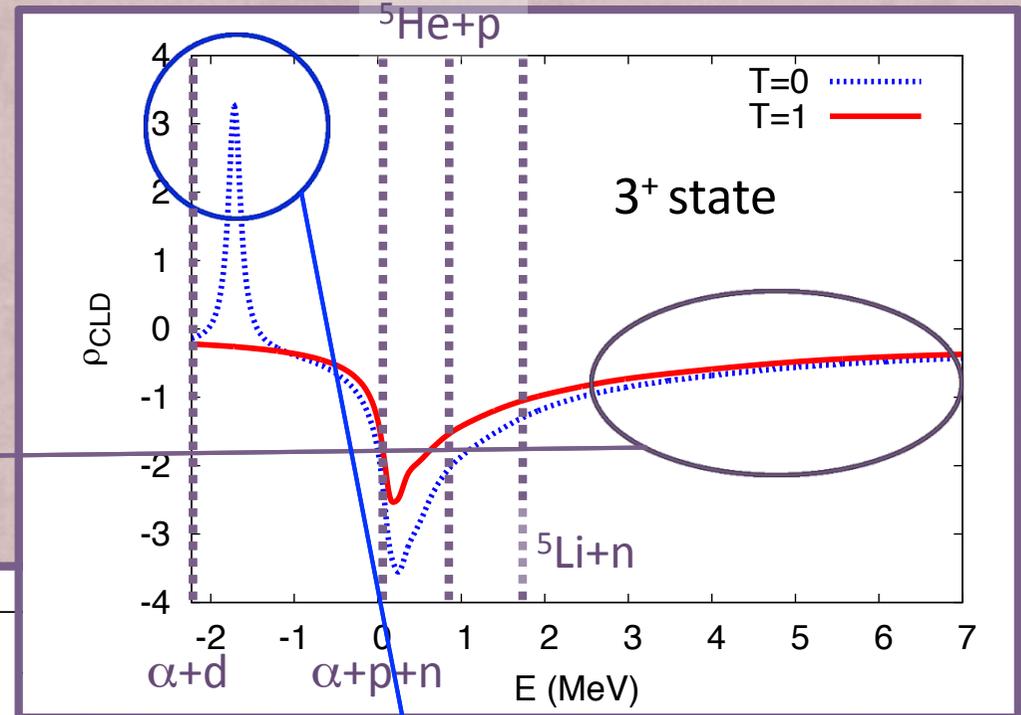
と定義する。

Results

+ CLDの結果 (3^+ and 0^+ states)

