

Isospin symmetry breaking effects in $X(3872)$ and η_{c2}



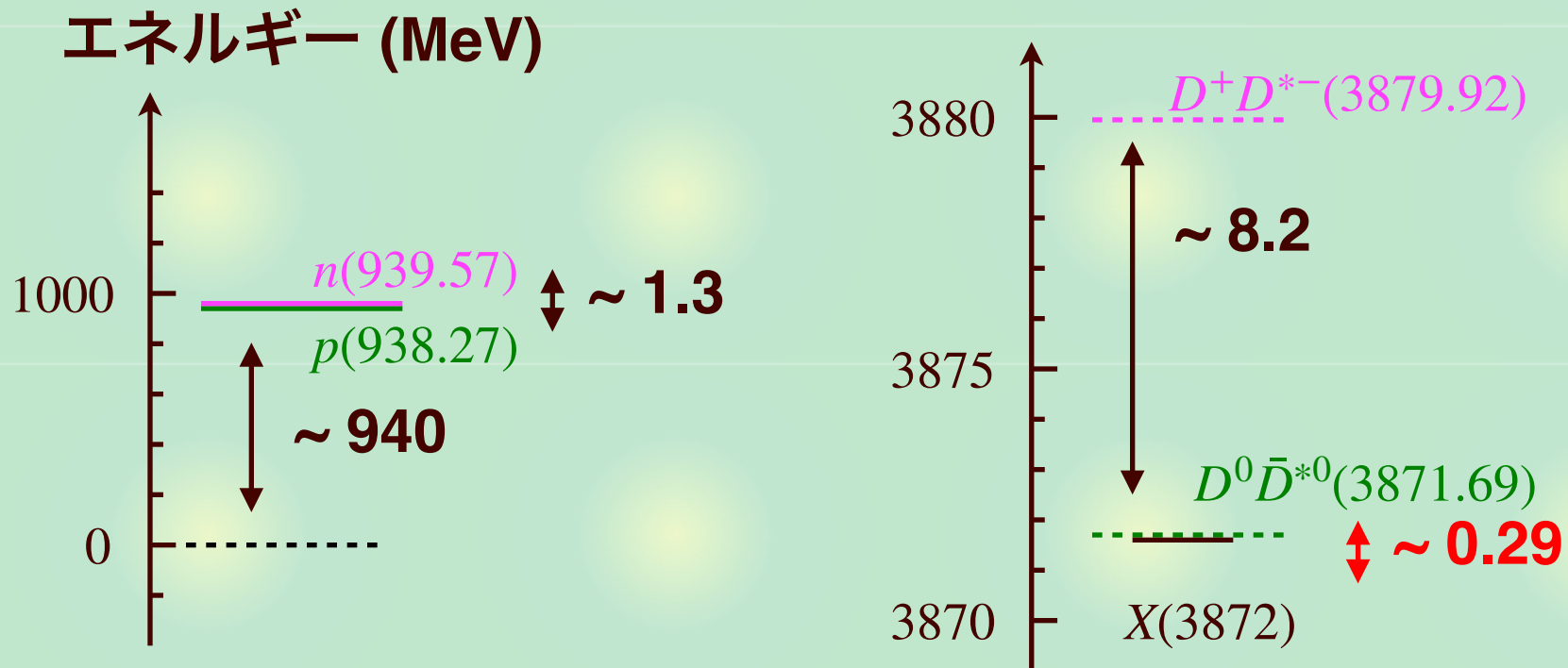
Matthew Bradshaw^{A,B}, 兵藤 哲雄^B

University of Connecticut^A, RCNP, The University of Osaka^B

2026, Sep. 15th ₁

アイソスピン対称性の破れ

アイソスピン対称性は近似的によく成立（数MeV程度の破れ）



- 核子：質量（940 MeV）に対し1.3 MeV
- $X(3872)$ ：束縛エネルギー（**0.29 MeV**）に対し8.2 MeV

閾値近傍の固有状態ではアイソスピンの破れが**無視できない**

$X(3872)$ と η_{c2}

$X(3872)$ におけるアイソスピン対称性の破れ

$$\text{Br}(X(3872) \rightarrow \rho J/\psi) = 3.4 \pm 1.1 \% , \quad \text{Br}(X(3872) \rightarrow \omega J/\psi) = 5.0 \pm 1.9 \%$$

