#### <sup>11</sup>Liのフェッシュバッハ共鳴(と<sup>22</sup>Cのファノ共鳴)

第3回 レーザー量子・原子核合同 MONTHLY MEETING



Osaka City University & NITEP / RCNP, Osaka University

### 基本事項1: 非活性近似



- ・<sup>6</sup>He原子核(陽子2つ+中性子4つ)を考える。
- ・エネルギー準位を見ると、基底状態は4He+n+nの 閾値のわずか0.973MeV下にある。
   ※原子核の典型的な束縛エネルギーは核子あたり 8 MeV.
- ・<sup>6</sup>He原子核は<sup>4</sup>He+*n*+*n*の3体模型で記述できると期待 される。→ <sup>4</sup>He ( $\alpha$ 粒子)は非活性(inert)とみなす。 ※これを支えるのは、 $\alpha$ の束縛エネルギーの深さ。
- ・<sup>8</sup>Be原子核(陽子4つ+中性子4つ)を考える。
- ・αは固いので、α+αという2体模型が機能すると 期待される。閾値との関係もこれを支持。

#### 基本事項2: 束縛状態近似

岡部成玄,『量子論―運動と方法』 (近代科学社, 1992) p.248.



 $\alpha + \alpha$  散乱の共鳴状態 ( $l=0, E_r \approx 0.09188$  MeV,  $\Gamma \approx 6 \times 10^{-6}$  MeV) の位相 差  $\delta' = \delta - \sigma$  ( $\sigma$  は  $2 - \sigma \sim 10^{-6}$  MeV) の位相差).  $\sigma = -\nu \sim 2000$  共鳴曲線は, ほとんど虫 なり、この図では区別できない、図 6.19 の説明も見よ.

- ・<sup>8</sup>Be"原子核"はα + α閾値の上にある。
- ・波動関数は無限に広がっている。



波動関数 (漸近領域で2Gi となる)。ポテンシャル V は 500 倍 (MeV 単位) してある. クーロン障壁の内側と外側とで, 振幅がおよそ 100 倍違う. √E/F に ほぼ対応している.

- ・<sup>8</sup>Beという"原子核"を特徴づけているのは 内側の波動関数である。
  - → 束縛状態近似

#### フェッシュバッハ共鳴



鈴木徹氏の解説記事(『原子核研究』)より

・入射エネルギー E またはハミルトニアン ( $\rightarrow E_R$ )を変更して共鳴( $E = E_R$ )を探す。



基本事項3: ボロミアンハロー

I. Tanihata+, PRL 55, 2676 (1985).





※9Liが非活性かどうかは非自明(だが問わない)

#### 基本事項4:3体(構造)問題の解法と解

・3体系の重心運動を正しく抜いたシュレディンガー方程式

 $[T_{\boldsymbol{r}} + T_{\boldsymbol{y}} + V_{cn}(r_1) + V_{cn}(r_2) + V_{nn}(y)] \Phi(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{y}) = \varepsilon \Phi(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{y}) \left[ \bigcup \mathcal{E} h \Phi(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{y}) = \varepsilon \Phi(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{y}) \right]$ 

・波動関数を、有限の空間で減衰する基底関数で展開し、固有値方程式を解く(対角化)。



- ・閾値の上にある状態は、束縛状態近似で
   求めた連続状態の波動関数とみなされる。
   = 擬状態(PseudoState)
- ・各擬状態が3体系のどのような状態なのか を分類するのは難しい。
- ・複素スケーリング法を用いて分析。

$$oldsymbol{x} 
ightarrow oldsymbol{x} e^{i heta}$$

#### <sup>11</sup>Liの連続状態: ボロミアンフェッシュバッハ共鳴

・複素スケーリングしたハミルトニアンの対角化

$$h^{\theta}\Phi^{\theta}\left(\boldsymbol{r},\boldsymbol{y}\right)=\varepsilon^{\theta}\Phi^{\theta}\left(\boldsymbol{r},\boldsymbol{y}\right)$$

 ${}^{9}\text{Li}+n+n$  nonresonant continuum  $^{10}\text{Li}+n$  bound and continuum states 0  $2\theta_{\rm c}$ -0.05 (0.42, -0.14)-0.1  $\operatorname{Re}[\alpha_n^{\theta_c}] > 0.9$ -0.15 -0.2 <u>ω</u> -0.25 (0.46, -0.18)م ۳ (MeV ش × II POHICSONAIT CONTINUUM  $\operatorname{Re}[\alpha_n^{\theta_c}] \sim 0$  $^{10}$ Li+*n* threshold (Closed Channel) 0.42  $\operatorname{Re}[\alpha_n^{\theta_c}] = 0.92$ -0.3 -0.35  ${}^{9}\text{Li}+n+n$  threshold 0.0 -0.4 [\_\_\_\_\_ 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8  $Re[\varepsilon]$  [MeV]

・(<sup>9</sup>Li+n)とnの散乱は(たぶん)測定不可能

T. Matsumoto, KO, J. Tanaka, arXiv:1711.07209.

#### 第4の粒子の重要性



- ・フェッシュバッハ共鳴をもつ系の束縛状態から出発することで、系の構成
   粒子同士の散乱を測れない問題が解決。
  - ・非弾性散乱のスペクトルを測ることで、共鳴エネルギーのスキャンが可能
     (共鳴系の入射エネルギーの変更と同等)。