0^+ と 3^+ のピークはそれぞれ対応するアイソスピンではっきりと確認する事が出来る。

また、連続状態においてはアイソスピン混合の度合いが強い可能性がある。

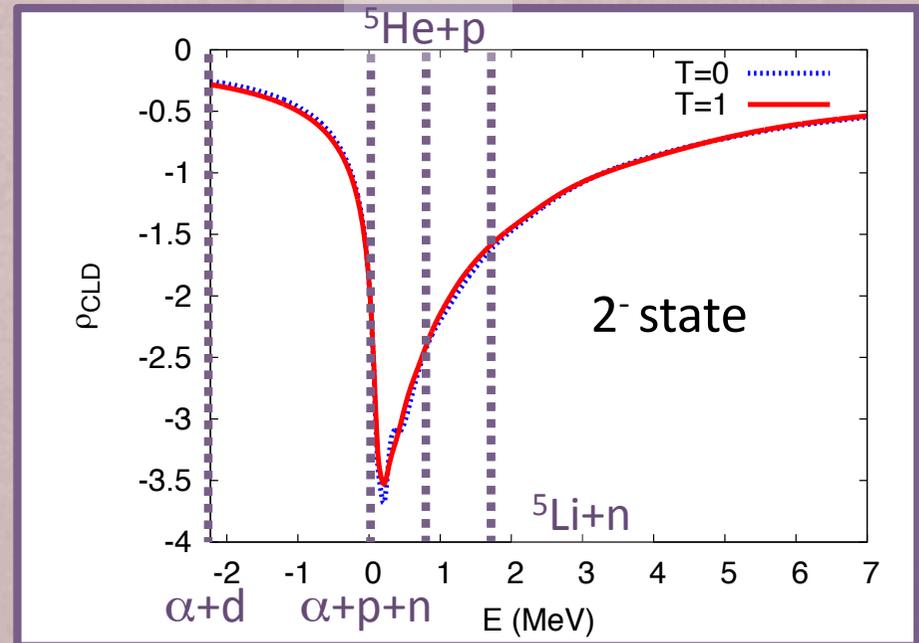
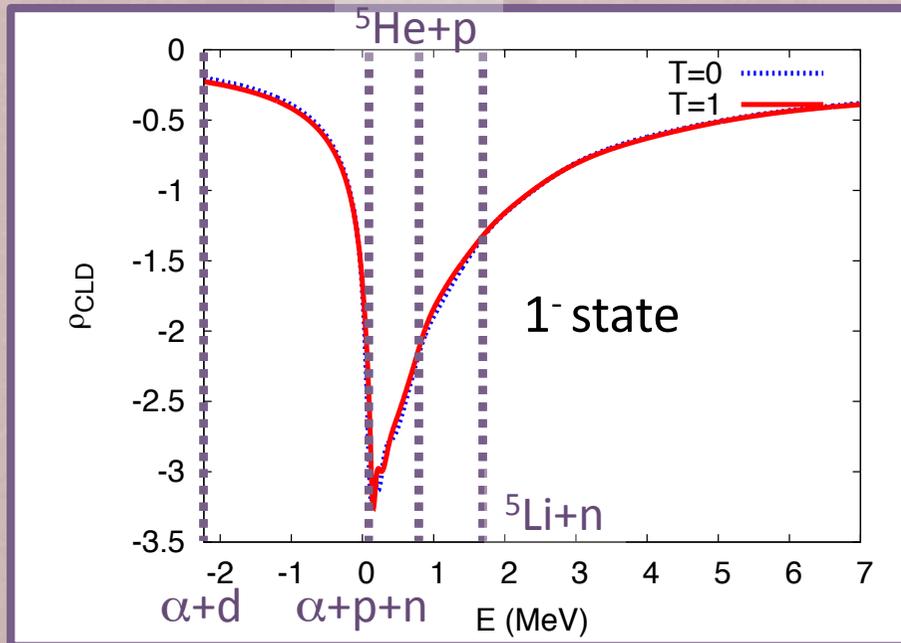
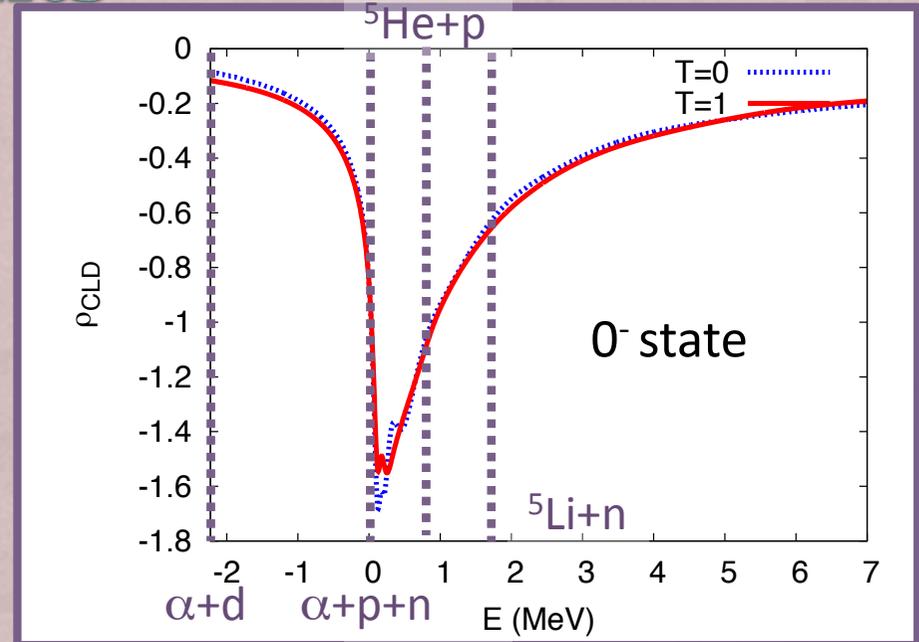


Results

+ CLDの結果 (odd parity states)

