

中間子－原子核系で探る 媒質中のK-中間子の性質

山縣淳子

京都産業大学 理学部

Introduction

原子核は身近な
高密度実験室！！

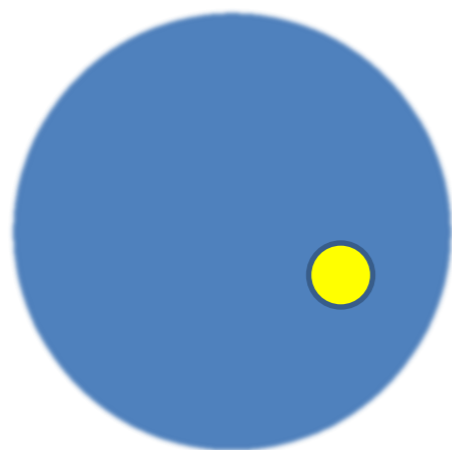
- 中間子-原子核系：

有限密度中における中間子の性質を調べる

pion, kaon, omega, eta, eta', phi ... 1つの手段として useful な系。

中間子の性質を調べることにより、カイラル対称性の破れとその部分的回復について我々は知りたい。

中間子原子核



K^- , ω , η , η' , ϕ

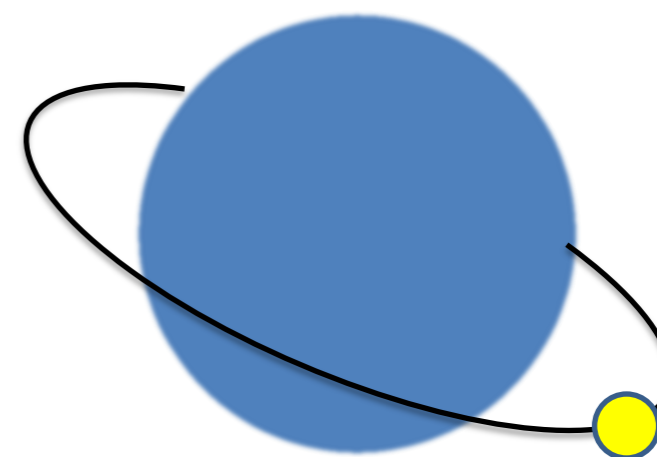
Strong interaction

[MeV]

Meson

B.E.

中間子原子



π^- , K^-

Coulomb

[10 keV - MeV]

Introduction

* 研究概要 *

K-中間子と原子核の間に働く力

相互作用

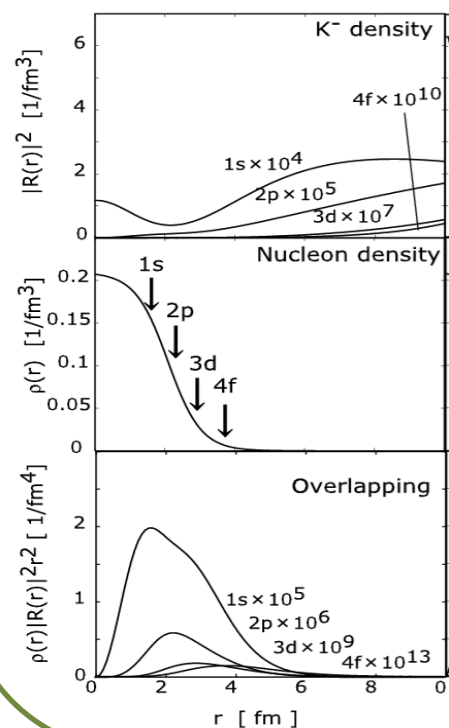
* **カイラル対称性に基づく理論模型** *
 真空中 → 原子核媒質中
 * **バリオン共鳴状態** *

構造

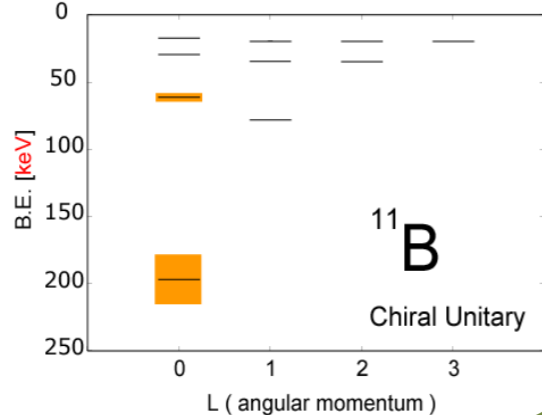
生成断面積

* **生成スペクトラム** *
 実験データと直接比較
 バックグラウンドの寄与

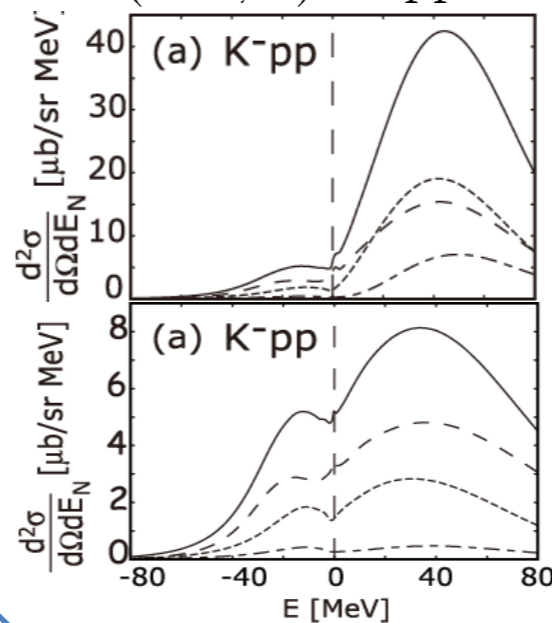
* **波動関数** *
 * 中間子の感じる
 原子核密度 *



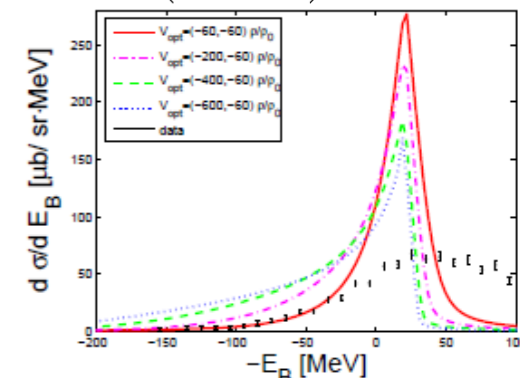
* **束縛エネルギー** *
 * **崩壊幅** *



${}^3\text{He}(K^-, n)K^-pp$



${}^{12}\text{C}(K^-, p)$



束縛するかどうか

実験でどのように観測されるか

Introduction: K中間子—原子核系

相互作用

: 1つに決まっていない。複数候補がある。

= 代表的なもの =

Ramos, Oset, NPA671(00)481

Hirezaki, Okumura, Toki, Oset, Ramos, PRC61(00)055205

・Chiral Unitary模型: **理論**模型。実験データを再現する。

・現象論的模型:

Batty, Friedman, Gal, PR287(97)385

K-中間子原子の**実験データ**を再現するようにパラメータフィット。

構造

: K-中間子原子は存在する。

K-中間子原子核も理論上存在する。

Akaishi, Yamazaki, PRC65(02)044005

束縛エネルギーは100[MeV]程度であるという**理論計算**。

生成断面積

: K-中間子原子は観測されている。

K-中間子原子核は観測された???

国内外で実験が行われている。

日本では、茨城県のJ-PARC

Kaon–Nucleus system at J–PARC

Experiment at J–PARC

E–15 : A search for deeply–bound kaonic nuclear states by in–flight ${}^3\text{He}(K^-,n)$ reaction



E–17 : Precision spectroscopy of Kaonic ${}^3\text{He}$ $3d \rightarrow 2p$ X–rays

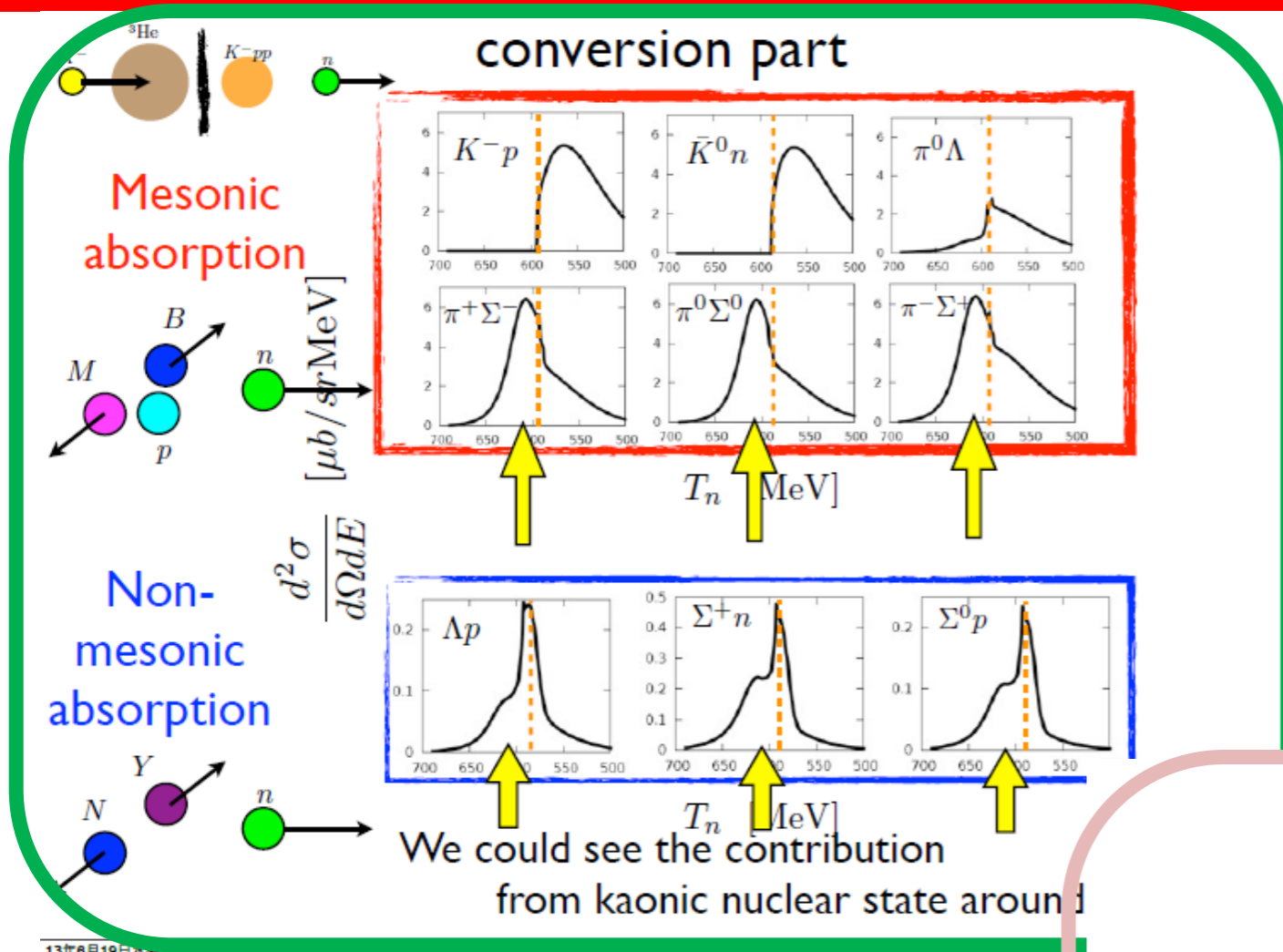
E–27 : Search for a nuclear Kbar bound state K^-pp in the $d(\pi^+,K^+)$ reaction



E–31 : Spectroscopic study of hyperon resonances below K^-N threshold via the (K^-,n) reaction on Deuteron



Kaon-Nucleus system at J-PARC

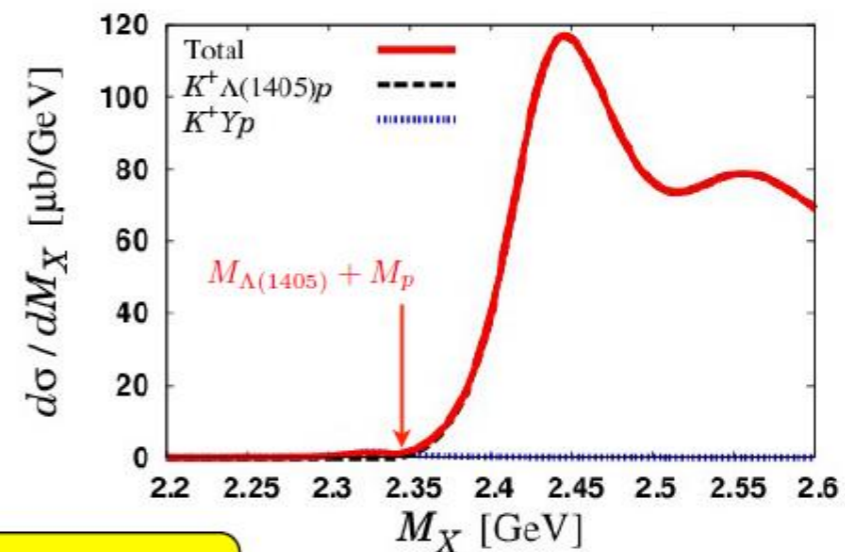


J-PARC E-15

Our calculated results related to J-PARC experiments

J-PARC E-27

πd reaction

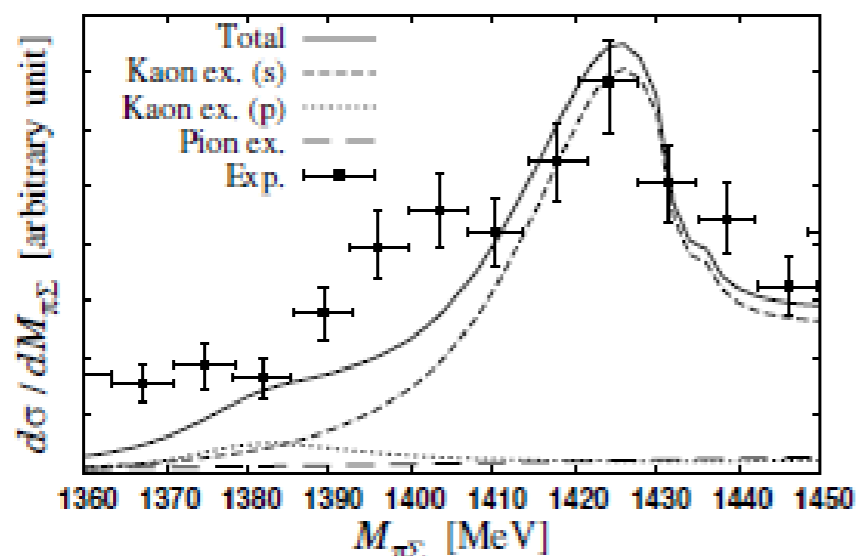


input parameter :
 Bound state of Λ^*p : 20 MeV
 Decay width of $\Lambda^*p \rightarrow Yp$: 10 MeV

The strength of **free Λ^* production** : **Λ^*p production** ~ 100:1

From this work, we found the bound state could make enough structure to observe.

