

# 核内中間子：理論

**D. Jido**  
**(Yukawa Institute, Kyoto)**

## Menu

1.  $\pi$  中間子原子とカイラル対称性
2.  $N(1535)$ と $\eta$  中間子原子核
3.  $K$  中間子原子核の非中間子崩壊

## hadron-nucleus system (new exotics)

mesons in nuclei (中間子原子核)

hadronic molecular states etc.

(hadronic atoms) ex.  $\pi$  atom, K atom,  $\Xi$  atom, ...

(hypernuclei)

## our aim

- produce new hadron-nucleus systems
- investigate the properties structure, hadron properties
- extrapolate the knowledge dense nuclear matter (neutron star)

## fundamental interactions

hadron spectroscopy, hadron structure

baryon resonance: **mesons excite nucleons in nuclei**

## ultimate goal

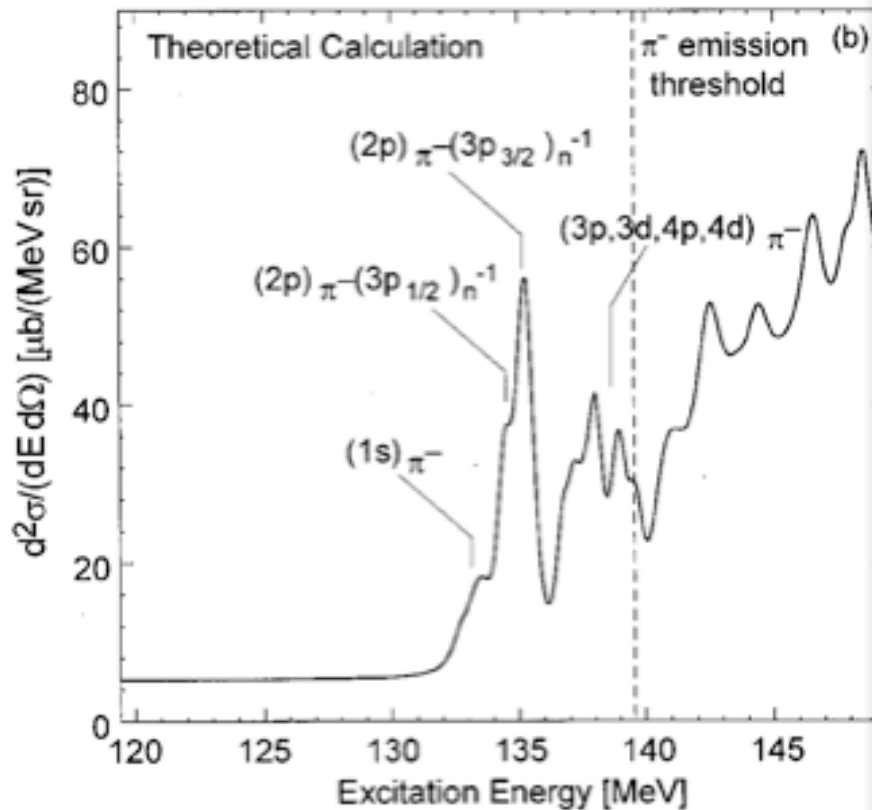
understanding of strong interactions of QCD

$\pi$  中間子原子  
(pionic atoms)