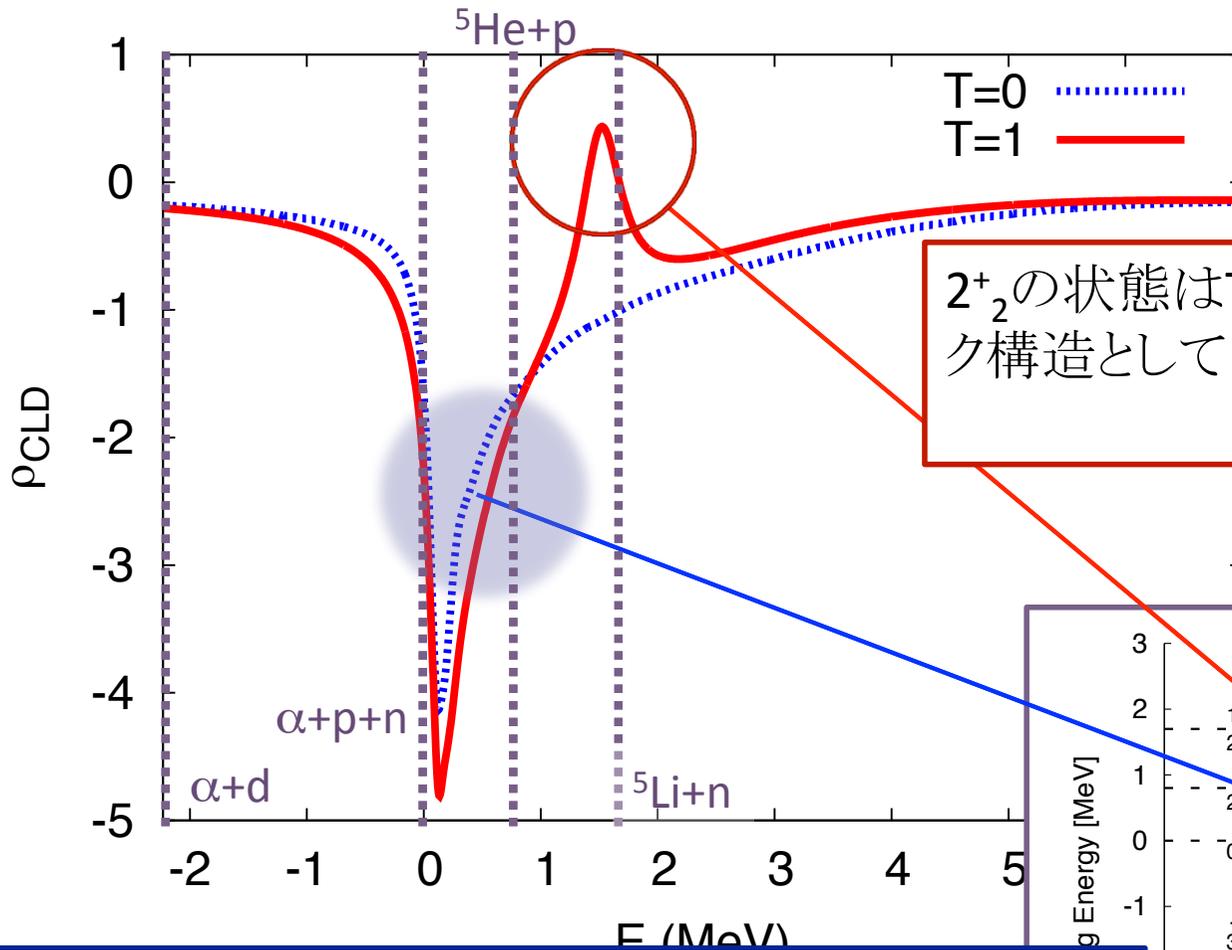
${}^6\text{Li}$ のT=0状態のパリティ2重項として存在する可能性のある**負パリティ状態**についてもCLDを計算した。