J-PARC E-31



Introduction:

3つのパートすべてを
関係づける研究が必要！！！！

相互作用

: 1つに決まっています。複数候補があります。

= 代表的なもの =

・Chiral Unitary模型: **理論**模型。実験データを再現する。

・現象論的模型:

K-中間子原子の**実験データ**を再現するようにパラメータフィッティング

Ramos, Oset, NPA671(00)481

Hirenzaki, Okumura, Toki, Oset, Ramos, PRC61(00)055205

Batty, Friedman, Gal, PR287(97)385

構造

: K-中間子原子は存在する。K-中間子原子核も理論上存在する。

Akaishi, Yamazaki, PRC65(02)044005

束縛エネルギーは100[MeV]程度であるという**理論計算**。

生成断面積

: K-中間子原子は観測されている。
K-中間子原子核は観測されていない???

国内外で実験が行われている。
日本では、茨城県のJ-PARC

Introduction

* 研究概要 *

K-中間子と原子核の間に働く力

相互作用

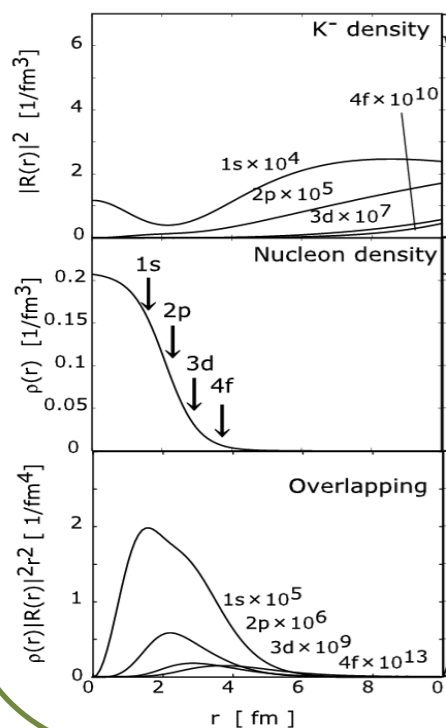
* **カイラル対称性に基づく理論模型** *
 真空中 → 原子核媒質中
 * **バリオン共鳴状態** *

構造

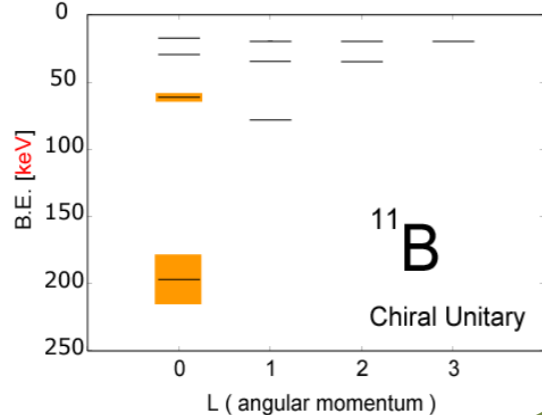
生成断面積

* **生成スペクトラム** *
 実験データと直接比較
 バックグラウンドの寄与

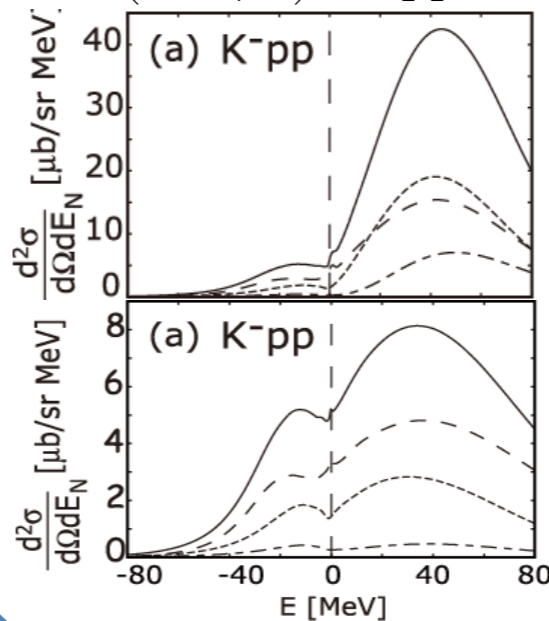
* **波動関数** *
 * 中間子の感じる
 原子核密度 *



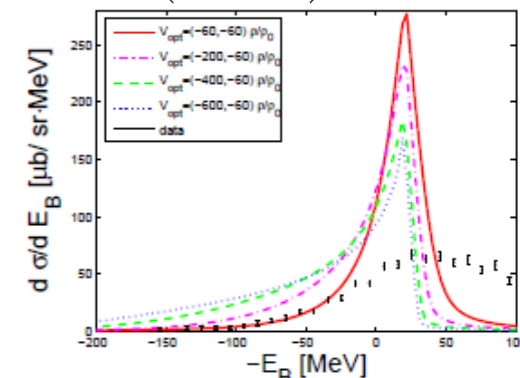
* **束縛エネルギー** *
 * **崩壊幅** *



${}^3\text{He}(K^-, n)K^-pp$



${}^{12}\text{C}(K^-, p)$



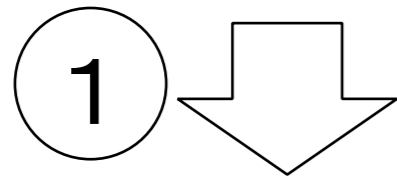
束縛するかどうか

実験でどのように観測されるか

* 研究方法 *

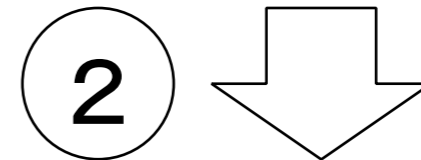
2つの相互作用を用いる！

- ・Chiral Unitary模型：**理論**模型。実験データを再現する。
- ・現象論的模型：
K-中間子原子の**実験データ**を再現するようにパラメータフィット。



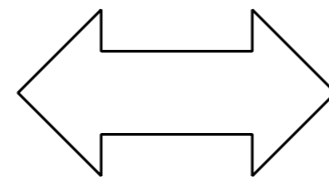
構造

Klein-Gordon 方程式を用いて
束縛エネルギーと崩壊幅を
計算する。



生成断面積

Green関数法を用いて
生成断面積を計算する。



3

① : K-中間子が原子核に束縛するかどうか

② : 実験でどのように観測されるか

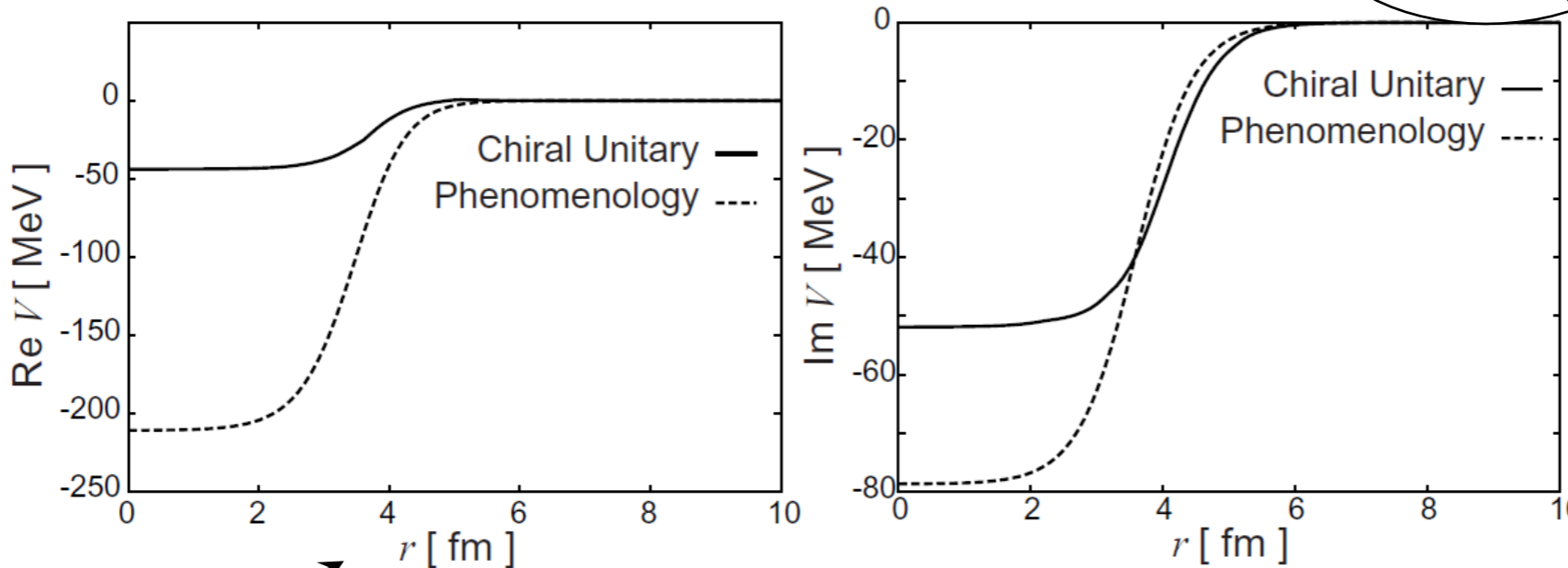
③ : 計算結果の生成断面積と束縛状態の関係

2つの相互作用の結果を
比較する！！

0 : K-中間子-原子核間の相互作用

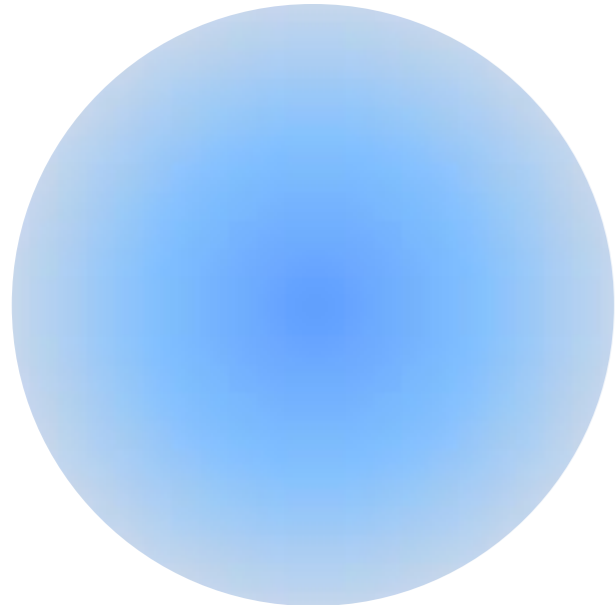
Chiral Unitary 模型 現象論的模型

2つの相互作用は、どちらも実験データを再現するのに引力の強さが全く違う！！



JY, Nagahiro, Okumura, Hirenzaki, PTP114(05)301

原子核中心からの距離



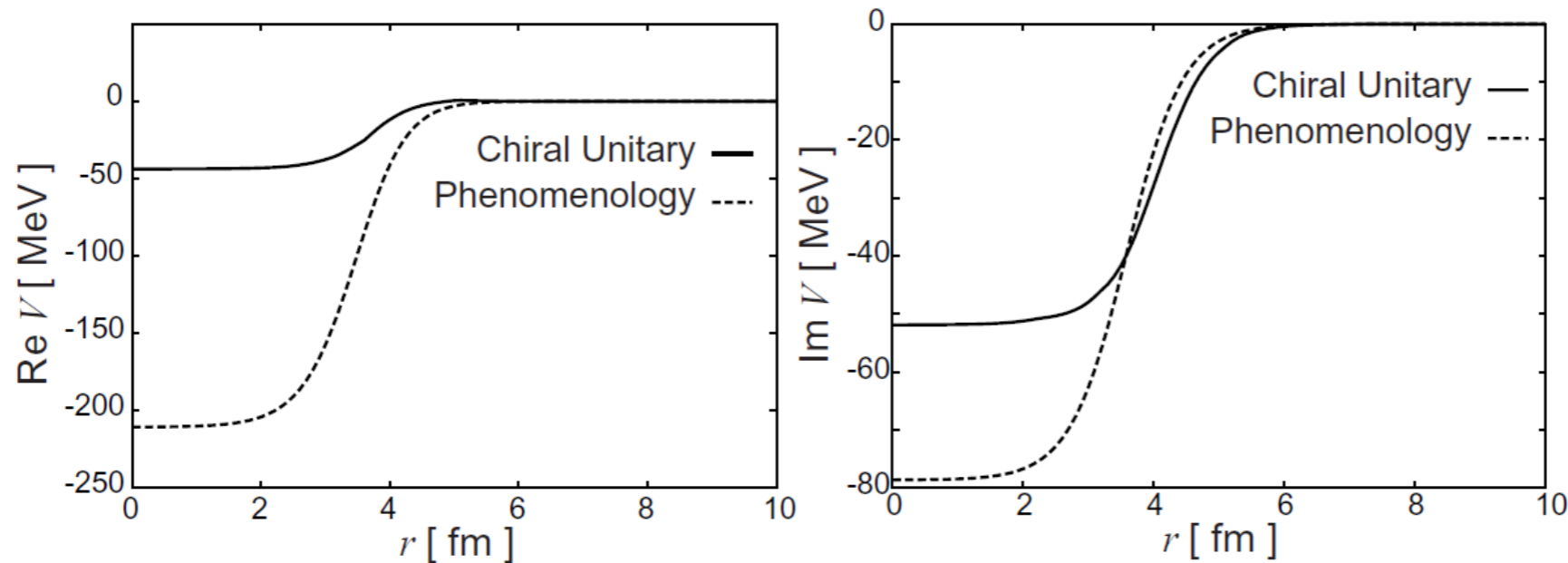
実部: 「+」だったら反発する(斥力)
「-」だったらくっつく(引力)
絶対値が大きいほど程度が強い！！
つまり。。。現象論 > Chiral Unitary ということ。
虚部: 壊れやすさ。