# $\pi$ 中間子原子

## 深い束縛状態の観測

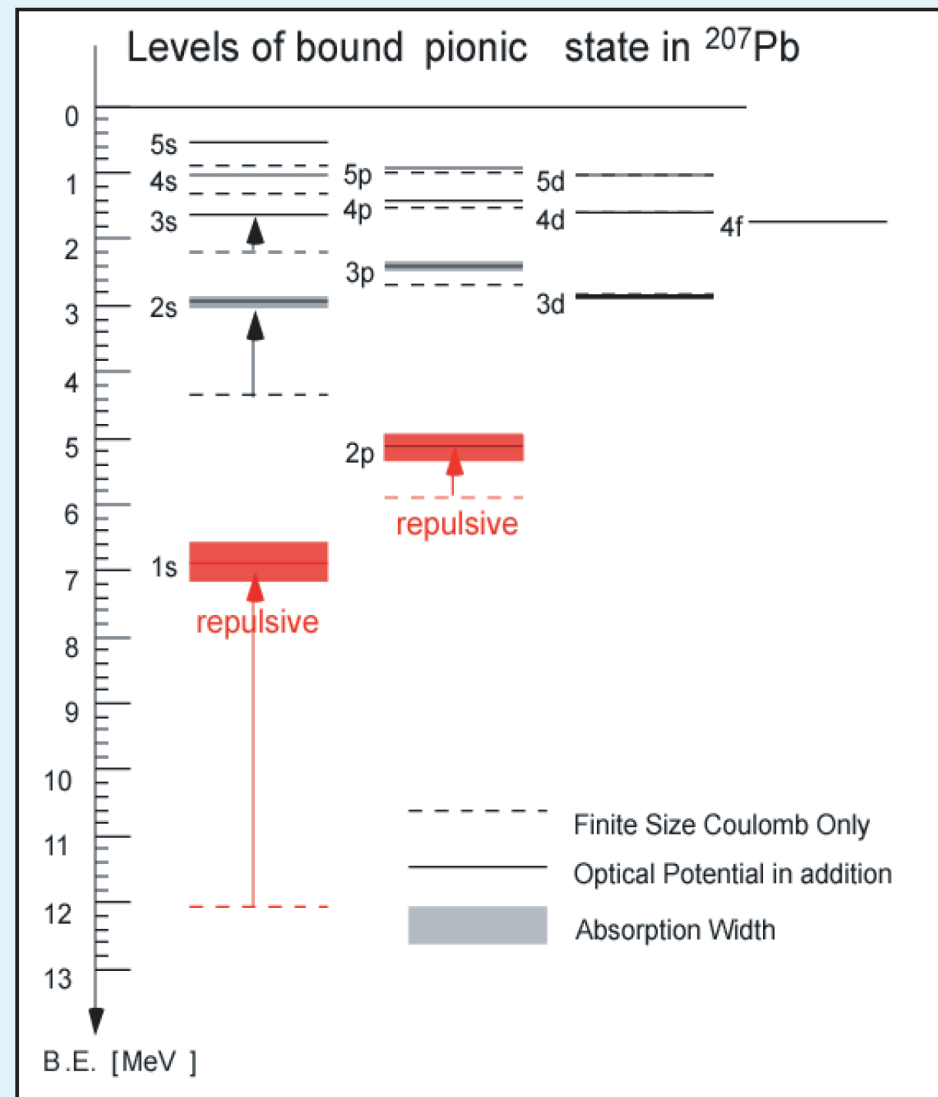
### 理論



比連崎、土岐

## $\pi$ 中間子の光学ポテンシャル

## 鉛核での $\pi$ 中間子束縛状態



# In-nucleus pions as a probe of ChSB

## S-wave optical potential of $\pi^-$

$$2m_\pi U_{\text{opt}}^S = -4\pi \left[ 1 + \frac{m_\pi}{m_N} \right] (b_0\rho - b_1\delta\rho) + \mathcal{O}(\rho^2)$$

scattering length

isoscalar  $\rho = \rho_p + \rho_n$

isovector  $\delta\rho = \rho_p - \rho_n$

**Deeply bound pionic atom** K. Suzuki et al. PRL92, 072302 (04)  
systematic study of  $\pi^-$  bound states in Sn isotopes

$$b_1^{\text{free}}/b_1 = 0.78 \pm 0.05 \quad \rho \sim 0.6 \rho_0$$

**Elastic scattering** (Friedman et al.)

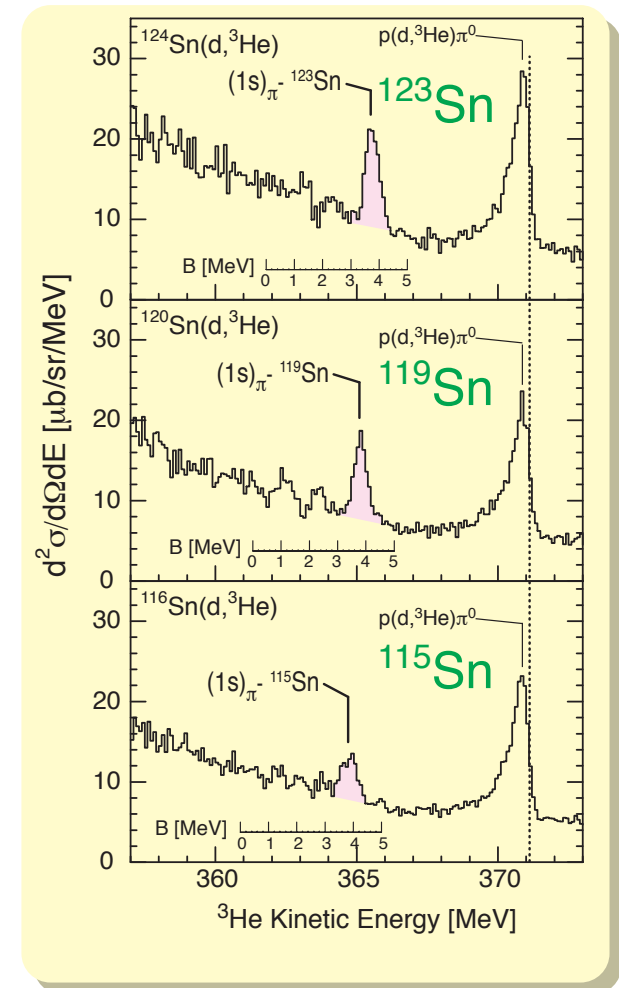
$$b_1^{\text{free}}/b_1 \sim 0.69$$

## Tomozawa-Weinberg relation

$$b_1^{\text{free}} = -\frac{\omega_\pi}{2F_\pi^2} \quad b_1 = -\frac{\omega_\pi}{2(F_\pi^t)^2}$$

$$b_1^{\text{free}}/b_1 = (F_\pi^t/F_\pi)^2 < 1$$

**クォーク凝縮の関係は??**



# Exact sum rule for quark condensate in all density

## sum rule in chiral limit

Jido, Hatsuda, Kunihiro, PLB 670 (2008), 109.

$$\sum_{\alpha} \text{Re} \left[ (N_{\alpha}^* + F_{\alpha}^*) G_{\alpha}^{*1/2} \right] = -\langle \bar{q}q \rangle^*$$

sum over zero modes with pionic quantum number

### In-medium matrix elements

wavefunction normalization  $\langle \Omega_{\ell}^b(k) | \phi_5^a(x) | \Omega \rangle = \delta^{ab} G_{\ell}^{*1/2} e^{ik \cdot x},$

axial vector coupling  $\langle \Omega | A_{\mu}^a(x) | \Omega_{\ell}^b(k) \rangle = i\delta^{ab} [n_{\mu}(n \cdot k) N_{\ell}^* + k_{\mu} F_{\ell}^*] e^{-ik \cdot x}.$

### eigenstates of QCD Hamiltonian with pionic quantum number

$|\Omega_{\ell}^a\rangle$  eigenvalue  $\varepsilon_{\ell}$  momentum  $\vec{k}$   $J^P = 0^{-}$   $I = 1$

**zero modes**  $\ell = \alpha$   $\varepsilon_{\ell} \rightarrow 0$  as  $\vec{k} \rightarrow \vec{0}$

**non-zero modes**  $\ell = \beta$   $\varepsilon_{\ell} \neq 0$  at  $\vec{k} = \vec{0}$

# low density relation and scaling law

contribute only pionic mode in linear density

in-medium Glashow-Weinberg relation

$$F_{\pi}^t G_{\pi}^{*1/2} = -\langle \bar{q}q \rangle^*$$

valid only for linear density

scaling law

$$\left( \frac{F_{\pi}^t}{F_{\pi}} \right) Z_{\pi}^{*1/2} = \frac{\langle \bar{q}q \rangle^*}{\langle \bar{q}q \rangle}$$

wavefunction renormalization

$$Z_{\pi}^* \equiv G_{\pi}^* / G_{\pi}$$

$Z_{\pi}^* \equiv G_{\pi}^* / G_{\pi}$  真空中の $\pi N$ 散乱と関係、1より小さい

$\pi$  中間子原子から決めたい

# Wavefunction renormalization in pionic atom

$$Z_{\pi}^* \equiv G_{\pi}^* / G_{\pi}$$

Matrix elements

$$\langle \Omega_{\ell}^b(k) | \phi_5^a(x) | \Omega \rangle = \delta^{ab} G_{\ell}^{*1/2} e^{ik \cdot x},$$