これらの状態のCLDには、ピーク構造は見られなかった。また、これらの状態ではT=0とT=1のCLDの間にほとんど違いが見られなかった。



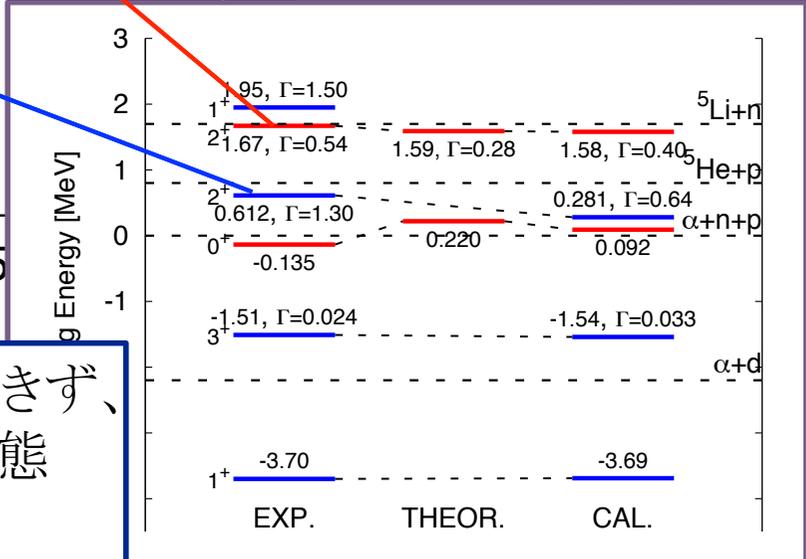
Results

+ CLDの結果 (2^+ states)



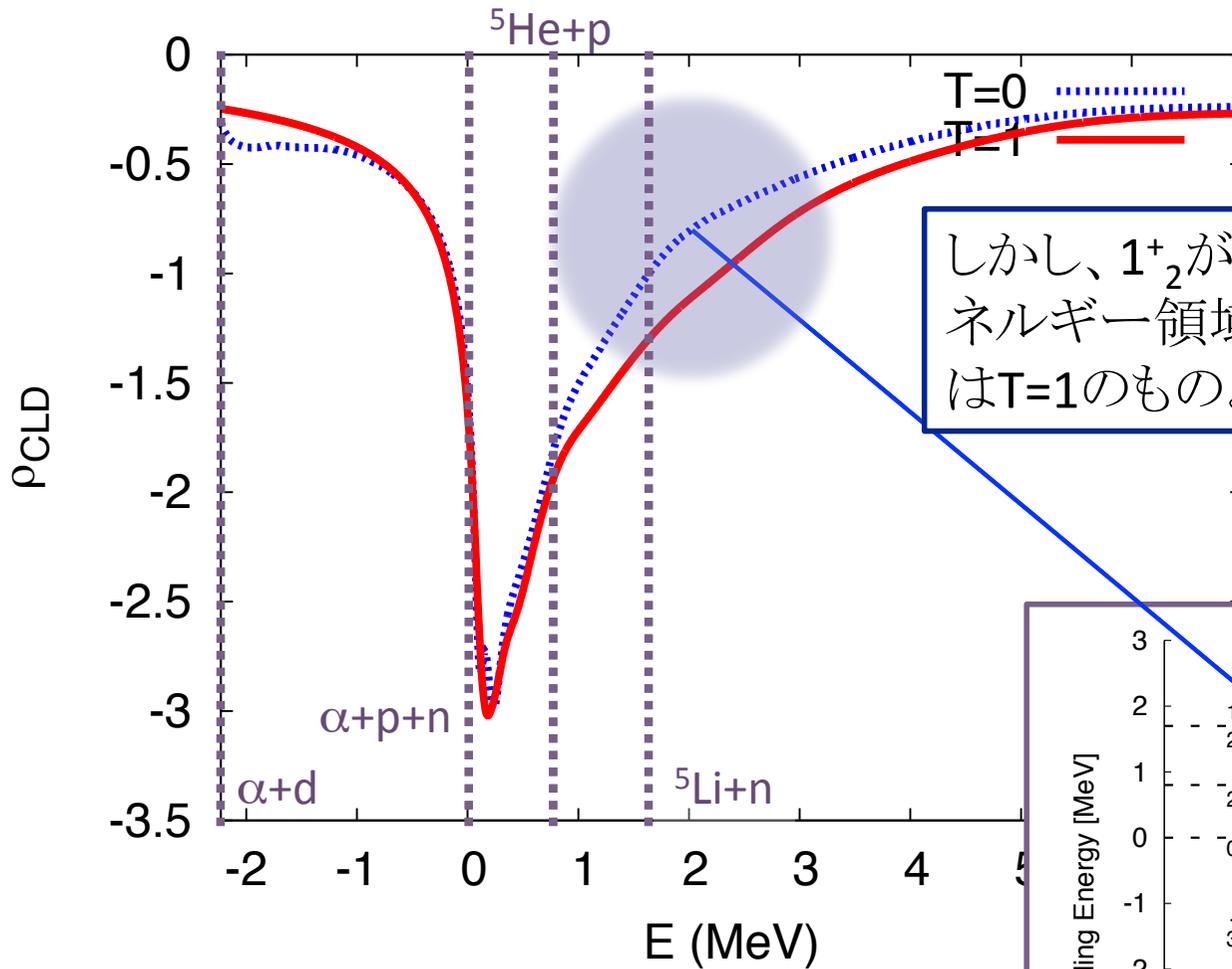
2^+_2 の状態はT=1のCLDにおいてピーク構造としてはっきりと確認できる。