K-中間子は陽子や中性子とくっついて
ほかの粒子に変わってしまう！！

原子核中心は引力が強いけれど、一方で核内の核子とくっついてほかの粒子に変わりやすい。

① : K-中間子-原子核間の相互作用

Chiral Unitary 模型 現象論的模型



JY, Nagahiro, Okumura,
Hirezaki, PTP114(05)301

ポイント: 2つの相互作用は強さが違う。

(Chiral Unitary : 浅い、 現象論 : 深い)

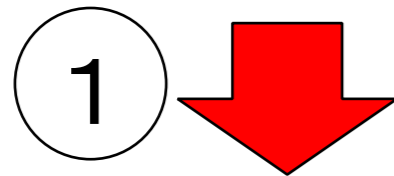
でも、どちらの相互作用も

K-中間子原子の実験データをよく再現する。

* 研究手順 *

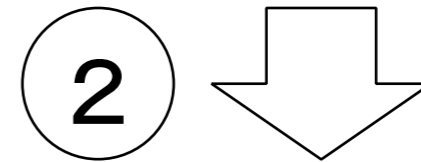
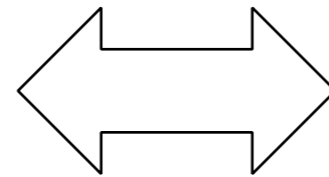
2つの相互作用を用いる！

- ・Chiral Unitary模型：**理論**模型。実験データを再現する。
- ・現象論的模型：
K-中間子原子の**実験データ**を再現するようにパラメータフィット。



構造

Klein-Gordon 方程式を用いて
束縛エネルギーと崩壊幅を
計算する。



生成断面積

Green関数法を用いて
生成断面積を計算する。

③

① : K-中間子が原子核に束縛するかどうか

② : 実験でどのように観測されるか

③ : 計算結果の生成断面積と束縛状態の関係

2つの相互作用の結果を
比較する！！

① : Klein-Gordon方程式を解く

$V_{\text{coul}}(r)$: クーロン力

$$[-\vec{\nabla}^2 + \mu^2 + 2\mu V_{\text{opt}}(r, E)] \phi(\vec{r}) = [E - V_{\text{coul}}(r)]^2 \phi(\vec{r})$$

$V_{\text{opt}}(r, E)$: K-中間子-原子核間相互作用

K-中間子の
波動関数

μ : K-中間子と原子核の換算質量

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_K} + \frac{1}{m_A}$$

outputは。。。 

E: 系の相対論的エネルギー

$$E = \mu - BE + \frac{i\Gamma}{2}$$

BE: K-中間子の束縛エネルギー

Γ : K-中間子の崩壊幅

BEが大きい ~ 質量がとても軽くなる。

Γ が大きい ~ 他の状態に変化しやすい ~ 不安定である。

①: Klein-Gordon方程式を解く

$$[-\vec{\nabla}^2 + \mu^2 + 2\mu V_{\text{opt}}(r, E)]\phi(\vec{r}) = [E - V_{\text{coul}}(r)]^2\phi(\vec{r})$$

E: 系の相対論的エネルギー

$$E = \mu - BE + \frac{i\Gamma}{2}$$

BEがわかると、原子核内でK-中間子がどれだけ軽くなったかがわかる。

「がわかると、原子核内でK-中間子がどれだけ

「K-中間子」として存在していただけるかがわかる。

K-中間子の波動関数

波動関数がわかると、

K-中間子がどのあたりに存在するのかがわかる。(位置的に)
ただし、ピンポイントに「ここ」とわかるのではなくて、わかるのは粒子が存在する確率。

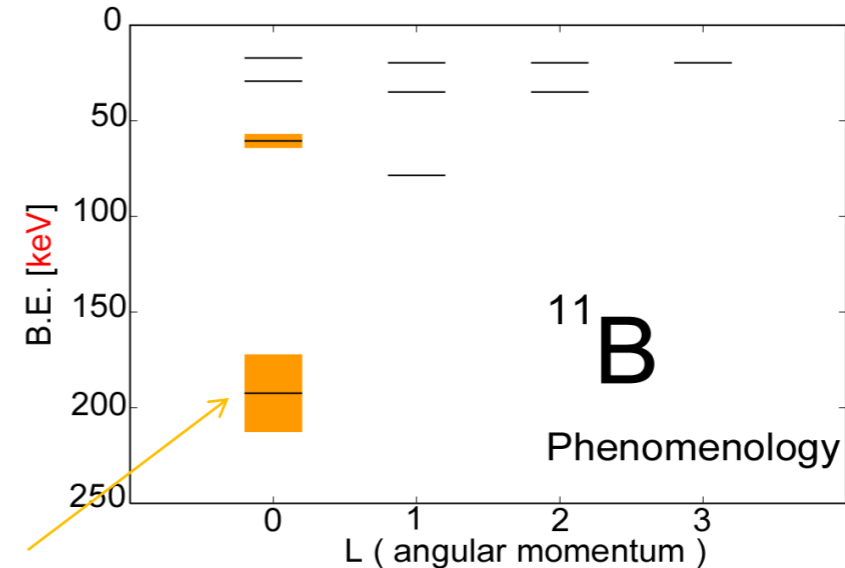
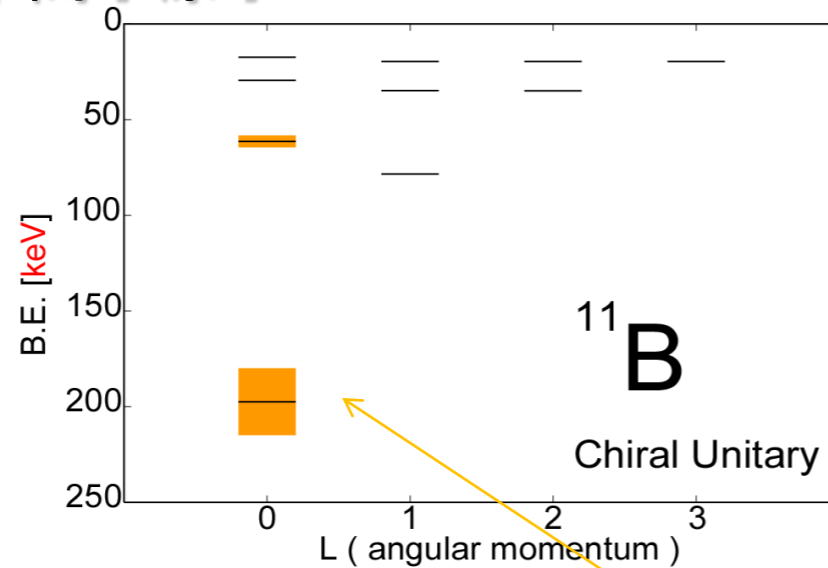
①: Klein-Gordon方程式を解く

$$[-\vec{\nabla}^2 + \mu^2 + 2\mu V_{\text{opt}}(r, E)]\phi(\vec{r}) = [E - V_{\text{coul}}(r)]^2 \phi(\vec{r})$$

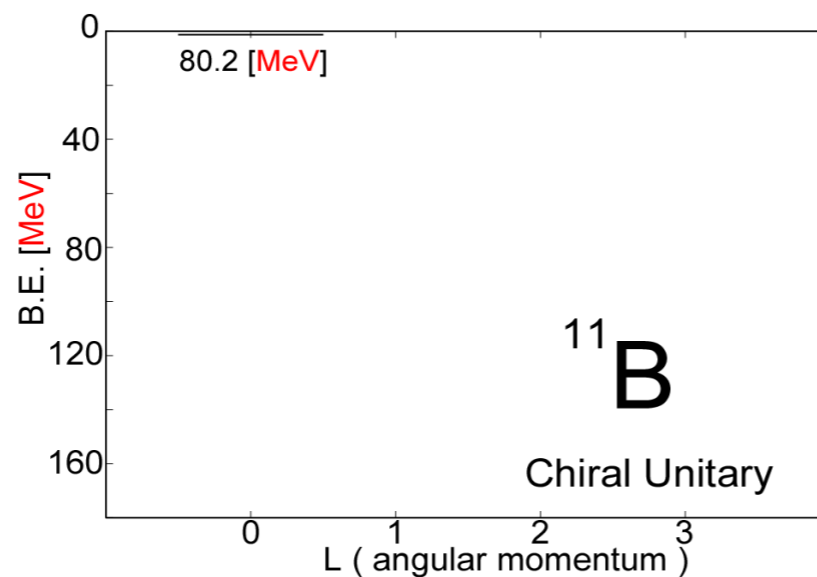
K-中間子と¹¹B核の計算結果

束縛エネルギー
小
↓
大

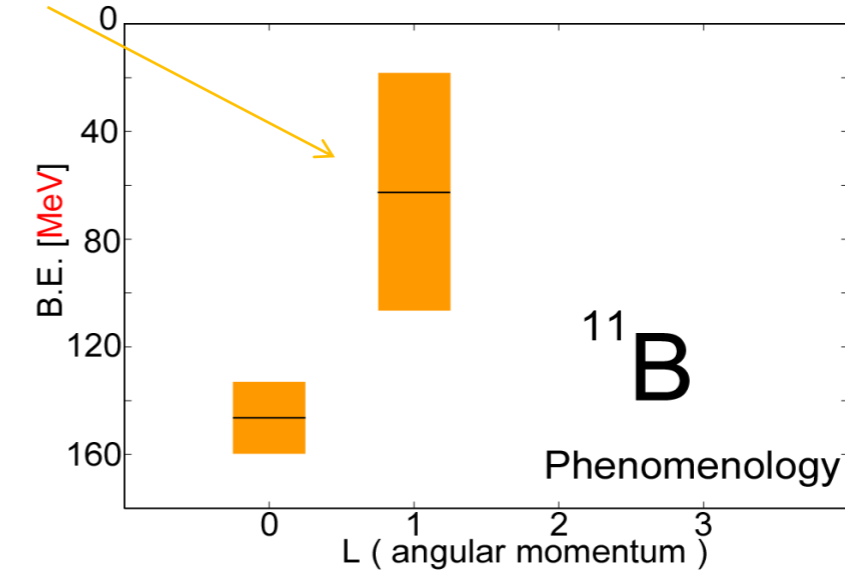
K-中間子原子



K-中間子原子核



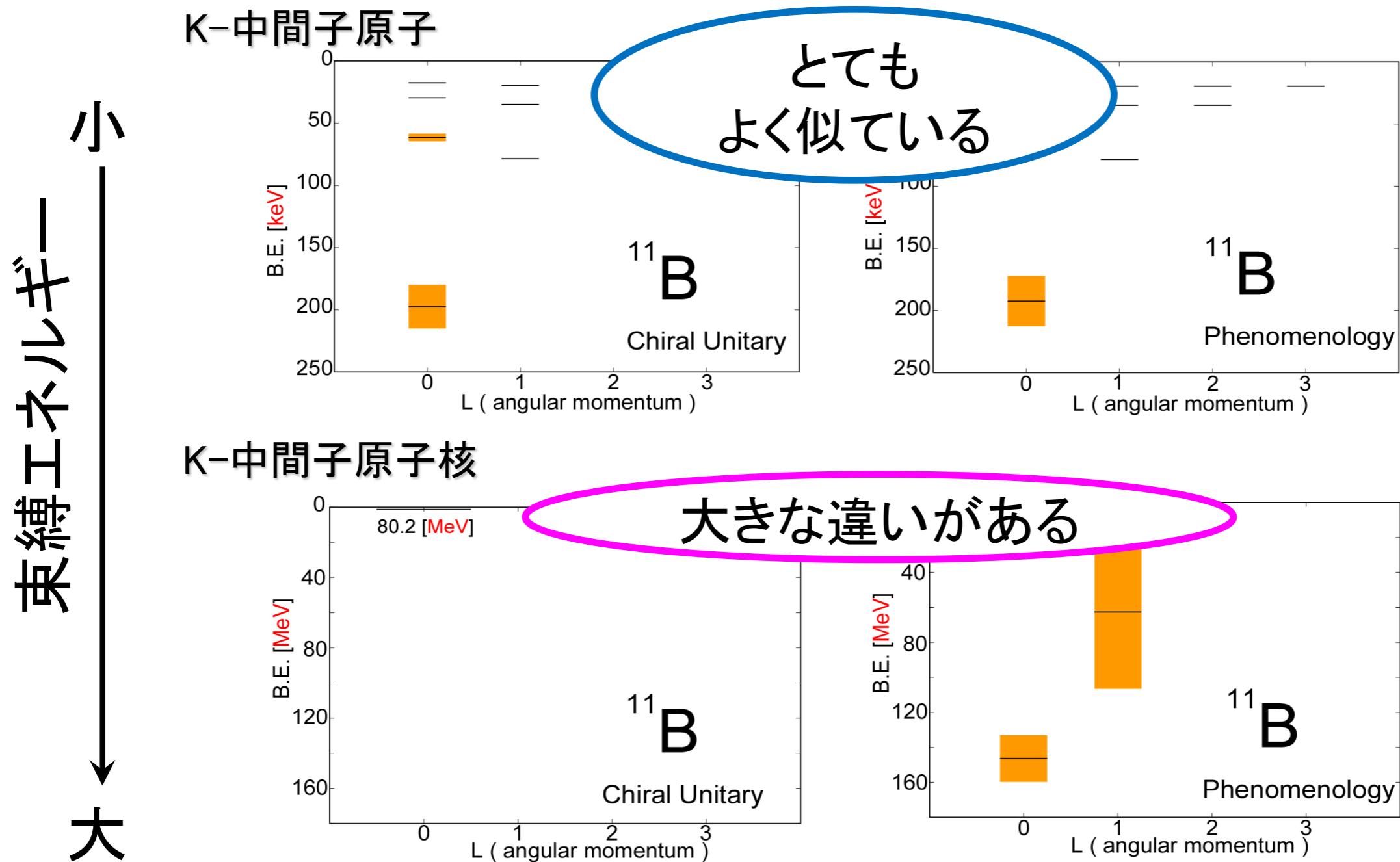
崩壊幅



①: Klein-Gordon方程式を解く

$$[-\vec{\nabla}^2 + \mu^2 + 2\mu V_{\text{opt}}(r, E)]\phi(\vec{r}) = [E - V_{\text{coul}}(r)]^2 \phi(\vec{r})$$

K-中間子と¹¹B核の計算結果



Kaon–Nucleus systems

Kaonic Nuclei

Strong Int.

10 – 100 MeV ?

幅が広い

(but, if B.E. > 100 MeV, Γ is narrow)

A few

Bound system

B.E.

Width

EXP.