← 中性チャンネルの複合性が支配的： $X_0 \gg X_c$

D. Gamermann, J. Nieves, E. Oset, E. Ruiz Arriola, PRD 81, 014029 (2010);

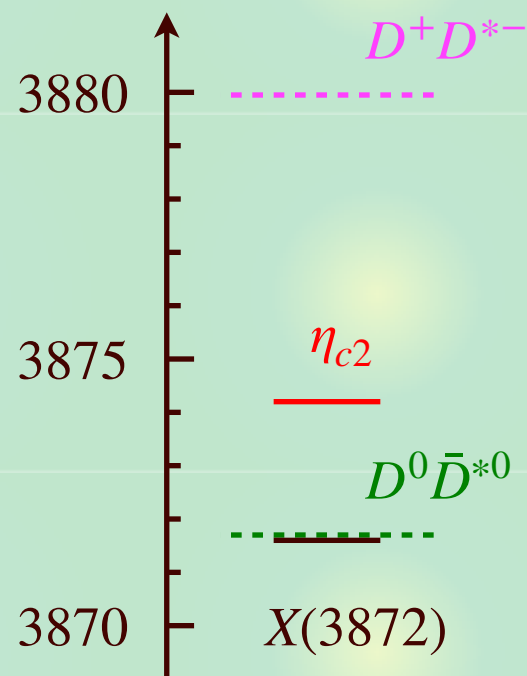
T. Kinugawa, T. Hyodo, PRC 109, 045205 (2024);

J. Song, L.R. Dai, E. Oset, PRD 108, 114017 (2023)

$\eta_{c2} : J^{PC} = 2^{-+}$ (未発見)

- $X(3872)$ に加えて η_{c2} も $D\bar{D}^*$ 閾値近傍に存在

S.X. Nakamura, PRD 113, 114031 (2026)



疑問

- η_{c2} に対するアイソスピンの破れの効果は？

- $X(3872)$ はs波、 η_{c2} はp波で $D\bar{D}^*$ に結合

ハミルトニアンと複合性

$c\bar{c}$ 状態 $|\psi_0\rangle$ と結合する $D^0\bar{D}^{*0}$ 状態 $|p,0\rangle$ と D^+D^{*-} 状態 $|p,c\rangle$

V. Baru, *et al.*, PLB 586, 53 (2004); T. Hyodo, PRC 90, 055208 (2014)

$$\begin{pmatrix} M_0 & V & V \\ V & p^2/(2\mu_0) & 0 \\ V & 0 & p^2/(2\mu_c) + \Delta \end{pmatrix} |\Psi\rangle = E |\Psi\rangle, \quad |\Psi\rangle = \begin{pmatrix} c |\psi_0\rangle \\ \int d\mathbf{q} \chi_0(\mathbf{q}) |\mathbf{q}, 0\rangle \\ \int d\mathbf{q} \chi_c(\mathbf{q}) |\mathbf{q}, c\rangle \end{pmatrix}$$

離散固有状態（極）の固有エネルギー E_h

$$E_h - M_0 - \Sigma_0(E_h) - \Sigma_c(E_h) = 0$$

複合性（散乱チャンネル ($i = 0, c$) の重み) X_i と素粒子性 Z

T. Kinugawa, T. Hyodo, EPJA 61, 154 (2025)

$$X_i = \int d\mathbf{q} \langle \widetilde{\Psi} | \mathbf{q}, i \rangle \langle \mathbf{q}, i | \Psi \rangle = \frac{-\Sigma'_i(E)}{1 - \Sigma'_0(E) - \Sigma'_c(E)} \Bigg|_{E=E_h}$$

$$Z = \langle \widetilde{\Psi} | \psi_0 \rangle \langle \psi_0 | \Psi \rangle = \frac{1}{1 - \Sigma'_0(E) - \Sigma'_c(E)} \Bigg|_{E=E_h}$$