異なる密度の wavefunction normalization

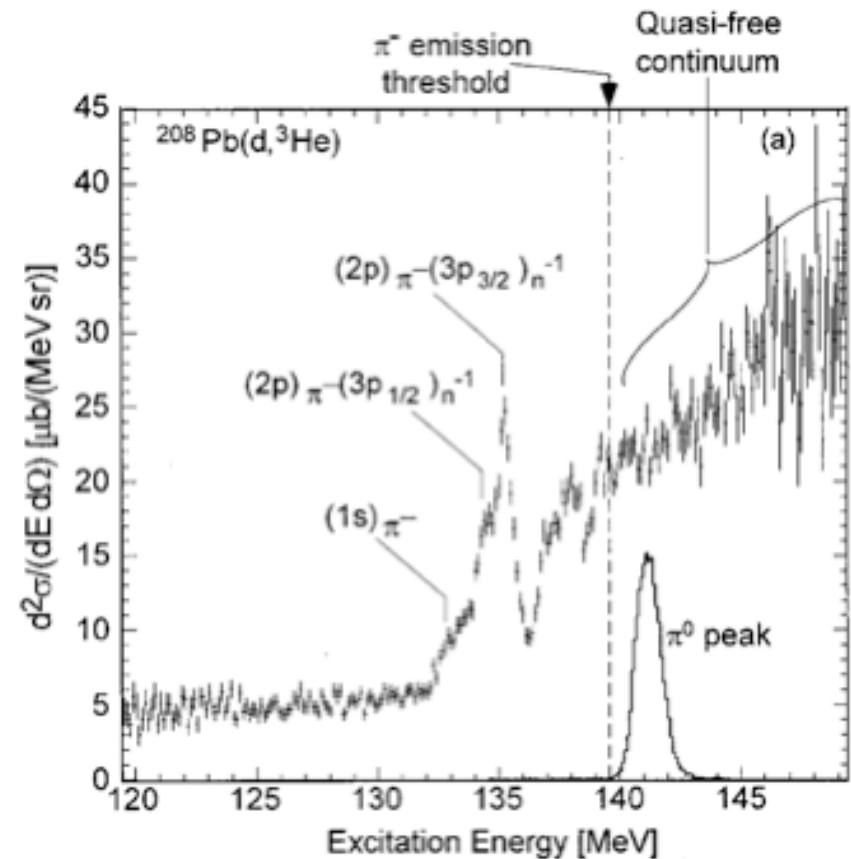
→ 波動関数くりこみ

スペクトラムの高さと関係

核構造からの寄与

比を取ることで相殺？

異なる束縛状態では感じる  
密度が変わる？

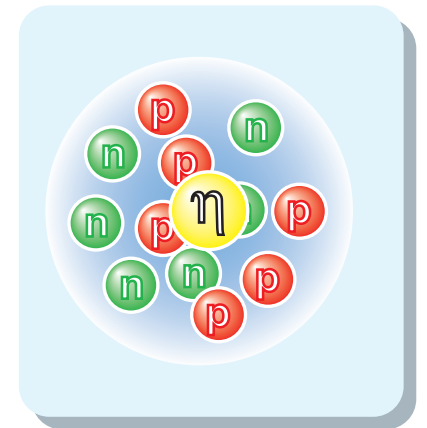




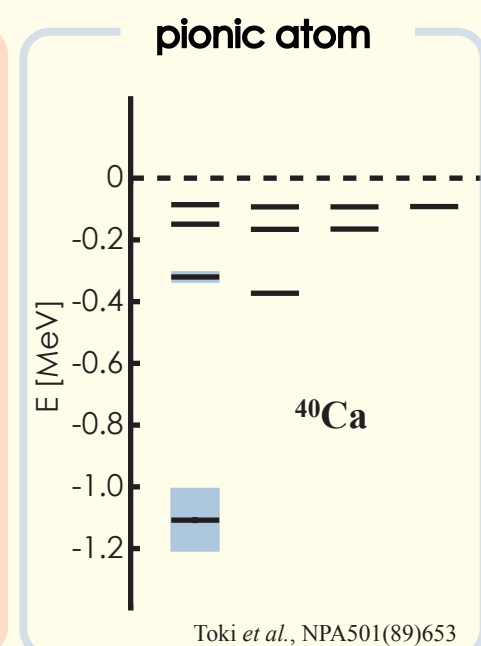
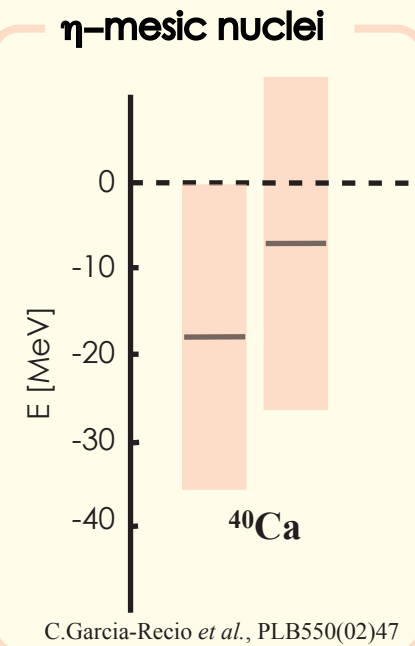
# $\eta$ 中間子原子核