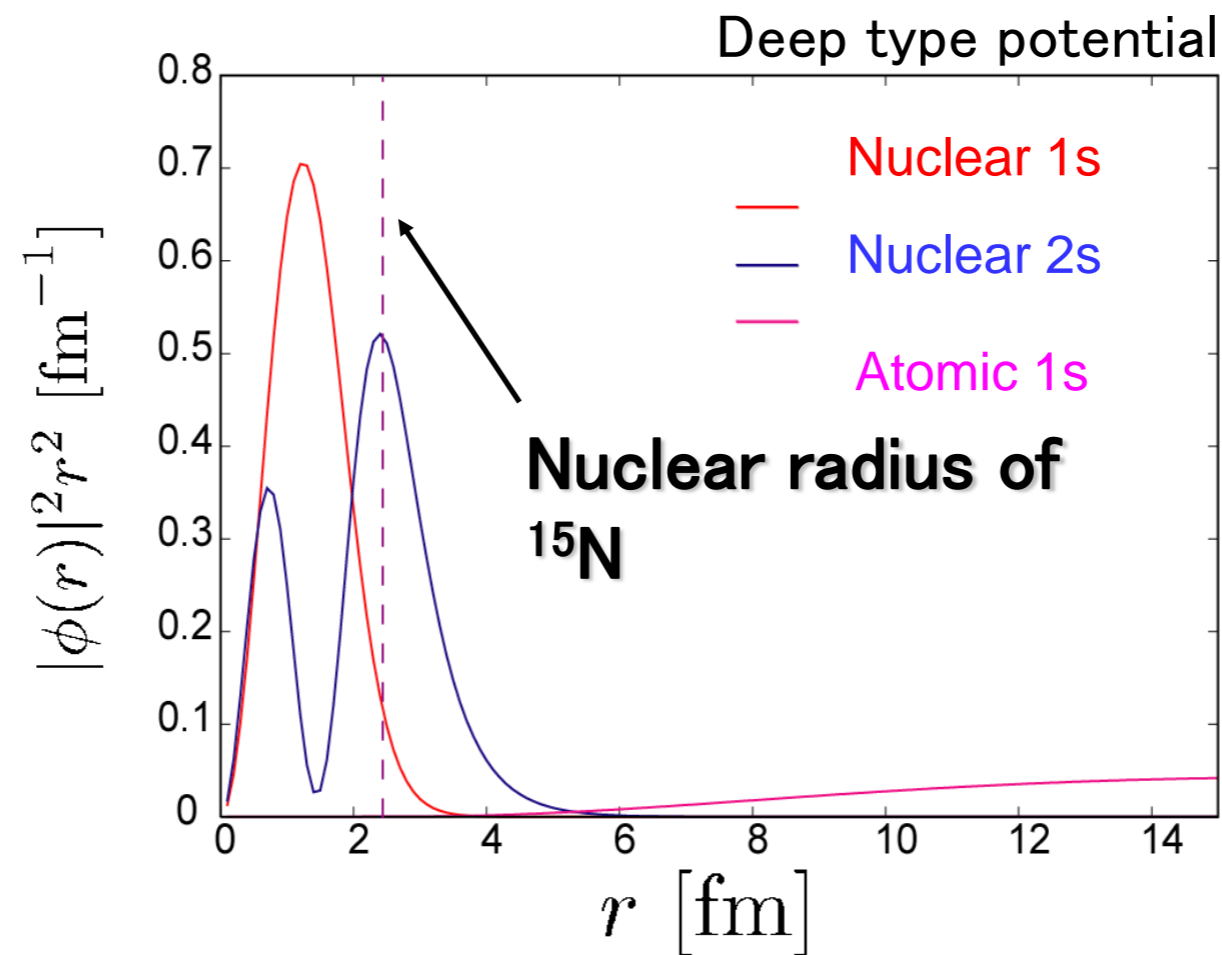
Kaonic Atoms

Coulomb Int.

keV–MeV

幅が狭い

Many



Kaon-Nucleus systems

Kaonic Nuclei

Strong Int.

10 – 100 MeV ?

幅が広い

(but, if B.E. > 100 MeV, Γ is narrow)

A few

Bound system

B.E.

Width

EXP.

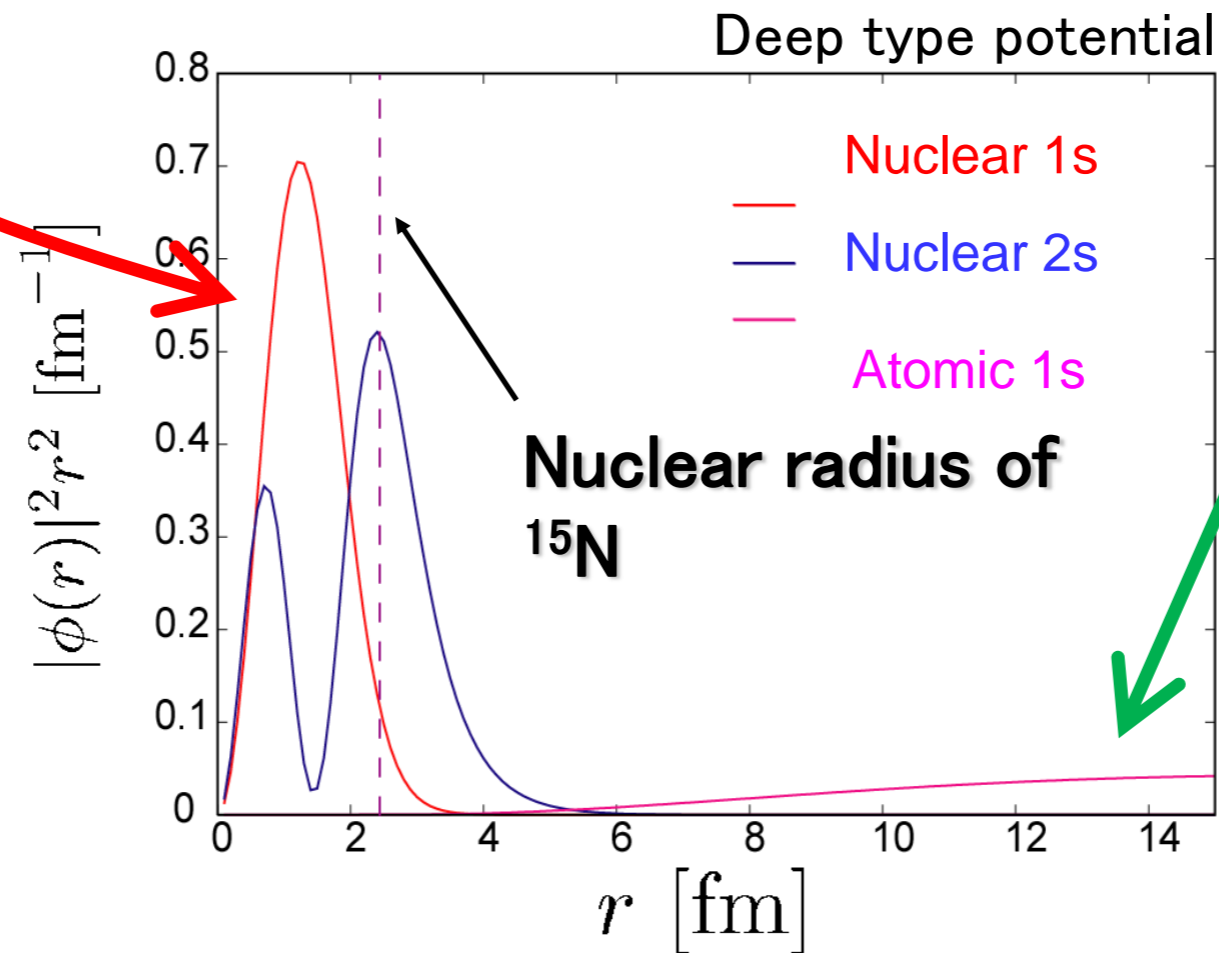
Kaonic Atoms

Coulomb Int.

keV–MeV

幅が狭い

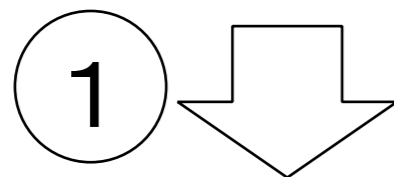
Many



* 研究手順 *

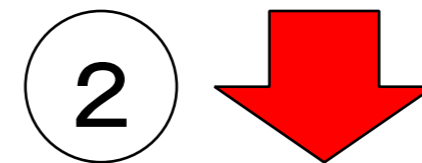
2つの相互作用を用いる！

- Chiral Unitary模型: **理論**模型。実験データを再現する。
- 現象論的模型:
K-中間子原子の**実験データ**を再現するようにパラメータフィット。



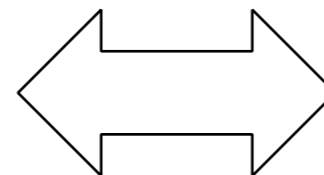
構造

Klein-Gordon 方程式を用いて
束縛エネルギーと崩壊幅を
計算する。



生成断面積

Green関数法を用いて
生成断面積を計算する。



3

1 : K-中間子が原子核に束縛するかどうか

-> K-中間子は束縛する。K-中間子原子核は存在する。

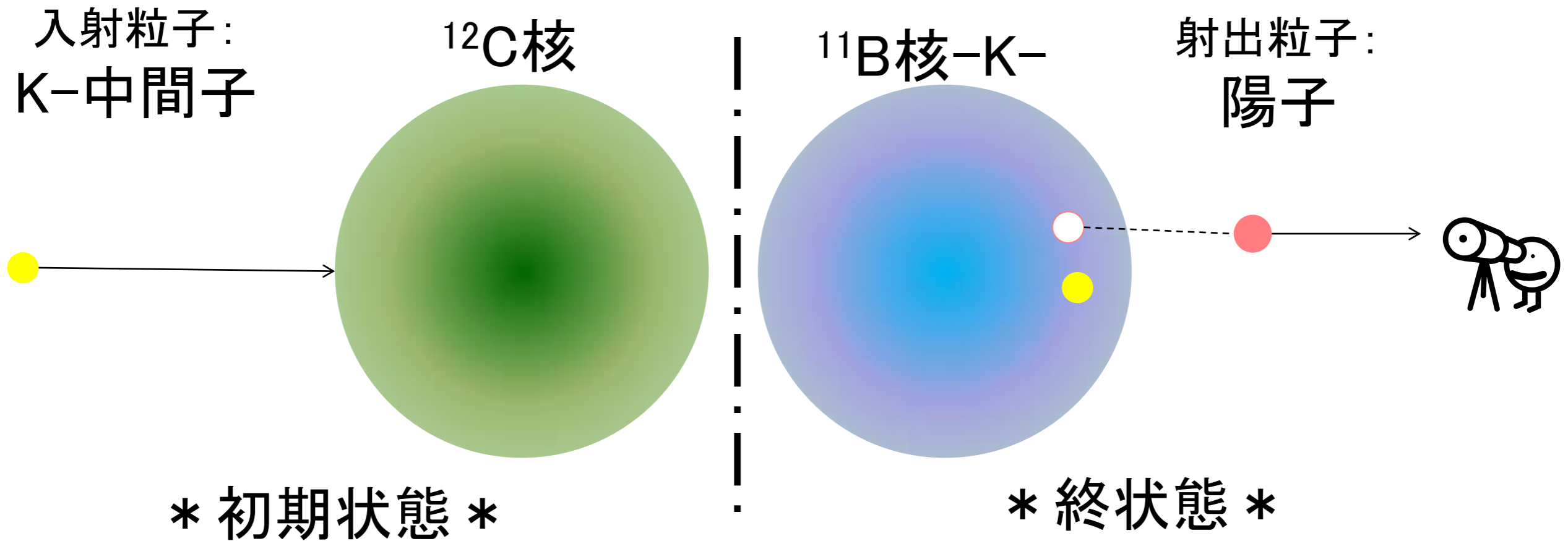
2 : 実験でどのように観測されるか

3 : 計算結果の生成断面積と束縛状態の関係

② Green関数法を用いて生成断面積を計算する。

どうやってK-中間子-原子核系を生成するか？

用いる反応：(K-,p)反応, 標的核 ^{12}C



標的核の中にある陽子と入射K-中間子がぶつかって、
陽子が飛び出して代わりにK-中間子が束縛する。
つまり、“素”になる反応(素過程)は、 $\text{K}^- + \text{p} \rightarrow \text{p} + \text{K}^-$ 。

陽子を観測することにより、
“ ^{11}B 核-K-”のK-中間子-原子核系を探る！！

② Green関数法を用いて生成断面積を計算する。

O. Morimatsu, K. Yazaki NPA435 (85)727

O. Morimatsu, K. Yazaki NPA483 (88)493

JY, Nagahiro, Hirenzaki, PRC74(06)014604

Green関数法

* 素過程 : $K^- p \rightarrow p K^-$

$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{K^- p \rightarrow p K^-} \sum_{\alpha} -\frac{1}{\pi} \text{Im} \int d\vec{r}' d\vec{r} f_{\alpha}^*(\vec{r}') G(E; \vec{r}', \vec{r}) f_{\alpha}(\vec{r})$$

素過程 $K^- p \rightarrow p K^-$ の断面積
(実験データ)

標的核の中の陽子、入射 K^- 中間子、
射出陽子を記述する。

$$f_{\alpha}(\vec{r}) = \chi_p^*(\vec{r}) \chi_K(\vec{r}) \langle \alpha | \psi_p(\vec{r}) | i \rangle$$