一方、幅の広い 2^+_1 の状態はピークとしては確認できず、対応するエネルギー領域において、T=1の連続状態からのT=0の状態のずれとして確認される。



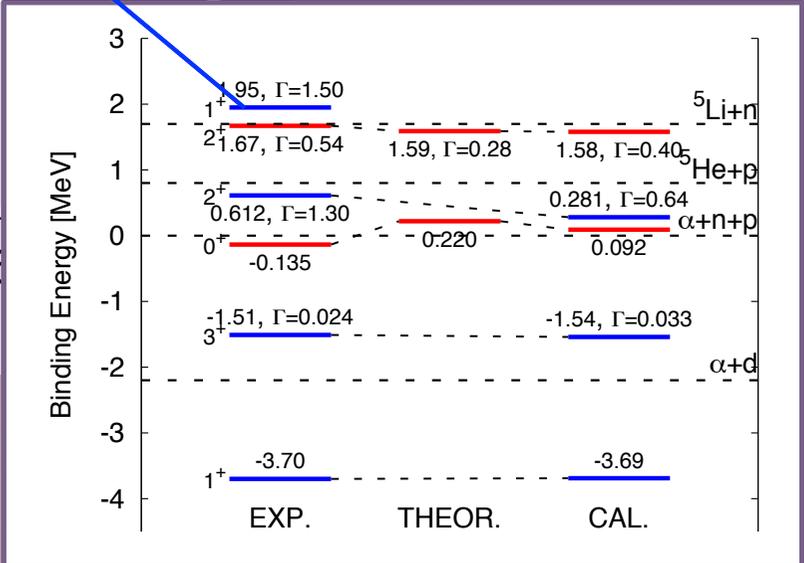
Results

+ CLDの結果 (1^+ states)