# $\eta$ 中間子原子核

$\eta$  電氣的**中性**（電磁相互作用をしない）  
強い相互作用で**引力**



強い相互作用で束縛し崩壊する  
広い幅（数十MeV）



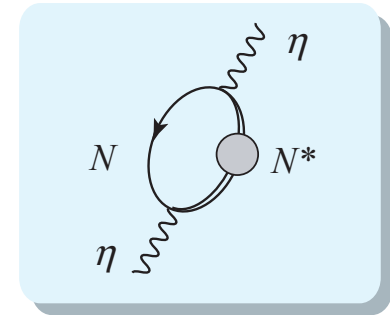
# N(1535)と $\eta$ 中間子原子核

バリオン励起状態と結合



原子核中でのN(1535)の変化

**N(1535): 核子のカイラルパートナー! ?**

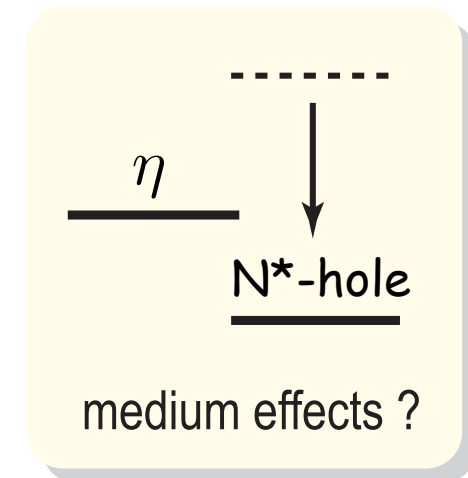
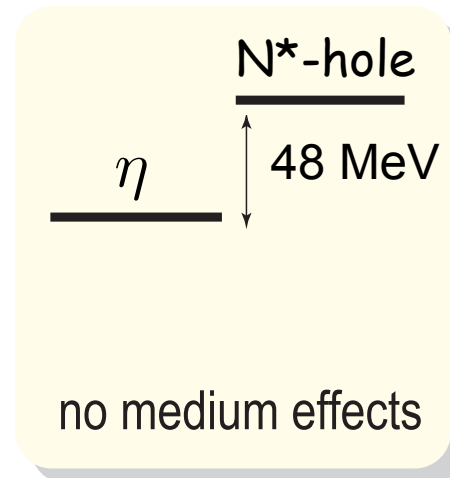


核媒質中で $\eta$ 中間子は N\*-hole モードと結合

二つのモードのレベル差

レベル交差の可能性

N\*の質量に敏感



Jido, Kolomeitsev, Nagahiro, Hirenzaki, NPA accepted

# N(1535) in chiral unitary model

N(1535)はカイラルユニタリー模型で記述される  
かならずしもメゾン・バリオンの準束縛状態でない

## chiral unitary model

model parameters tuned so as to

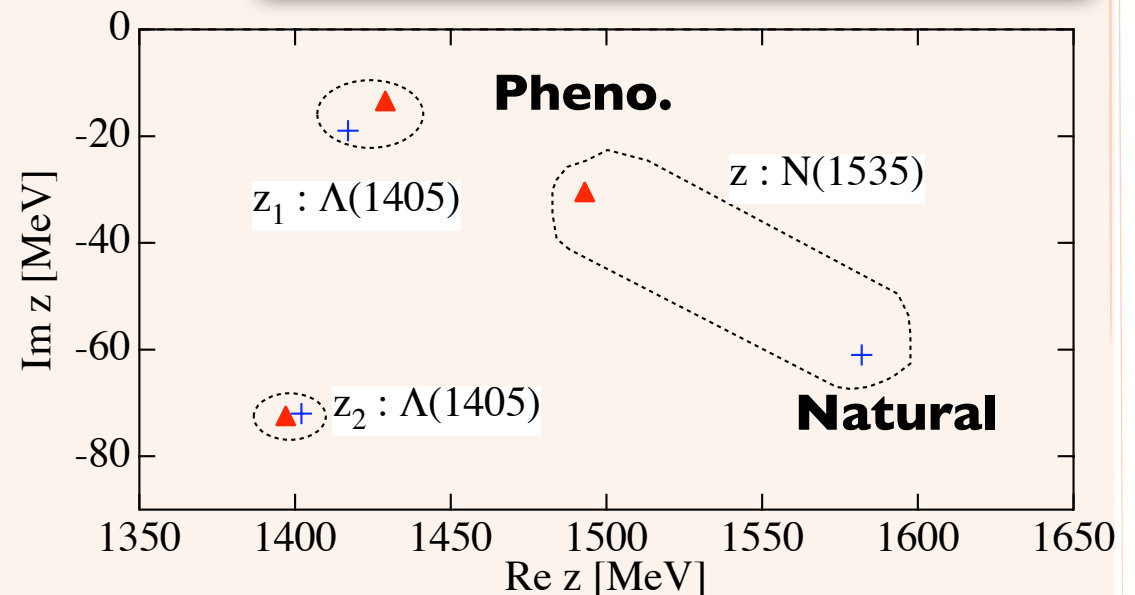
a) exclude quark-originated  
states theoretically

+ **Natural**

b) reproduce scattering data

▲ **Pheno.**

Hyodo, Jido, Hosaka, PRC78, 025203 ('08)



N(1535)は、メゾン・バリオンのダイナミクスだけでは、  
記述することができない。クォーク起源の成分が必要

# N(1535)の模型

## カイラルユニタリー模型

メゾン・バリオンのダイナミクスを記述

N(1535)は $K\Sigma$ や $K\Lambda$ と強く結合

→Pauli broking free、 $N^*$ の質量変化は小さい

(注：メゾン・バリオンの媒質効果のみを考えた場合)

## カイラル2重項模型 (Chiral doublet model)

NとN(1535)がカイラルパートナー (クォーク的な記述)