#### 基本事項5: チャネル結合反応計算

 $[T_{\mathbf{R}} + U + h - E] \Psi(\mathbf{r}, \mathbf{y}, \mathbf{R}) = 0$  $\Psi\left(\boldsymbol{r},\boldsymbol{y},\boldsymbol{R}\right) = \Phi_{0}\left(\boldsymbol{r},\boldsymbol{y}\right)\chi_{0}\left(\boldsymbol{R}\right) + \Phi_{1}\left(\boldsymbol{r},\boldsymbol{y}\right)\chi_{1}\left(\boldsymbol{R}\right) + \dots = \sum \Phi_{c}\left(\boldsymbol{r},\boldsymbol{y}\right)\chi_{c}\left(\boldsymbol{R}\right)$  $\Phi_{c}^{*}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{y})\left[T_{R}+U+h-E\right]\sum_{c'}\Phi_{c'}\left(\boldsymbol{r},\boldsymbol{y}\right)\chi_{c'}\left(\boldsymbol{R}\right)=0$ 境界条件  $\int \Phi_{c}^{*}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{y}) \Phi_{c'}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{y}) d\boldsymbol{r} d\boldsymbol{y} = \delta_{c'c} \qquad \text{Open: 内向き波}$ - S×外向き波  $\int \Phi_{c}^{*}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{y}) U \Phi_{c'}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{y}) d\boldsymbol{r} d\boldsymbol{y} \equiv U_{c'c}(\boldsymbol{R}) \quad \text{Closed: } \ensuremath{\overline{\mathbf{x}}} \ensuremath{\overline{\mathbf{x}}} \ensuremath{\overline{\mathbf{x}}}$ 緒方が解いている式  $[T_{R} + U_{cc}(\boldsymbol{R}) + \varepsilon_{c} - E] \chi_{c}(\boldsymbol{R}) = -\sum_{\boldsymbol{r}} U_{cc'}(\boldsymbol{R}) \chi_{c'}^{\boldsymbol{r}}(\boldsymbol{R})$ 

### <sup>11</sup>Li(p,p') at 6 A MeV に現れるフェッシュバッハ共鳴

断面積のピークとして観測される。 (ただしピークの全てがフェッシュバッハ共鳴の寄与ではない)

T. Matsumoto, KO, J. Tanaka, arXiv:1711.07209.



離散化された連続状態への断面積が 得られる。これをエネルギーについて 連続化した結果。 <sup>9</sup>Li+*n*+*n*の重心の散乱角度分布。励起 エネルギーについてはピーク付近を積 分。

#### 基本事項6:ファノ共鳴



- ✓ In nuclear physics, we always have  $\delta_{bg}$ .
- $\checkmark$  There are many examples of this effect in many research fields.
- ✓ In most cases, this effect is observed as small changes in the resonance energy and width.

## **BGP effect on the DDBUX**



✓  $\varepsilon \& \theta_P$ : set experimentally ✓ *l*: incoherent (BGP exists)



# <sup>22</sup>Cの連続状態の分析



✓ The complex-scaling method classifies the continuum states of  $^{22}$ C.

J. Aguilar and J. M. Combes, Comm. Math. Phys. 22, 269 (1971);
 E. Balslev and J. M. Combes, ibid. 22, 280 (1971).

# <sup>22</sup>Cの連続状態の分析



✓ The complex-scaling method classifies the continuum states of  $^{22}$ C.

J. Aguilar and J. M. Combes, Comm. Math. Phys. 22, 269 (1971);
 E. Balslev and J. M. Combes, ibid. 22, 280 (1971).

# DDBUX of <sup>22</sup>C by <sup>12</sup>C



*How are these resonances observed?* 

\*T. Matsumoto et al., PRC 82, 054602(R) (2010) [new smoothing method].





✓ The narrow peak around 0.8 MeV is due to the  $2_1^+$  resonance of  ${}^{22}C$ . ✓ The shape of the  $0_2^+$  resonance is due to background phase effect.

## **BGP effect on the DDBUX**



 $\checkmark$  The BGP effect is indeed sizable.

- ✓ We have a variety of patterns of the resonant (and  $0^+$ ) cross section.
- ✓ Appear in only the  $0^+$  state

# Why so large BGP effect?



✓ In a core + *n* system, this will hardly be realized.

✓ This resonant-nonresonant 0<sup>+</sup> coexistence is expected for (s-wave) twoneutron halo nuclei generally.

#### まとめ

- ・(一部の)ボロミアンハロー核の励起状態には、特徴的な共鳴状態が 発現する。
- <sup>11</sup>Liのフェッシュバッハ共鳴は、3体バラバラの閾値から見ると開いた
   チャネルにあり、<sup>10</sup>Li(<sup>9</sup>Liとnの共鳴)とnの閾値から見ると閉じたチャネル
   にある。
- ・別粒子との非弾性散乱を用いることで、<sup>11</sup>Liのフェッシュバッハ共鳴が 観測可能。非弾性散乱はエネルギースキャンに相当する。 ※実は<sup>11</sup>Beの3/2<sup>+</sup>状態もフェッシュバッハ共鳴かも??
- ・<sup>22</sup>Cの0<sub>2</sub><sup>+</sup>共鳴は非共鳴成分と強く混ざり、ファノ共鳴の様相を呈する。
- ・非弾性散乱を用いると、<sup>22</sup>C系全体の散乱角度という新たな自由度が 持ち込まれ、ファノ共鳴の様々な形が"観測"される可能性がある。