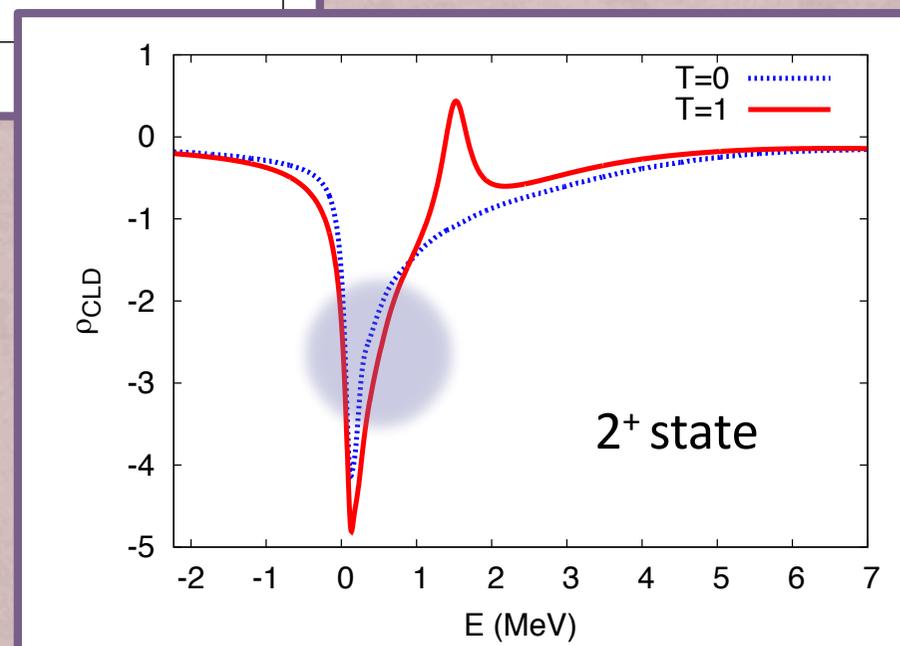
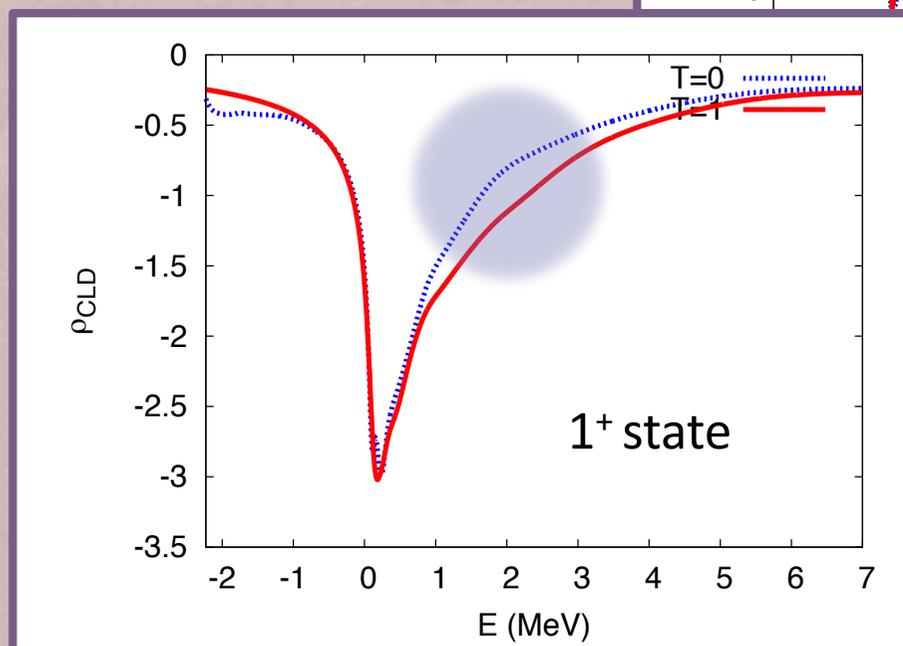
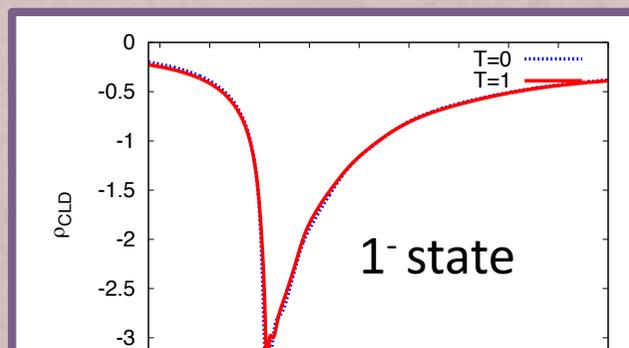
しかし、 1^+_{2} が存在すると考えられるエネルギー領域において、CLDの成分はT=1のものよりもT=0の方が大きい。

1^+_{2} 状態もまた、明らかなピーク構造としては特定する事が出来ない。



Results

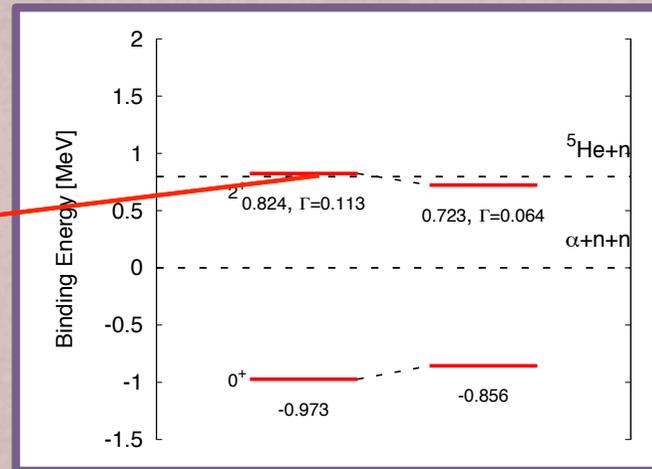
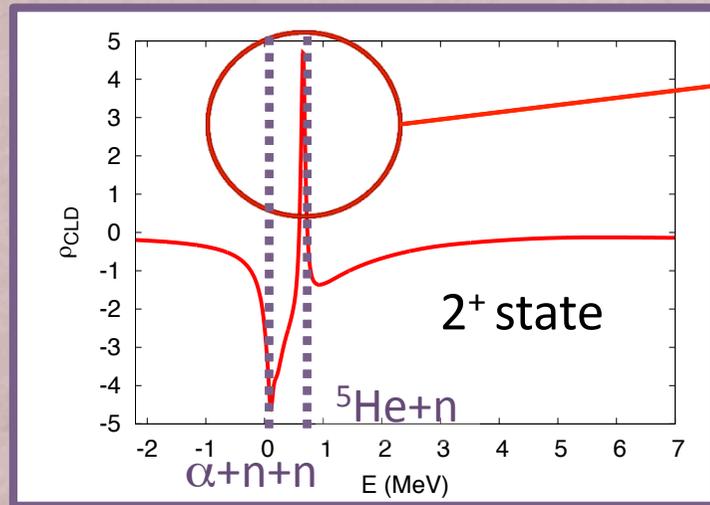
+ CLDの結果の比較 (odd parity states V.S. 1^+ and 2^+ states)