カイラル対称性の回復とともに質量差は減少

ふたつの模型は、一見矛盾するように見えるが、  
実は、両極端な状況を考えているだけ。

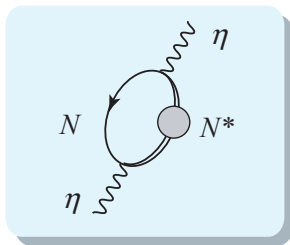
双方の特徴をお互いの模型に取り込むことは可能。

# Level crossing of eta and N\*-hole modes

NとN(1535)の質量差は減少するのか？

そのことをどうやって実験で確かめるか？

質量差が減少すると何か特徴的なことはあるのか？



Optical potential of  $\eta$  in nucleus

$$V_{\eta}(\omega) = \frac{g_{\eta}^2}{2\mu} \frac{\rho(r)}{\omega + m_N^*(\rho) - m_{N^*}^*(\rho) + i\Gamma_{N^*}(\omega; \rho)/2}$$

in-medium  
eta propagator

Green function

$$G_{\eta}(\omega) = \frac{1}{\omega - m_{\eta} - V_{\eta}(\omega)}$$

# Interplay of eta and N\*-hole modes

in-medium  
eta propagator

**Green function**

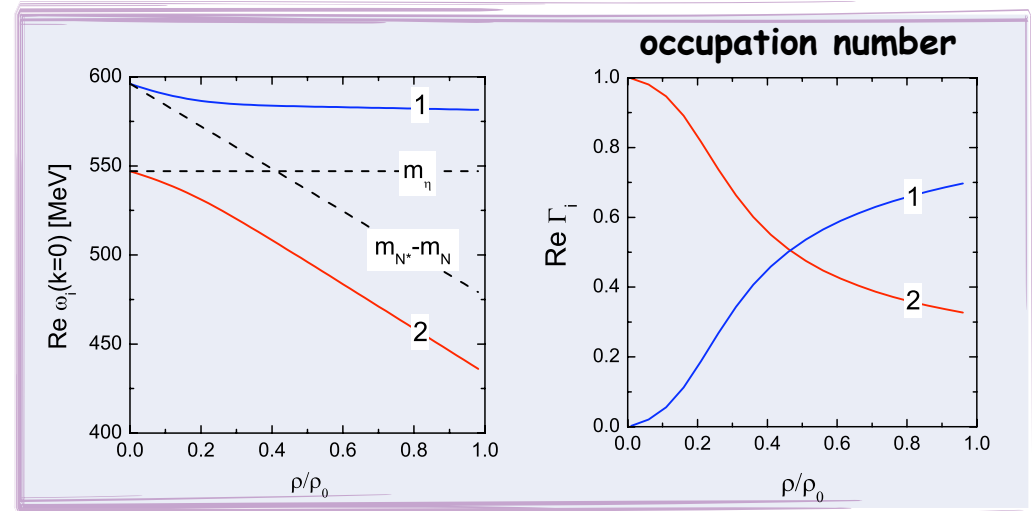
$$G_{\eta}(\omega) = \frac{1}{\omega - m_{\eta} - V_{\eta}(\omega)}$$

**Optical potential of  $\eta$  in nucleus**

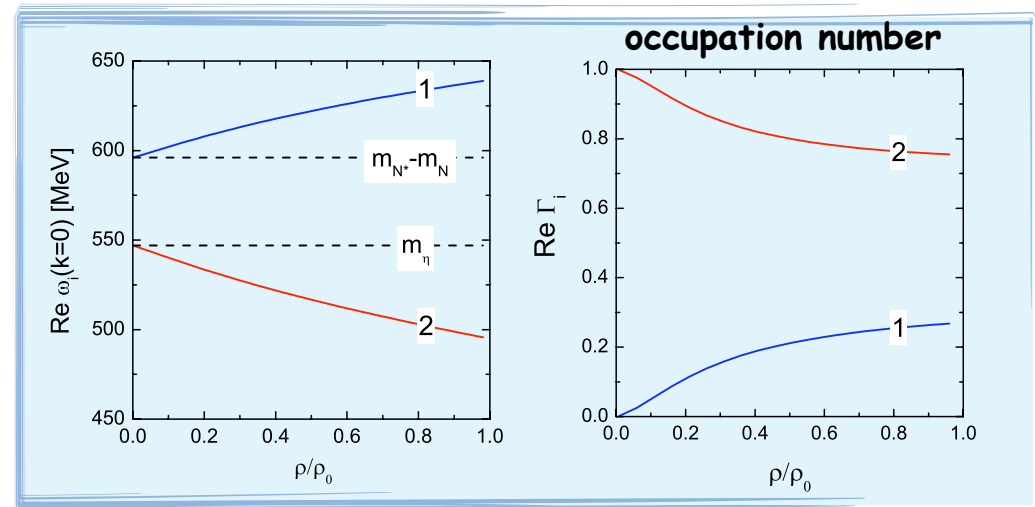
$$V_{\eta}(\omega) = \frac{g_{\eta}^2}{2\mu} \frac{\rho(r)}{\omega + m_N^*(\rho) - m_{N^*}^*(\rho) + i\Gamma_{N^*}(\omega; \rho)/2}$$