K^- 中間子のグリーン関数

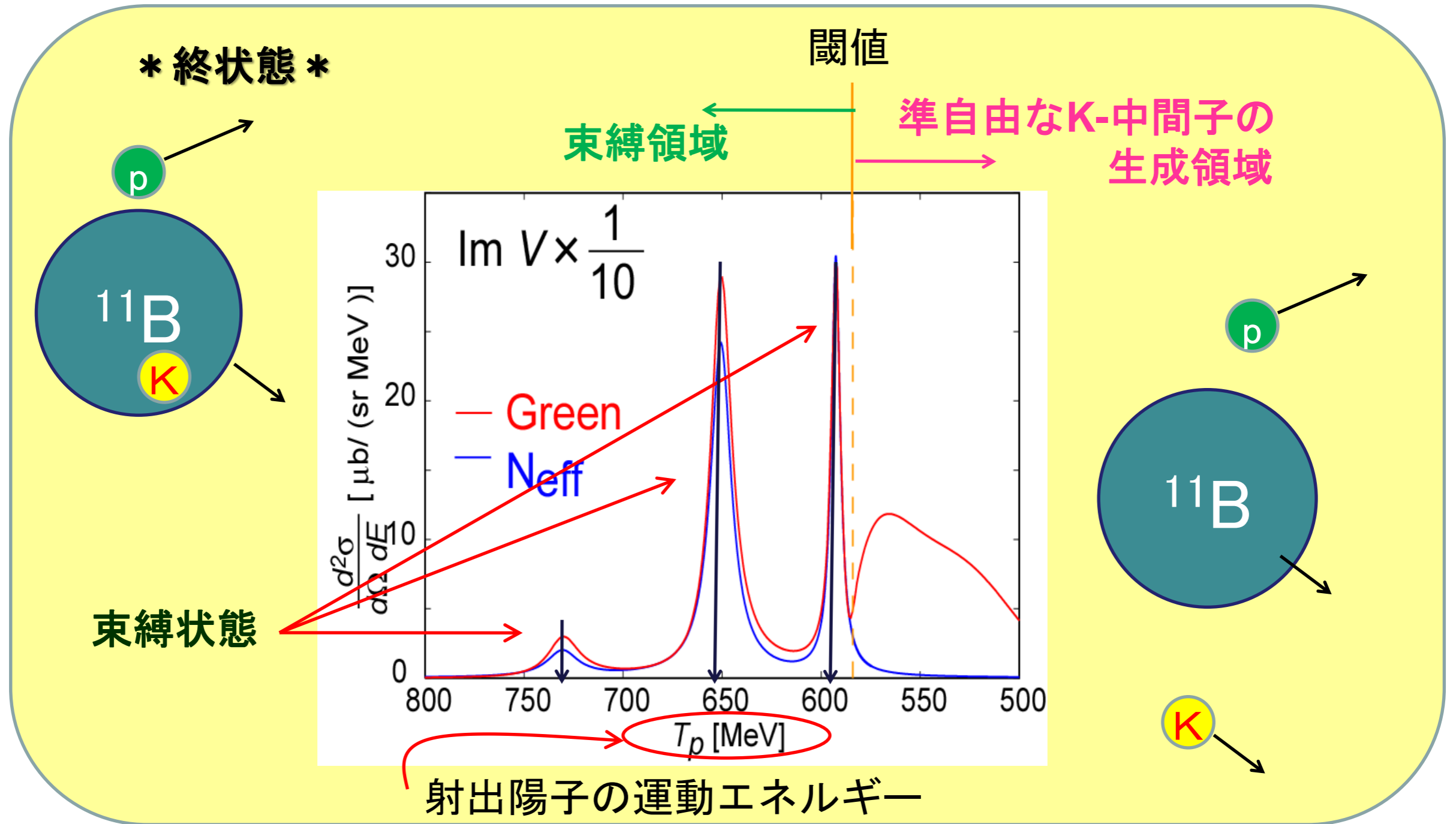
$$G(E; \vec{r}', \vec{r})$$

$$\left[-\nabla^2 + \mu^2 + 2\mu V_{\text{opt}}(r, E) - (E - V_{\text{coul}}(r))^2 \right] G(E; \vec{r}', \vec{r}) = \delta^3(\vec{r} - \vec{r}')$$

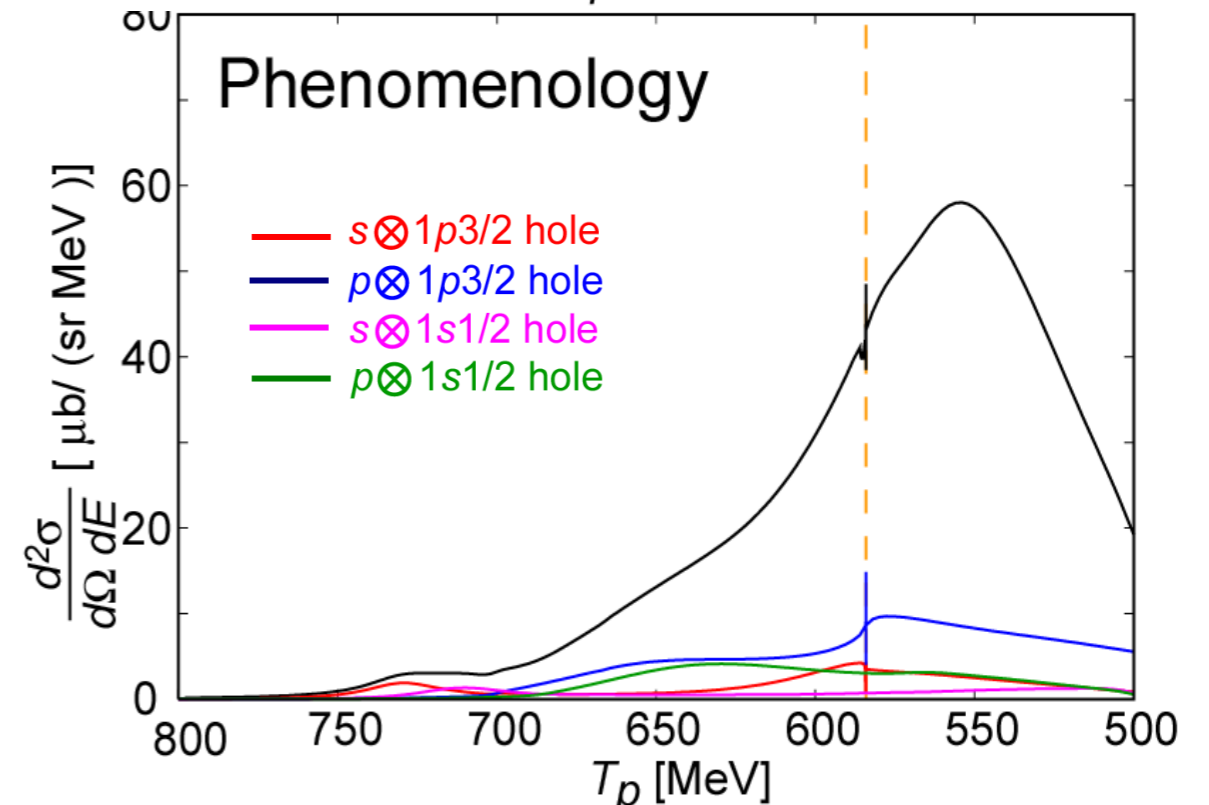
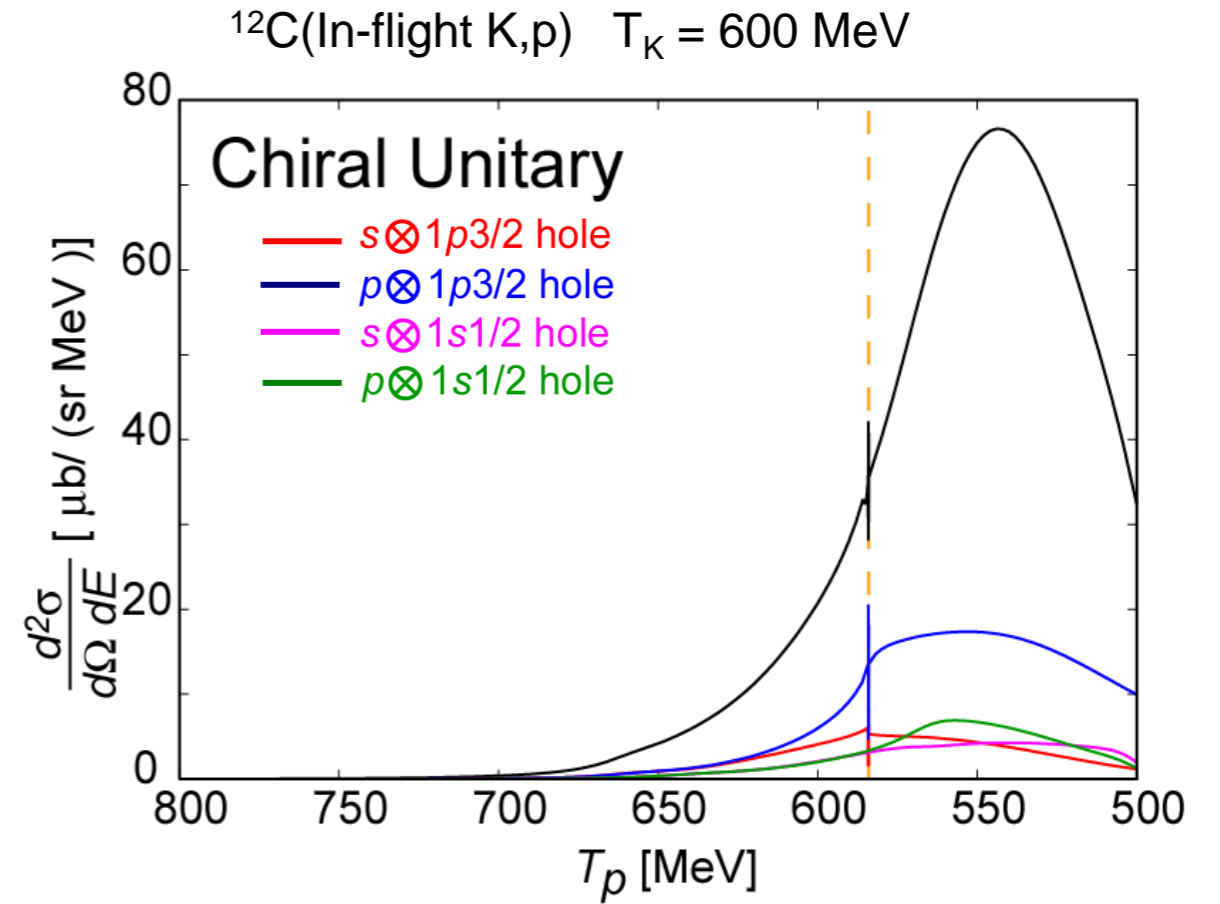
これで、実験データと直接比較可能な生成断面積を
計算することができる！！！！

② Green関数法を用いて生成断面積を計算する。

(K-,p)反応の生成断面積:



2 Green関数法を用いて生成断面積を計算する。



* 研究手順 *

2つの相互作用を用いる！

- ・Chiral Unitary模型：**理論**模型。実験データを再現する。
- ・現象論的模型：
K-中間子原子の**実験データ**を再現するようにパラメータフィット。