構造のない負パリティのCLDと比較すると、幅の広い 1^+_2 と 2^+_1 の状態はCLDのT=0とT=1成分の大きさに差が現れる、という構造として特定が可能である。

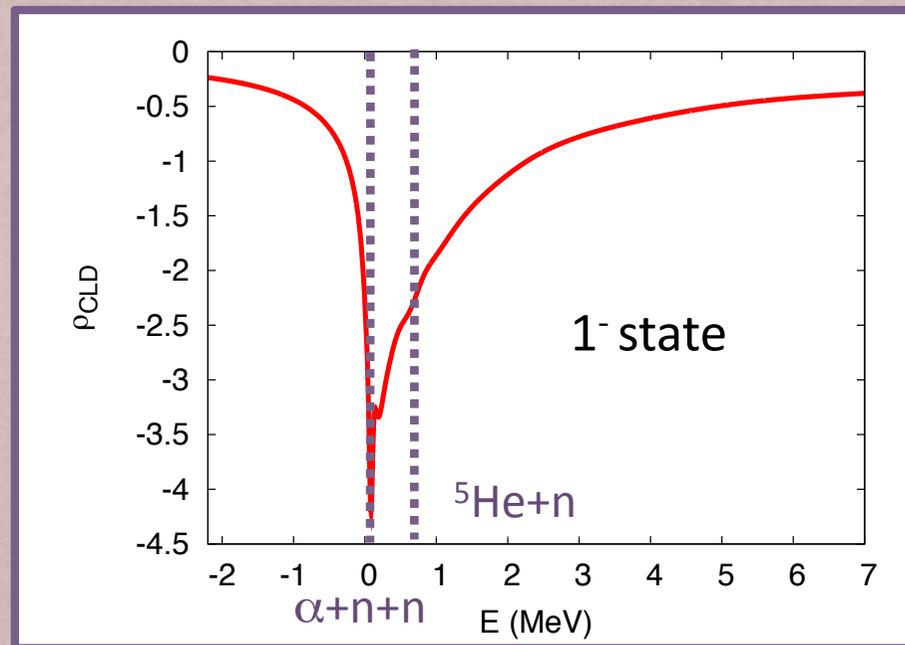
Results

+ ${}^6\text{He}$ におけるCLD



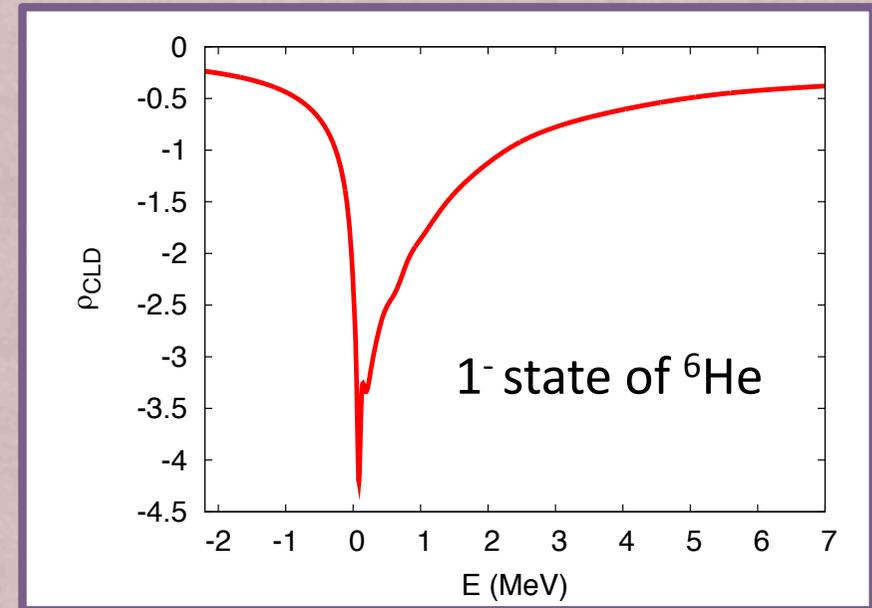
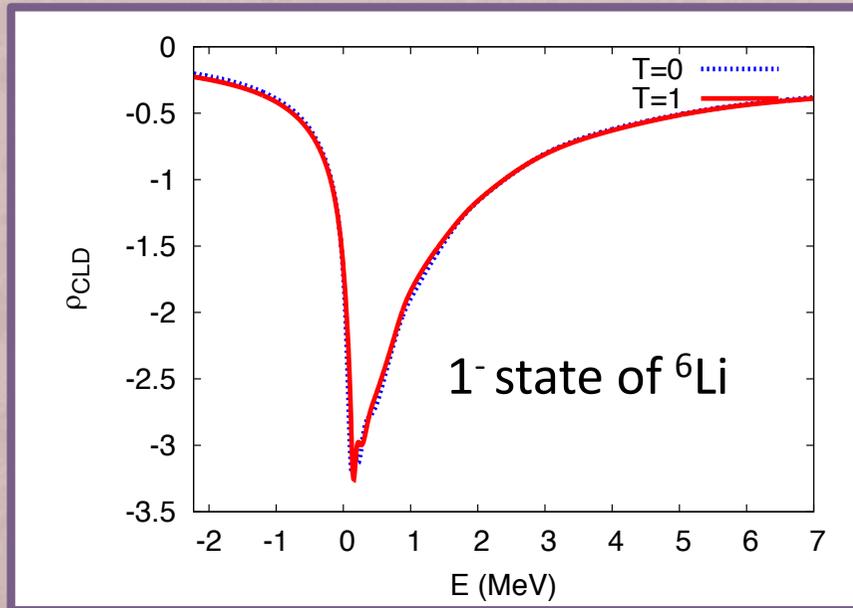
CLDは ${}^6\text{He}$ の系にも適用する事ができ、 2^+ 状態をピーク構造として特定できる。

${}^6\text{He}$ の 1^- 状態(ソフトダイポールに対応する状態)について計算したCLDは構造を持っていないように見える。



Results

+ CLDの結果の比較 (1^- state of ${}^6\text{Li}$ v.s. 1^- states of ${}^6\text{He}$)



比較を行うと、 ${}^6\text{He}$ の 1^- 状態のCLDの形状は構造のない ${}^6\text{Li}$ の負パリティのCLDと類似しており、ソフトダイポールに対応する ${}^6\text{He}$ の 1^- 状態をCLDの方法で見つける事は出来なかった。

Summary

- + 本研究では現実的核力と複素スケールされた三体模型を用いて、全アイソスピンTの取り方に依存して異なるA=6系の構造を調べた。