- level repulsion
- occupation number

with reduction of mass difference

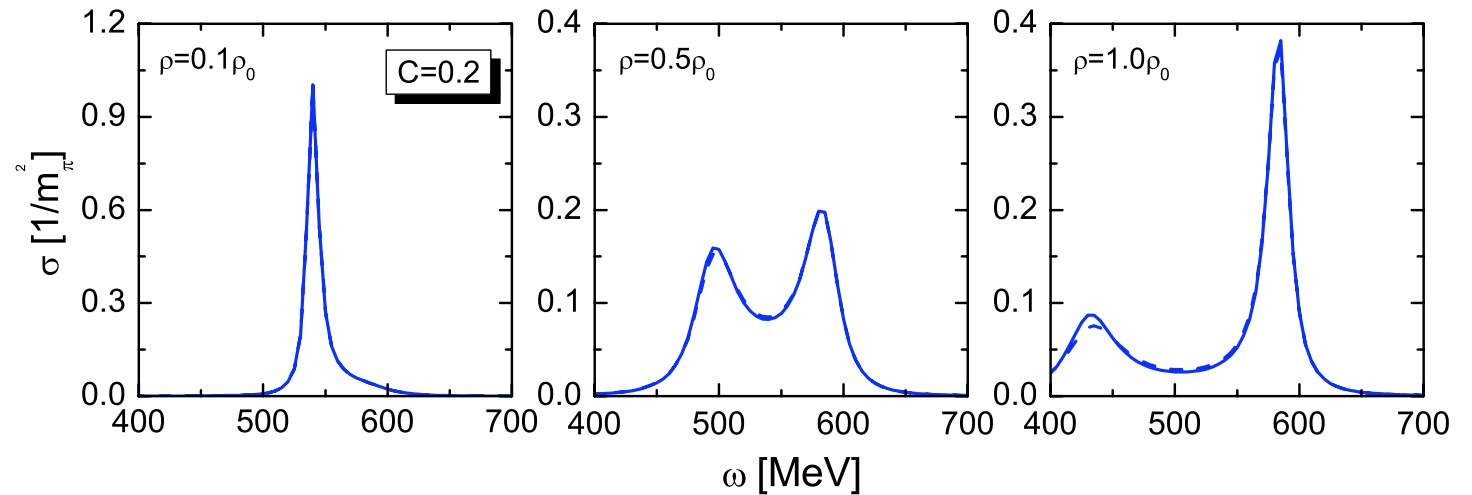


without mass shift

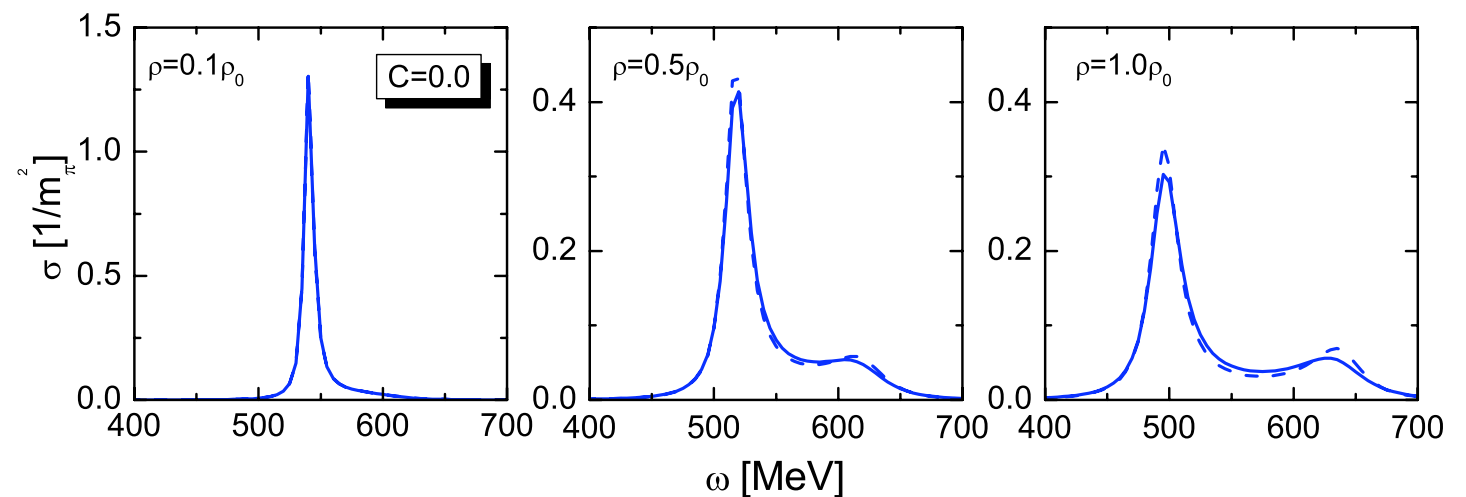


# Interplay of eta and N\*-hole modes

Spectral function with reduction of mass difference

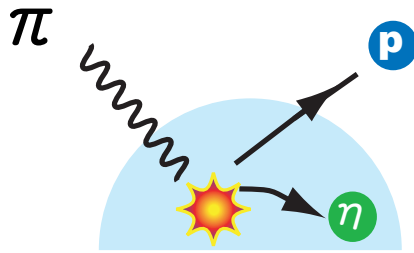


without mass shift





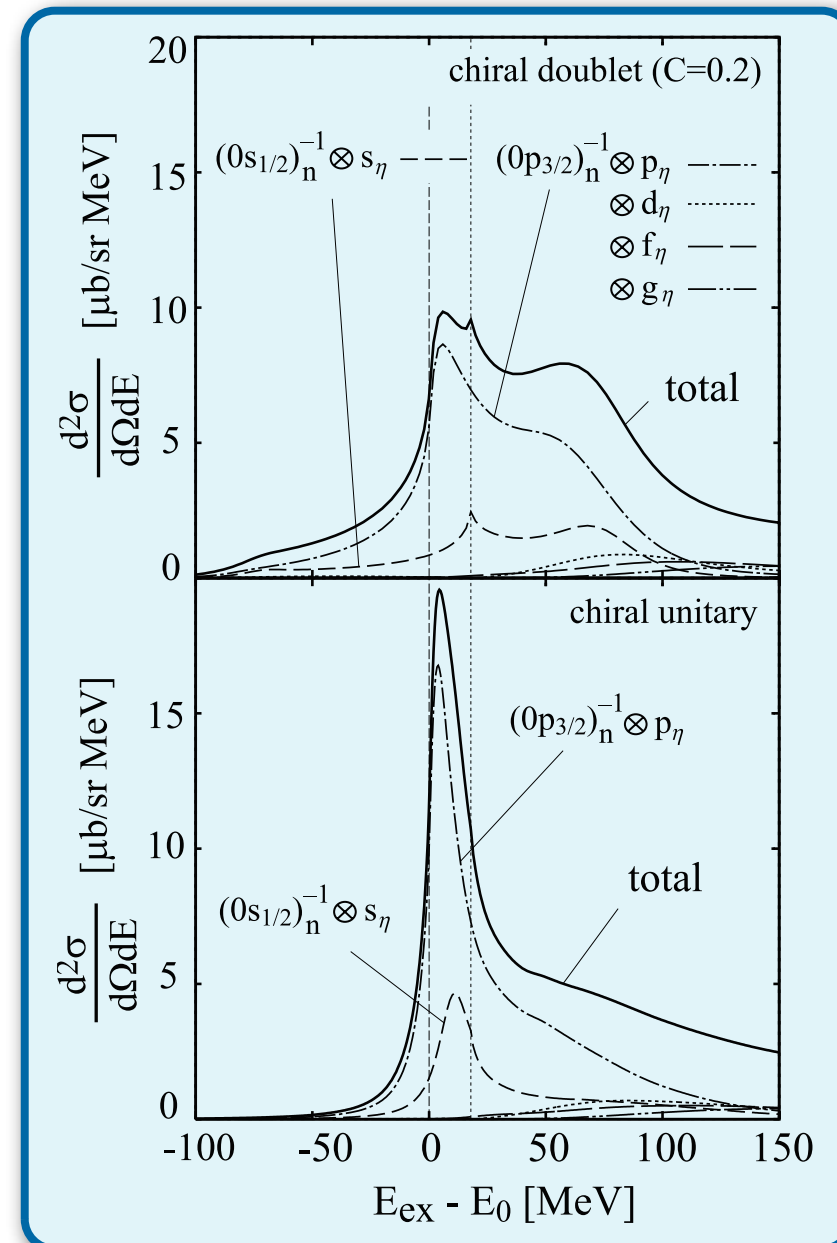
# formation spectra of eta mesic nuclei



Carbon target

820 MeV/c incident pion

observe forward proton



# K中間子原子核の 非中間子崩壊

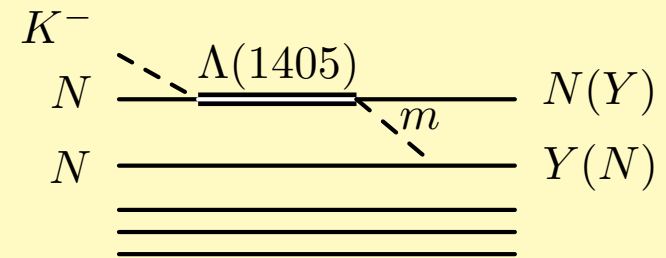