① ↓

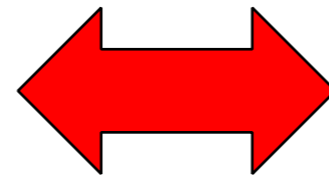
構造

Klein-Gordon 方程式を用いて
束縛エネルギーと崩壊幅を
計算する。

② ↓

生成断面積

Green関数法を用いて
生成断面積を計算する。



③

① : K-中間子が原子核に束縛するかどうか

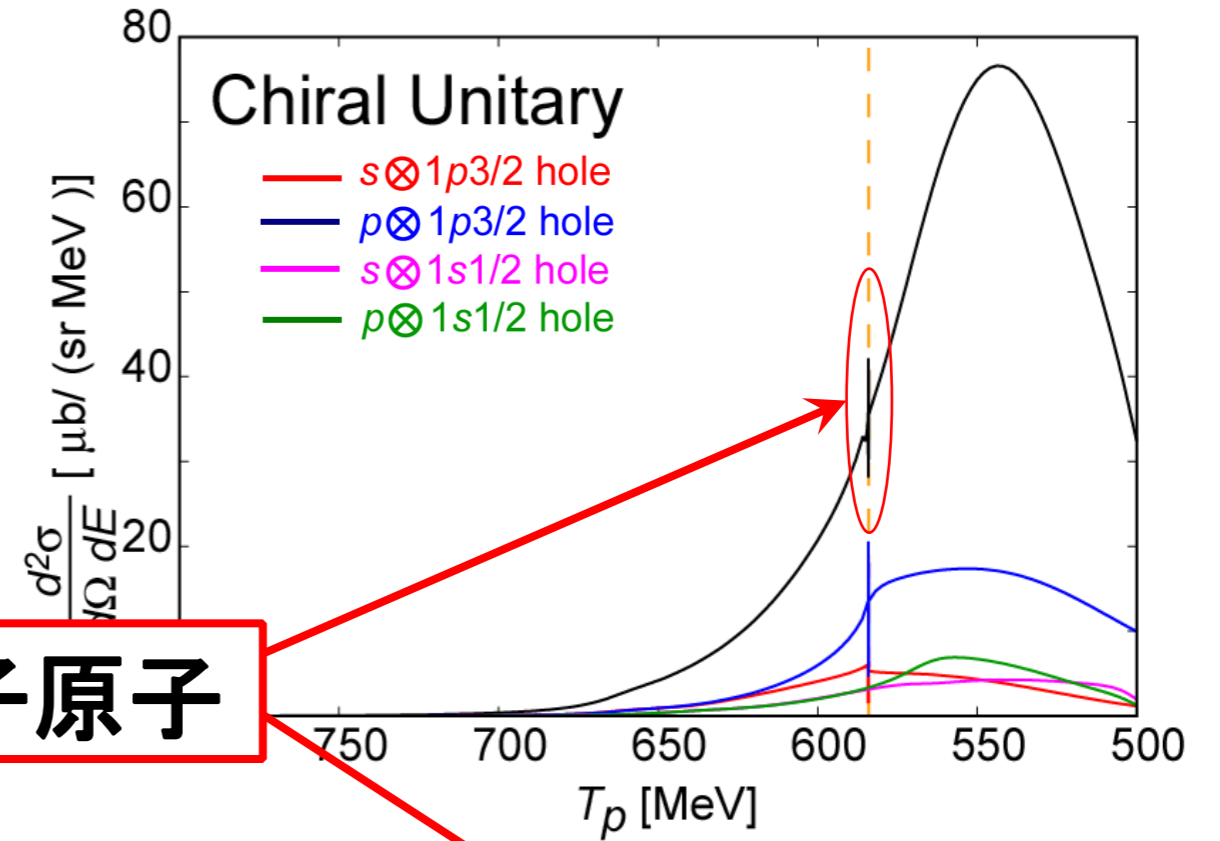
→ **K-中間子は束縛する。K-中間子原子核は存在する。**

② : 実験でどのように観測されるか

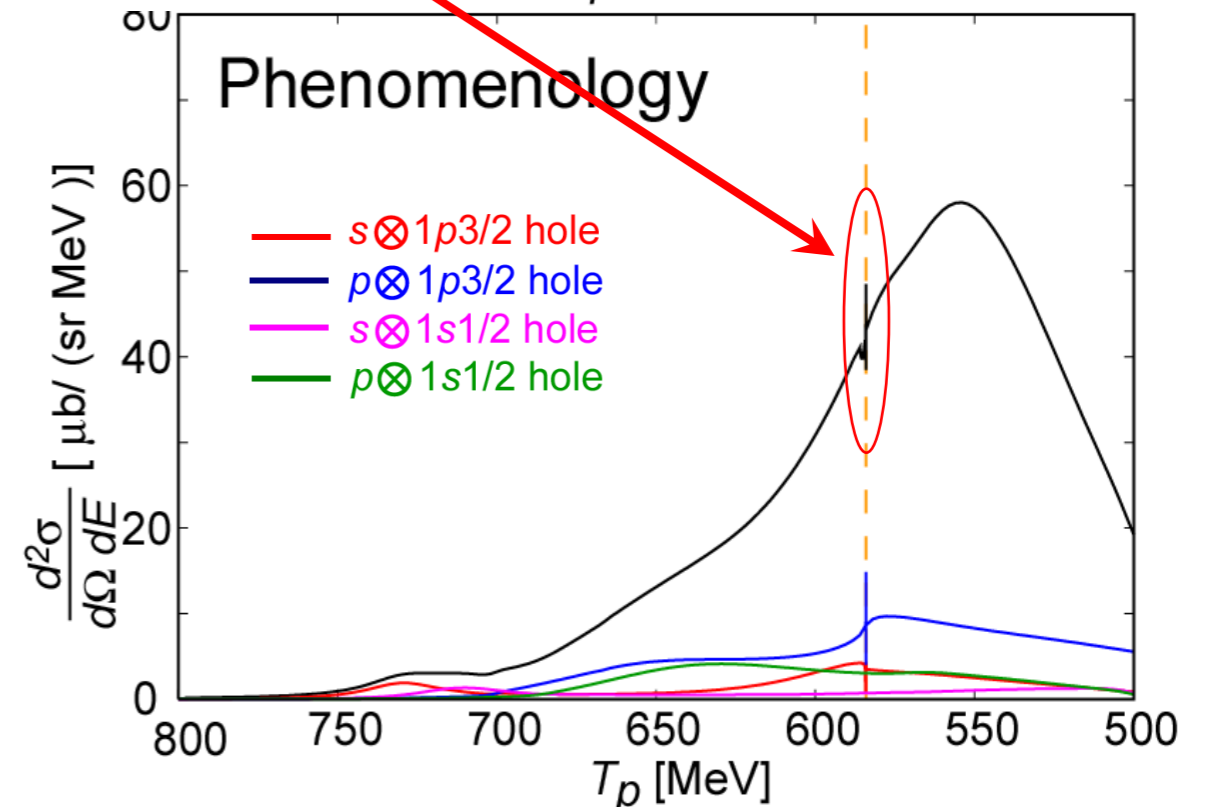
→ **ピーク構造はなく、なだらかな振舞。**③ : 計算結果の生成断面積と束縛状態の関係

3 生成断面積と束縛状態の関係を考察する

$^{12}\text{C}(\text{In-flight } K, p) \quad T_K = 600 \text{ MeV}$

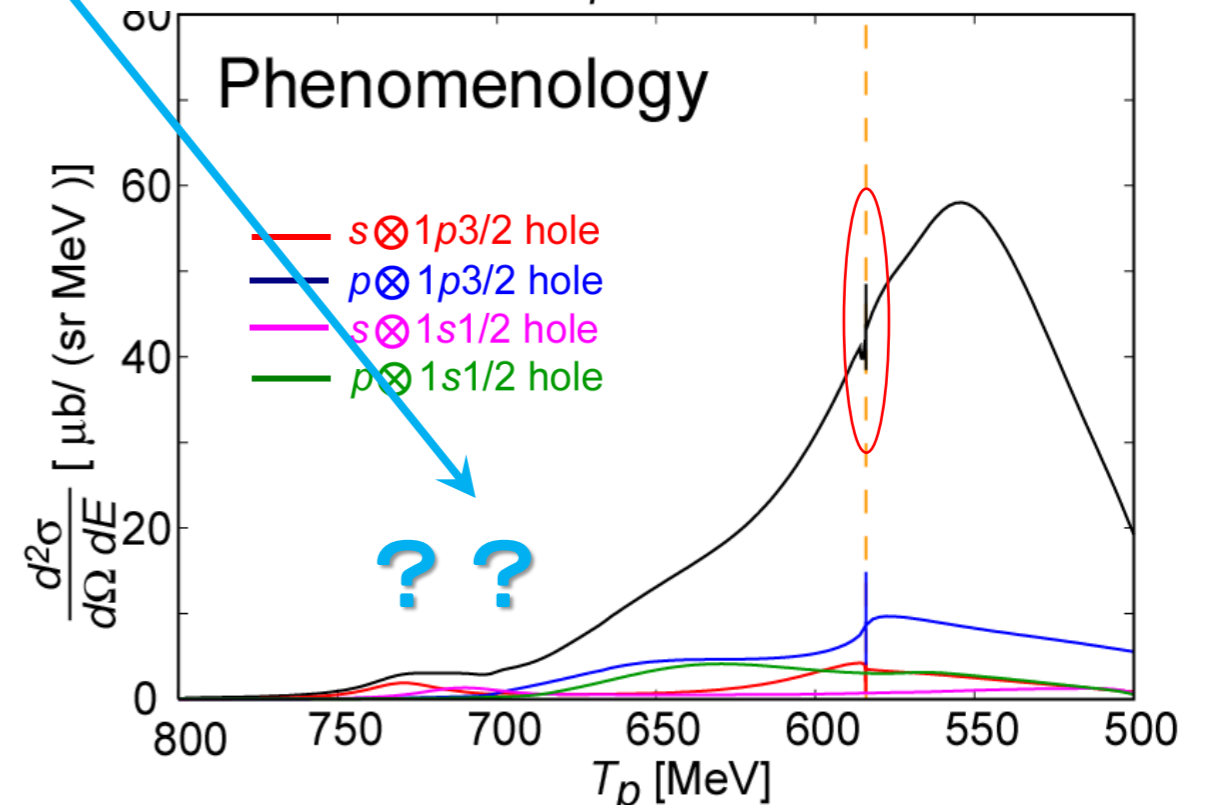
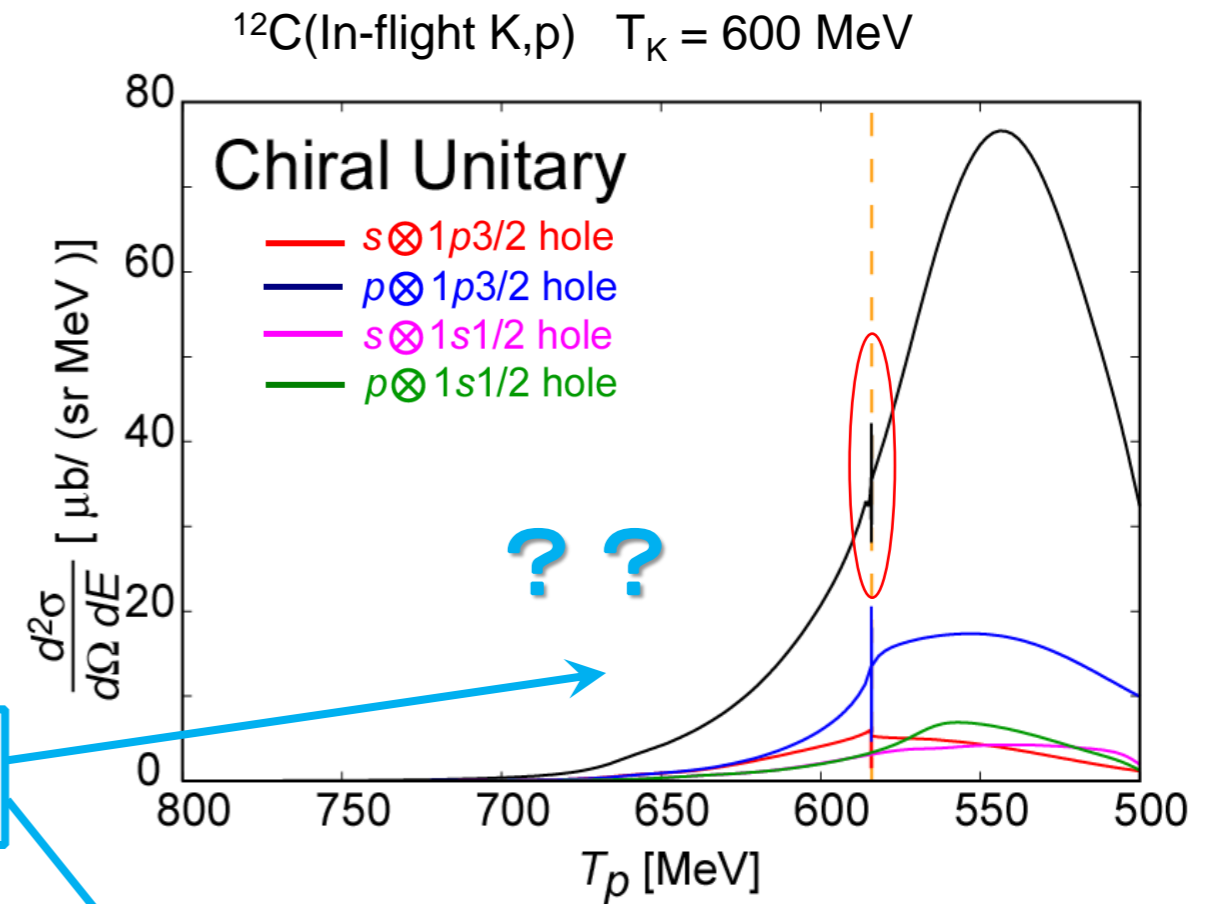


K-中間子原子



3 生成断面積と束縛状態の関係を考察する

K-中間子原子核



3 生成断面積と束縛状態の関係を考察する

K-中間子原子核の束縛状態は存在していたはず！！

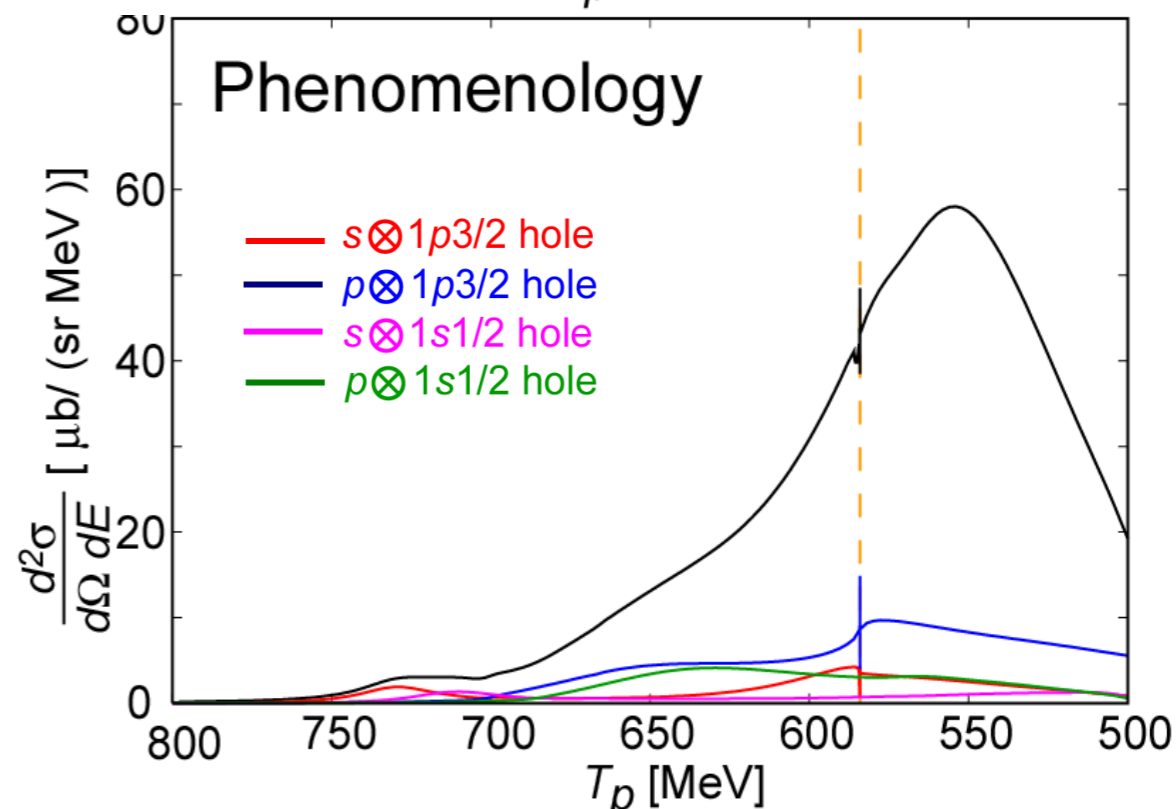
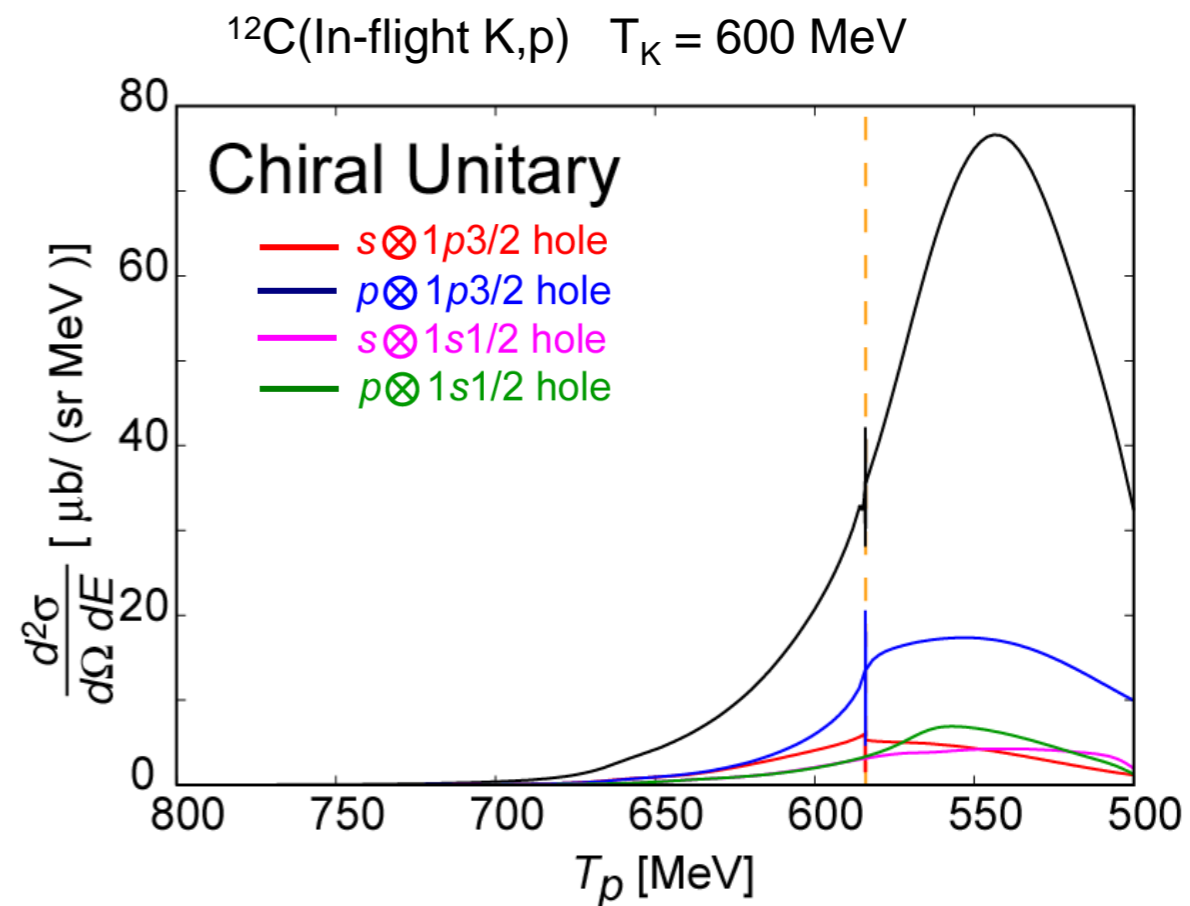
それに。。。