Bare stateとの結合の具体形

スピン偏極 M を持つ ψ_0 を $\bar{D}^*$ のスピン偏極が λ の $D\bar{D}^*$ に結合

- $X(3872)$ の場合： ↓ 結合定数

$$\langle \mathbf{p}, 0, \lambda, i | V | \chi_{c1}; 1M \rangle = g_i^{(0)} \Theta(\Lambda - p) \delta_{\lambda M}$$

- η_{c2} の場合： ↑ sharp cutoff 形状因子

$$\langle \mathbf{p}, 1, \lambda, i | V | \eta_{c2}; 2M \rangle = g_i^{(1)} \sqrt{4\pi} \mathbf{p} \Theta(\Lambda - p) \sum_m \langle 1m, 1\lambda | 2M \rangle Y_{1m}(\hat{\mathbf{p}})$$

- アイスピン対称な結合定数

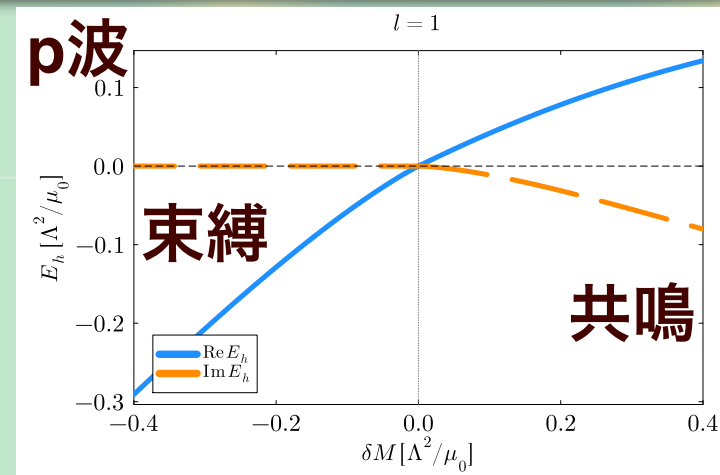
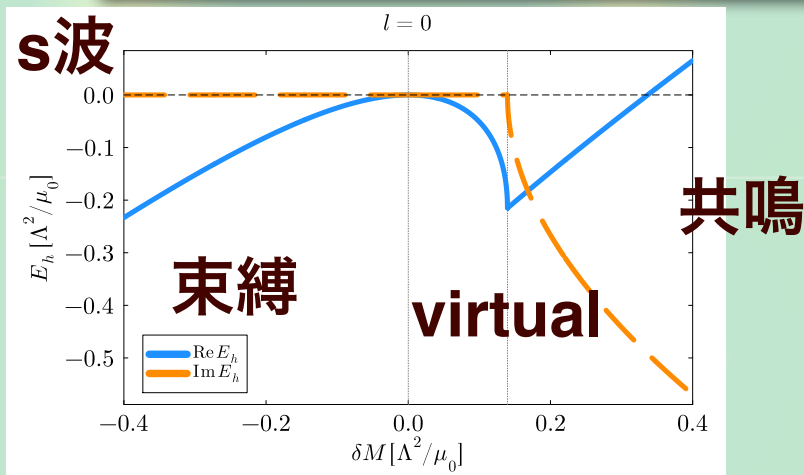
$$g_0^{(\ell)} = g_c^{(\ell)} \equiv g^{(\ell)}$$

部分波射影後の換算遷移行列要素

$$\langle \mathbf{p}, i | V | \psi_0 \rangle = \begin{cases} g^{(0)} \Theta(\Lambda - p), & X(3872) \\ g^{(1)} \mathbf{p} \Theta(\Lambda - p), & \eta_{c2} \end{cases}$$

固有エネルギーと複合性 (single channel)