# Decay properties of Kaonic nuclei

Sekihara, DJ, Y. Kanada-En'yo,  
in preparation

活発なK中間子原子核構造・生成研究

## picture

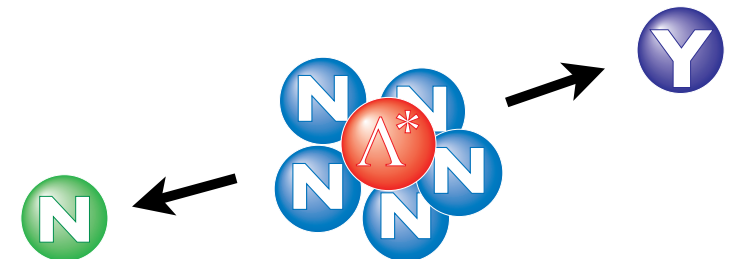
$K^-$  と核子で  $\Lambda(1405)$  が作られ、  
核内で  $\Lambda(1405)$  が崩壊



## $\Lambda(1405)$ がK中間子吸収の doorway state

この描像が正しいかどうかは、核中で  $\Lambda^*$  がどれだけ個性を保っているかによる

- ハドロン分子状態の束縛エネルギー：数十MeVより深い束縛なら、別のピクチャーが必要
- 理論的には、ハイパー核のテクニクが使える



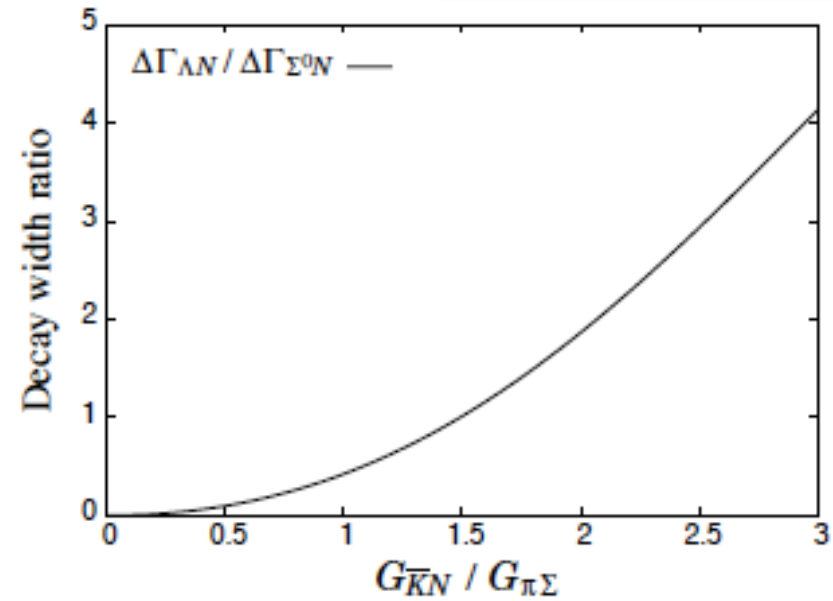
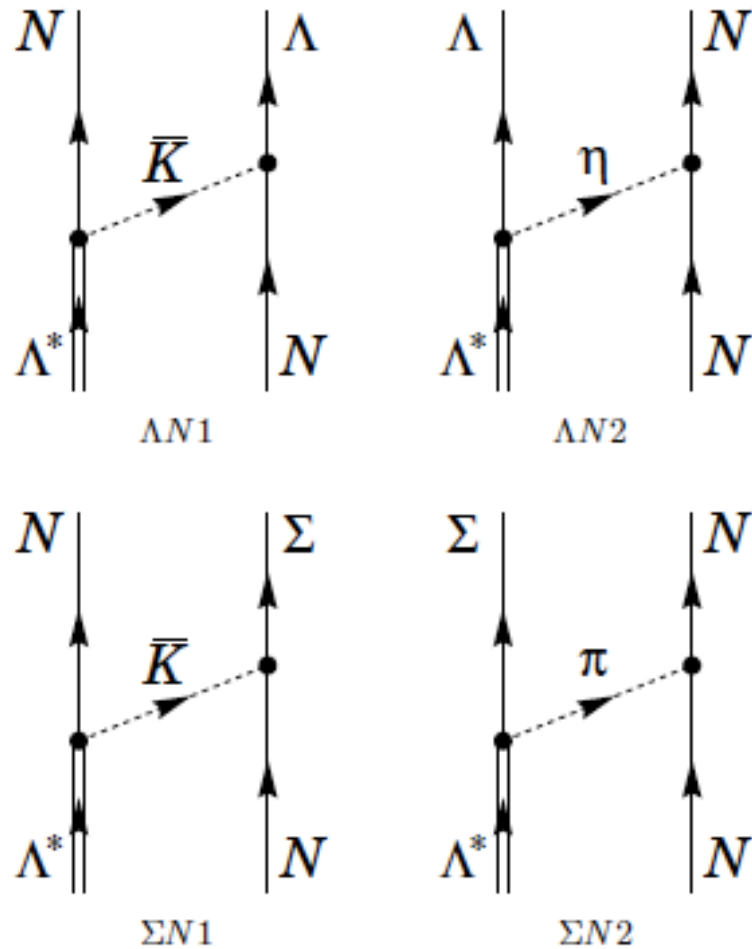
## 崩壊モードから性質を調べることができないか？