- + まず ${}^6\text{Li}$ の束縛、低励起状態のエネルギー固有値の計算を行い、実験値との比較を行うことで、**本研究の模型が ${}^6\text{Li}$ のT=0, 1の両方の状態の構造を統一的によく再現できる模型である事を確かめた。**
- + また、アイソスピン対称性の破れの核構造への影響を考慮するために、 ${}^6\text{Li}$ の各状態のアイソスピン混合の度合いについても調べた。結果、**束縛・共鳴状態ではアイソスピン混合がほとんど起こらないことがわかり、CLDの結果からは連続状態において大きなアイソスピン混合が起こる可能性があることが示唆された。**
- + **アイソスピン射影をした3体CLDの計算から、幅の狭い $0^+, 2^+, 3^+$ 状態はピーク構造を持ち、幅の広い $2^+, 1^+$ 状態においても、連続状態からのずれ(T=0とT=1のCLDのずれ)として、その存在が確認された。**
- + ${}^6\text{Li}$ のT=0の状態が $\alpha+d$ の2体クラスター構造を持つとすると、**パリティ2重項として現れると考えられる負パリティ状態はCLDの方法においては見つからなかった。**
- + ${}^6\text{He}$ に関してもCLDを適用し、 2^+ のピークを確認した。一方、ソフトダイポールとして現れると考えられる 1^- 状態については、CLDでは構造が見えなかった。