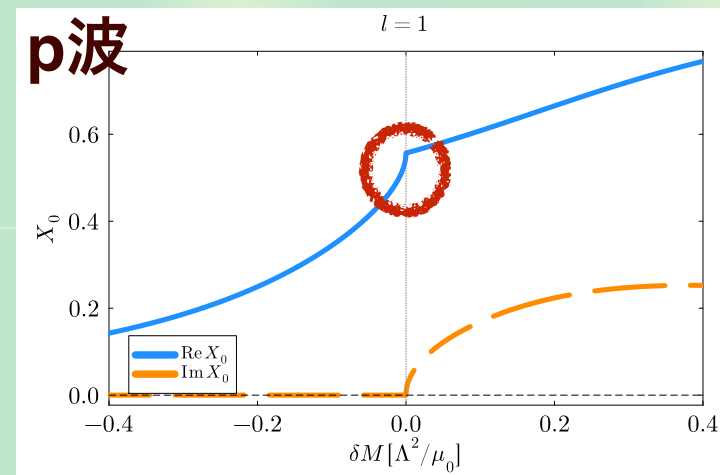
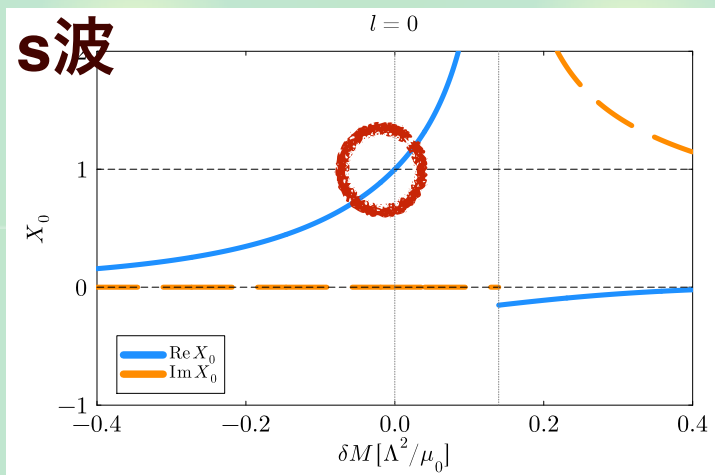
固有エネルギー



s波束縛はvirtualを經由し共鳴へ、p波束縛は直接共鳴へ

T. Hyodo, PRC 90, 055208 (2014)

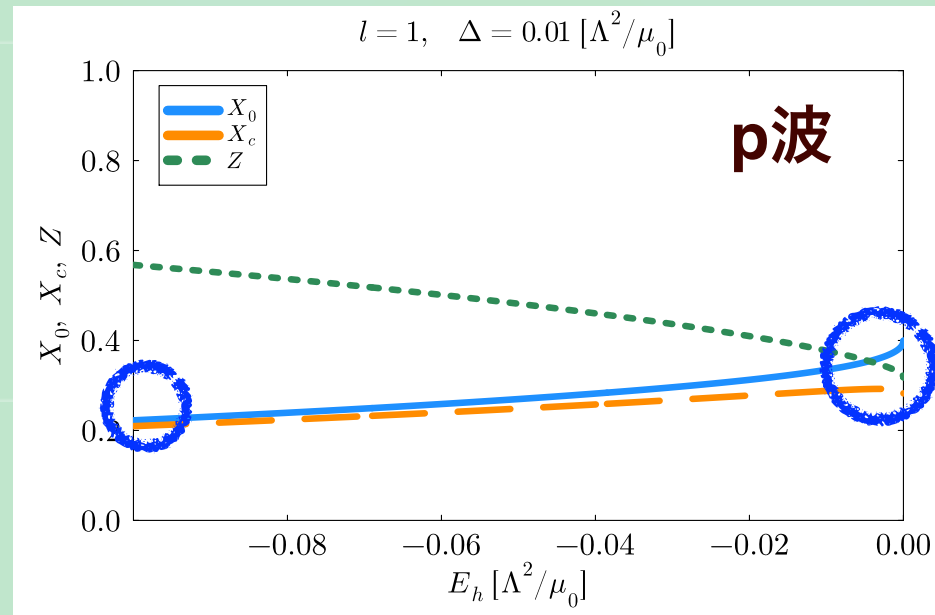
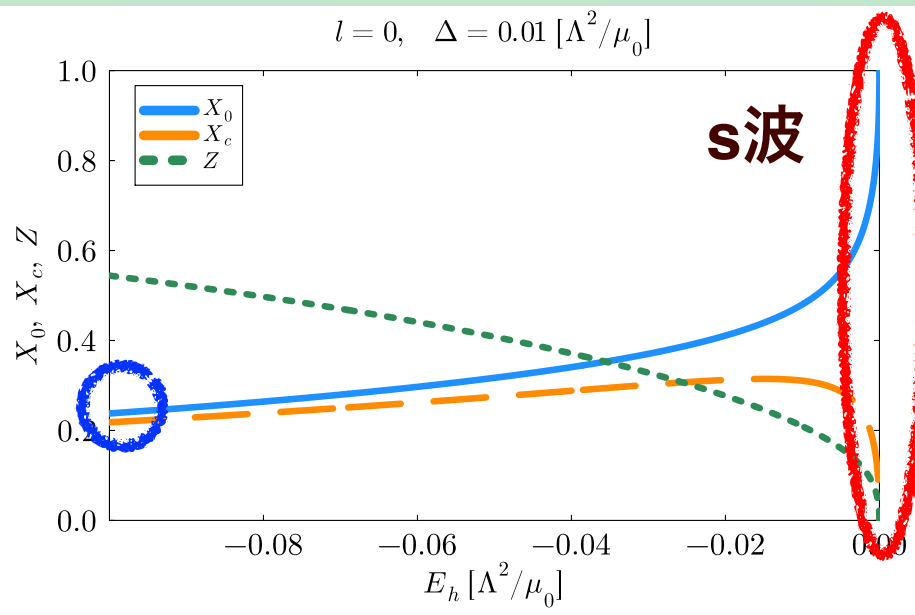
複合性