特に、nonmesonic (nonpionic) decay (最も基本的な多体効果)

# Non-mesonic decay of Kaonic nuclei

model

Sekihara, DJ, Y. Kanada-En'yo, in preparation



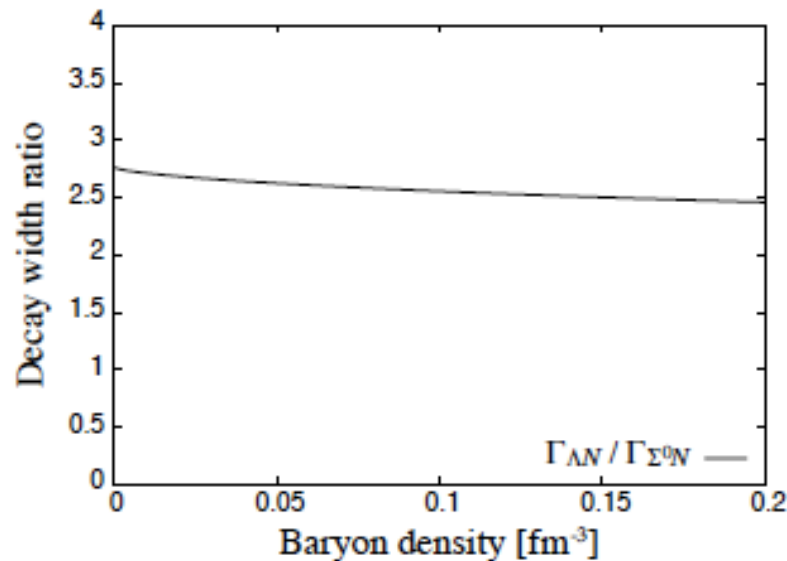
$$\Lambda^* \rightarrow \bar{K} N$$

$$\Lambda^* \rightarrow \pi \Sigma$$

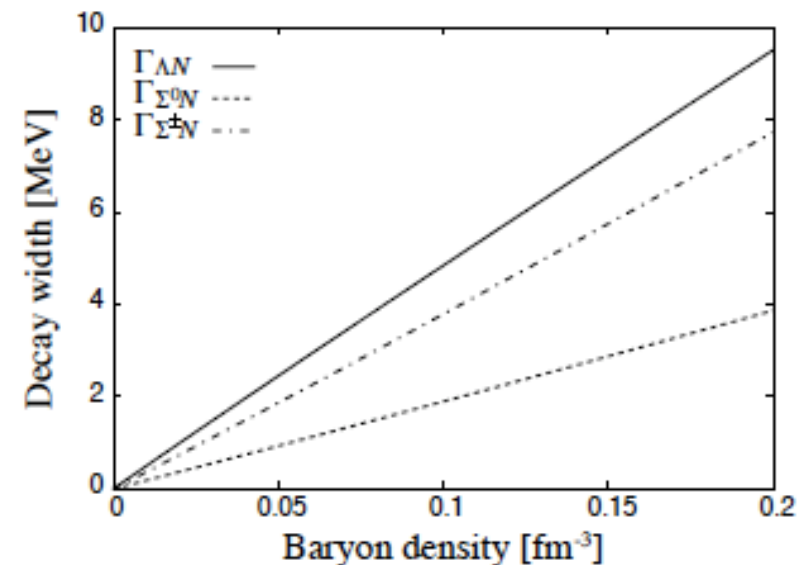
# Non-mesonic decay of Kaonic nuclei

Sekihara, DJ, Y. Kanada-En'yo,  
in preparation

decay ratio  $\Lambda N/\Sigma N$



decay width



YN decay: 20 MeV at  $\rho_0$

$G_{\bar{K}N}^{\Lambda^*} / G_{\pi\Sigma}^{\Lambda^*}$  from chiral unitary model

# まとめ

- カイラル対称性の部分的回復を  $\pi$  中間子原子の実験で閉じた形で示したい。

束縛状態のピークの高さの比が良い候補

$$\left( \frac{F_{\pi}^t}{F_{\pi}} \right) Z_{\pi}^{*1/2} = \frac{\langle \bar{q}q \rangle^*}{\langle \bar{q}q \rangle}$$

- $\eta$  中間子原子核では、 $N(1535)$ の性質が鍵  
スペクトラムの形に $N-N^*$ の質量差の減少に基づくレベル交差が見える。

- $K$  中間子原子核の非中間子崩壊

$\Lambda^*$  doorway decay

崩壊比  $\Lambda N / \Sigma N$  は  $G_{\bar{K}N}^{\Lambda^*} / G_{\pi\Sigma}^{\Lambda^*}$  に強く依る