2つの相互作用の振舞は大きく異なり、束縛状態も全く違っていたのに。。。



見えない理由：

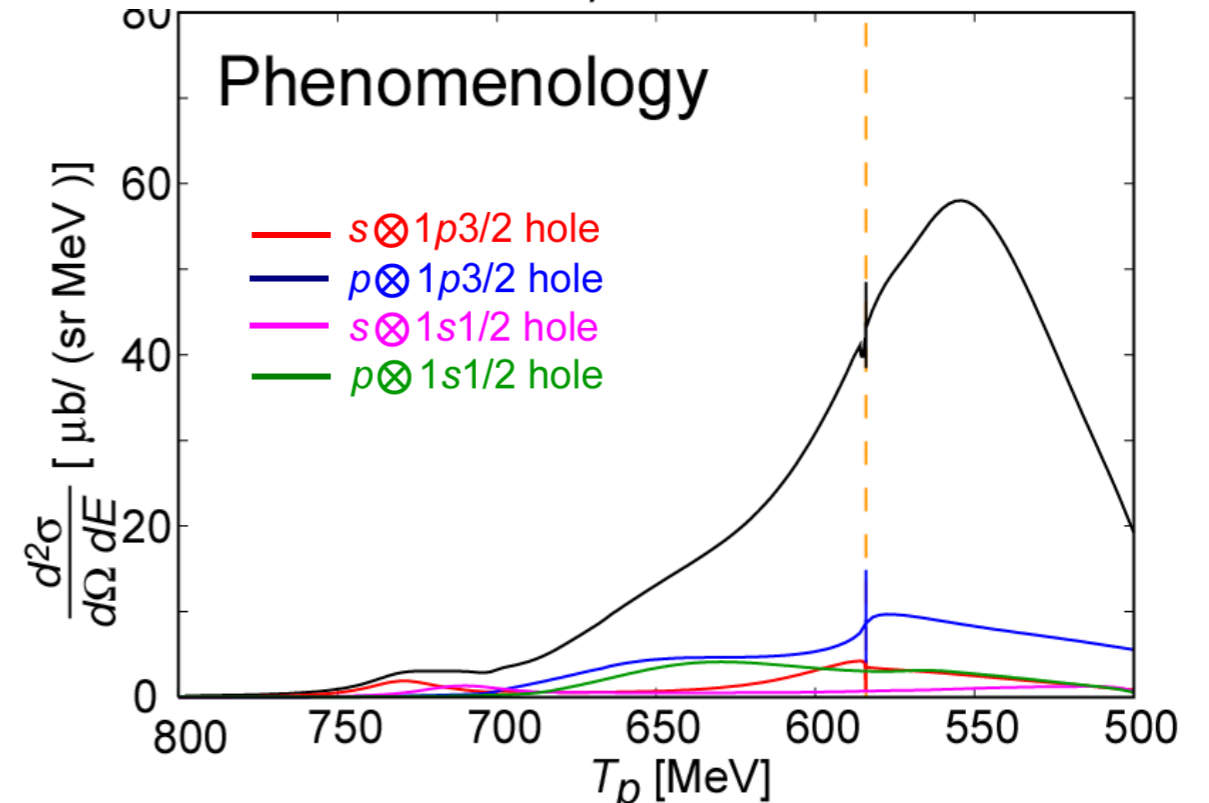
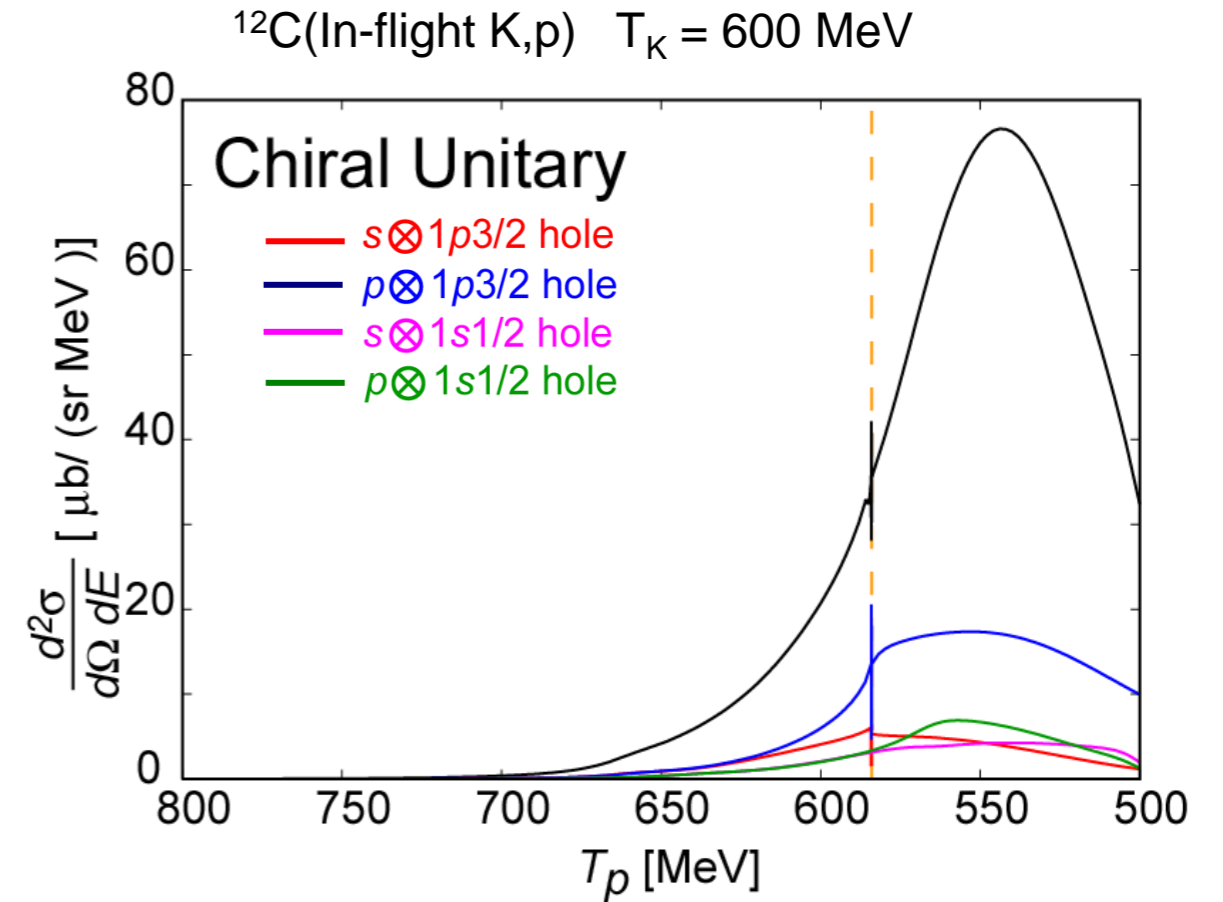
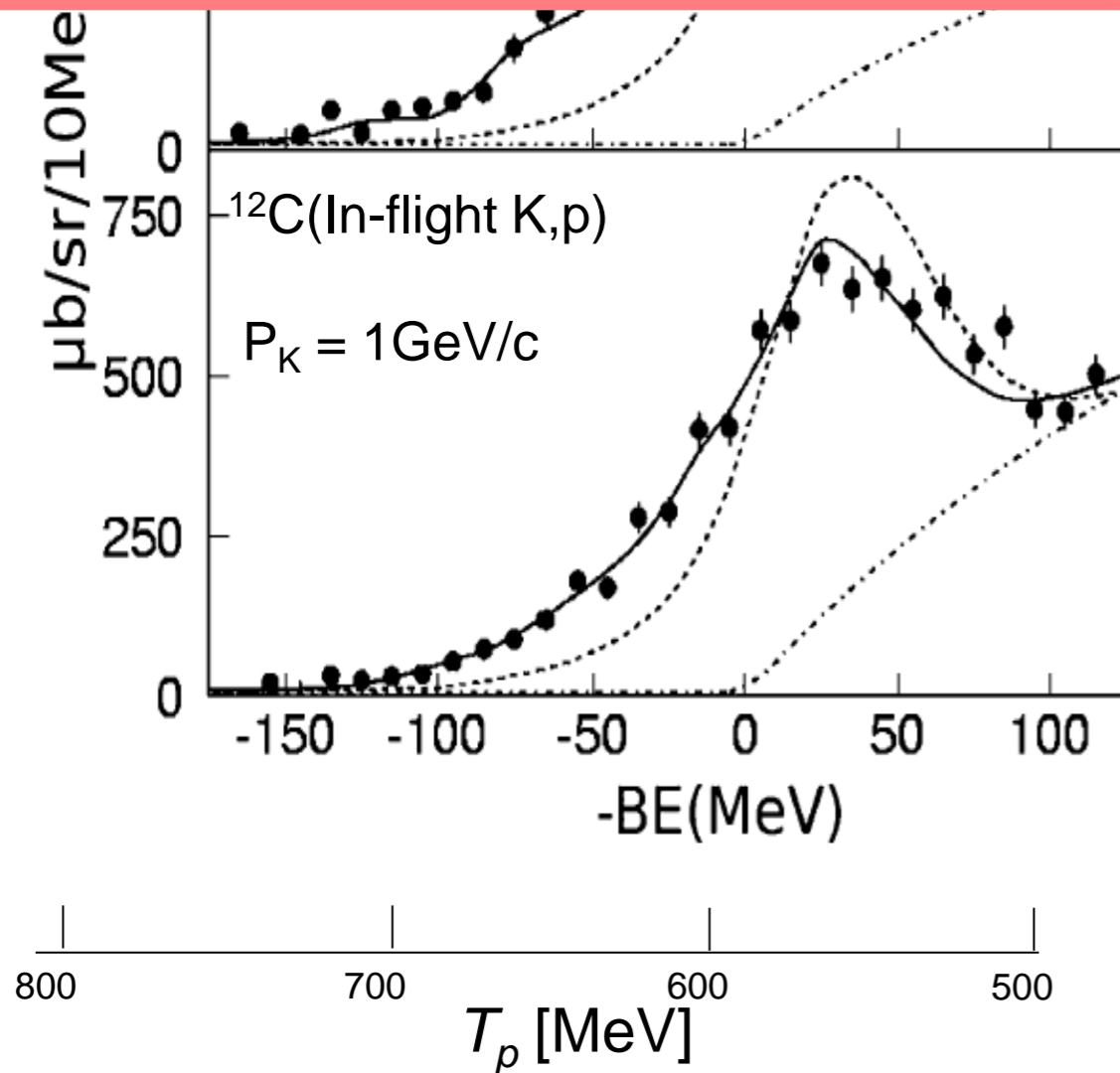
1. K-中間子原子核状態の崩壊幅が大きい
2. 多くの状態が重なっている