s波束縛は閾値で $X \rightarrow 1$ 、p波束縛の閾値での X は任意

アイソスピン対称性の破れ

束縛状態の複合性 (2 channel)



- 深いs波, p波束縛状態：アイソスピン対称 ($X_0 \approx X_c$)
- 浅いs波束縛状態：大きな対称性の破れ ($X_0 \gg X_c$)
- 浅いp波束縛状態：ほぼアイソスピン対称 ($X_0 \approx X_c$)

現実的な設定

インプット

- 固有エネルギー E_h : PDG ($X(3872)$)、Nakamura模型 (η_{c2})
- Bare mass M_0 : 構成子クォーク模型
S. Godfrey and N. Isgur, PRD 32, 189 (1985)
- カットオフ Λ : 600 MeVから1000 MeVの範囲

Input Resonance	Bare Mass (GeV)	Z	X_0	X_c
$X(3872)$	3.95	0.19 ± 0.04	0.69 ± 0.04	0.117 ± 0.004
η_{c2}	3.84	(1.49 ± 0.29) $-(0.14 \pm 0.12)i$	(-0.29 ± 0.17) $+(0.16 \pm 0.09)i$	(-0.20 ± 0.11) $+(0.03 \pm 0.02)i$
η_{c2}	3.95	(0.61 ± 0.11) $(0.03 \pm 0.01)i$	$+(0.23 \pm 0.07)$ $-(0.04 \pm 0.02)i$	(0.16 ± 0.04) $+(0.01 \pm 0.01)i$

$X(3872)$: 大きなアイソスピン対称性の破れ $X_0 \gg X_c$

η_{c2} : ほぼアイソスピン対称 $X_0 \approx X_c$

まとめ

-  閾値近傍状態における **アイソスピン対称性の破れ**
-  s波束縛状態は閾値で完全な複合状態になるが、p波束縛状態の内部構造は閾値でも任意
T. Hyodo, PRC 90, 055208 (2014)
-  s波弱束縛状態のアイソスピン対称性は大きく破れるが、**p波弱束縛状態では必ずしも破れない**
-  閾値近傍でも η_{c2} はアイソスピン対称性を保ち得る
M. Bradshaw, T. Hyodo, in preparation