3 生成断面積と束縛状態の関係を考察する

* 実験データと比較 *

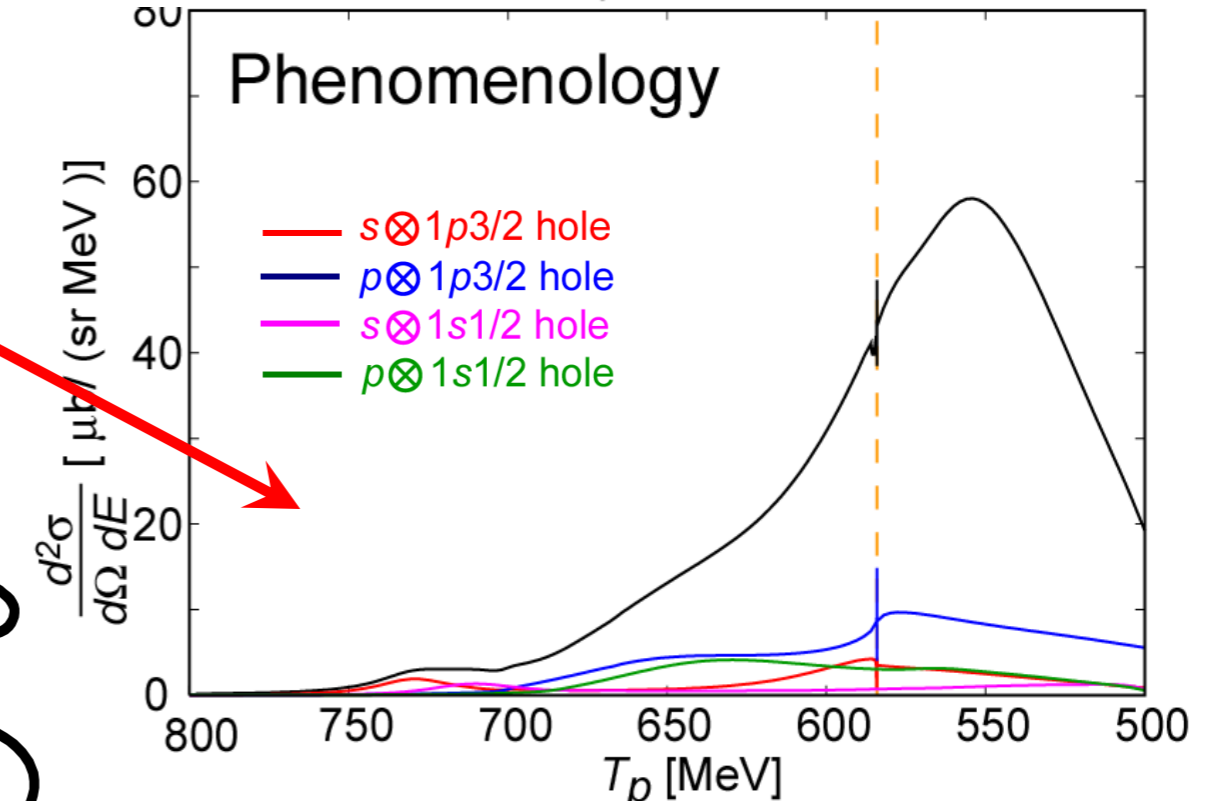
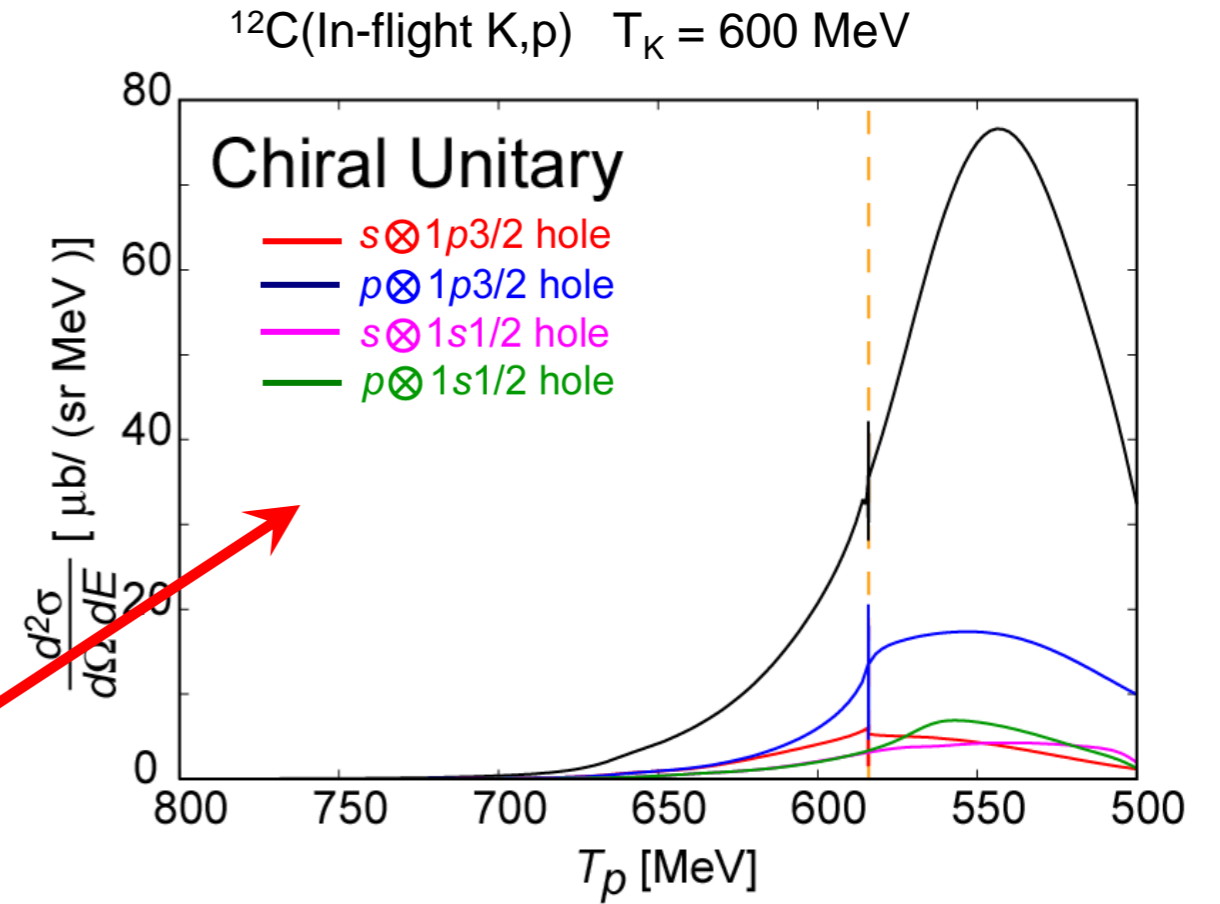
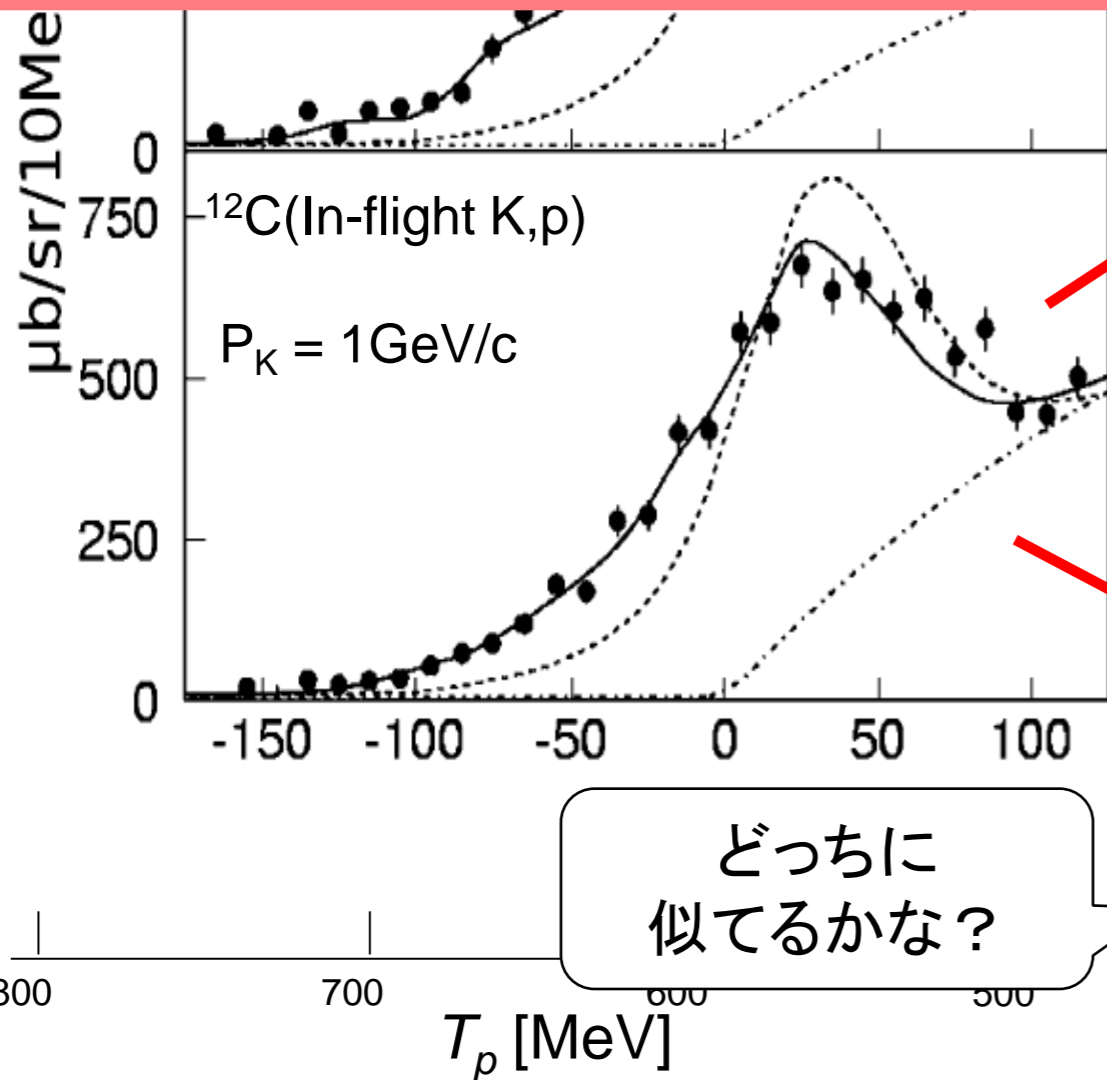
束縛状態が見えないから終わり
じゃない！！
全体の振舞を比べてみよう。



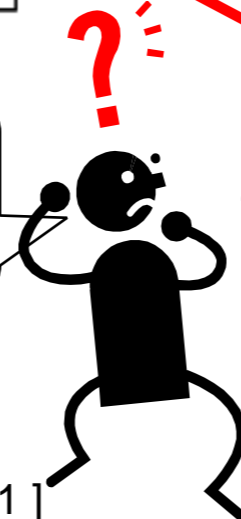
3 生成断面積と束縛状態の関係を考察する

* 実験データと比較 *

束縛状態が見えないから終わりじゃない！！
全体の振舞を比べてみよう。



どっちに似てるかな？

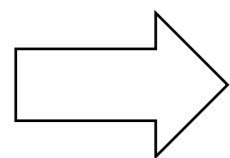


3 生成断面積と束縛状態の関係を考察する

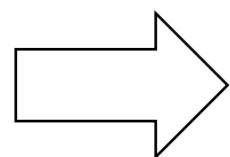
* 理論計算と実験データと比較 *

理論: 2つの相互作用の違いをこの結果から引き出すのは
難しいのではないか。。。

実験: データは”深い”K-中間子-原子核間相互作用を示している。
(現象論的相互作用のような。。。)



誰もが納得できるようなケースを考えよう！！

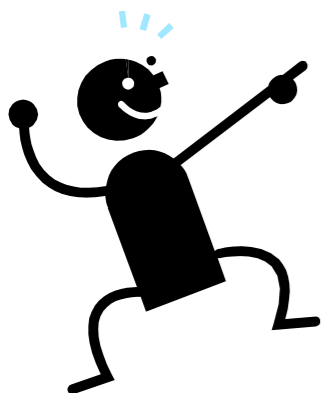


もっともシンプルなK-中間子原子核系

${}^3\text{He}(K^-,n) K^-pp$

理論: 浅い相互作用でも束縛状態の構造が見えそう。

実験: 大型加速器施設J-PARCにて実験が行われ、解析中。

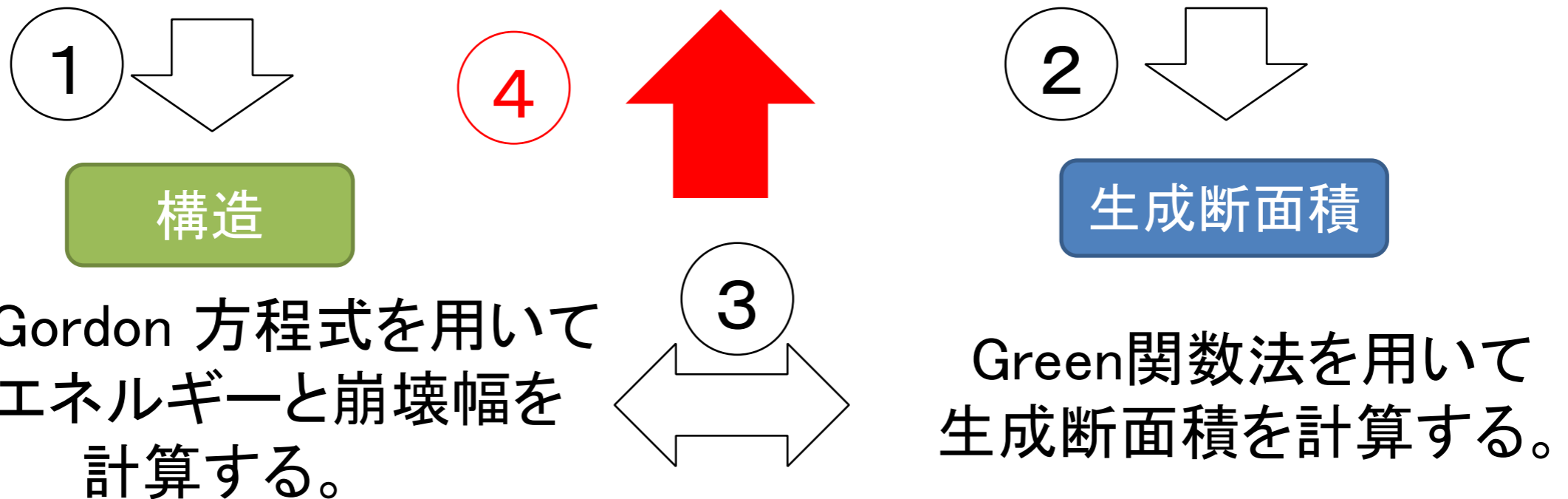


* 今後 *

相互作用

2つの相互作用を用いる！

- ・Chiral Unitary模型：**理論**模型。実験データを再現する。
- ・現象論的模型：
K-中間子原子の**実験データ**を再現するようにパラメータフィット。

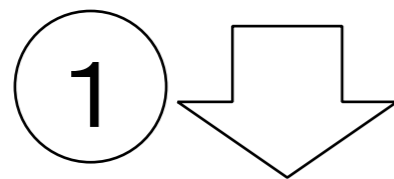


- ① : K-中間子が原子核に束縛するかどうか
→ **K-中間子は束縛する。K-中間子原子核は存在する。**
- ② : 実験でどのように観測されるか
→ **ピーク構造はなく、なだらかな振舞。**
- ③ : 計算結果の生成断面積と束縛状態の関係
→ **束縛状態を観測するためには、もっともシンプルなK-中間子原子核状態がよさそうだ！！**

* 今後 *

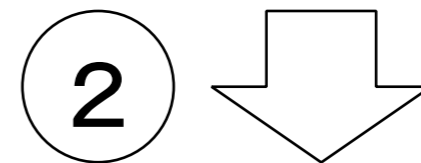
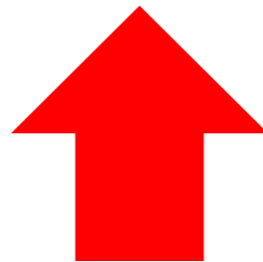
2つの相互作用を用いる！

- ・Chiral Unitary模型：**理論**模型。実験データを再現する。
- ・現象論的模型：
K-中間子原子の**実験データ**を再現するようにパラメータフィット。



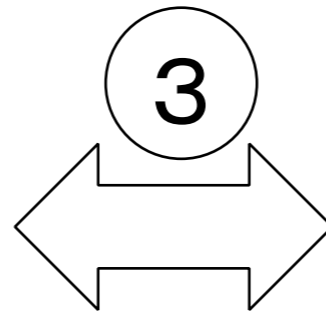
構造

Klein-Gordon 方程式を用いて
束縛エネルギーと崩壊幅を
計算する。



生成断面積

Green関数法を用いて
生成断面積を計算する。



K-中間子－原子核間の相互作用を決定！！

原子核密度中におけるK-中間子の性質解明。