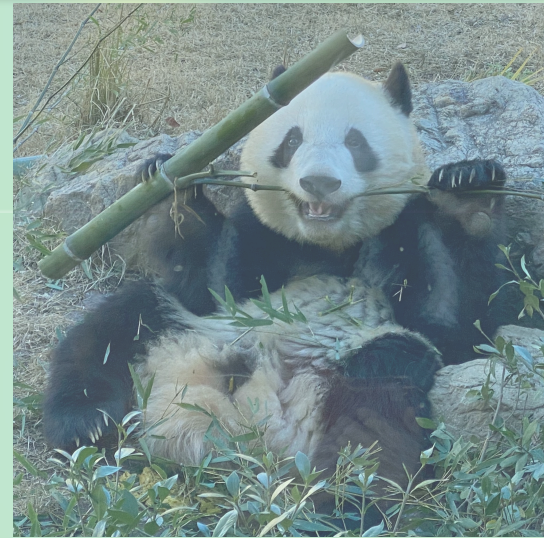


# フェムトスコピーによる ハドロン間相互作用の研究



兵藤 哲雄

東京都立大学

## 目次

 導入：ハドロン物理とフェムトスコーピー ハドロン相関関数とエキゾチックハドロン

-  $K^-p$  相関と  $\Lambda(1405)$

Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020)

-  $DD^* / D\bar{D}^*$  相関と  $T_{cc} / X(3872)$

Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022)

 ハドロン・原子核相関関数とハイパー核物理

-  $\Lambda\alpha$  相関と核媒質中の  $\Lambda$

A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation

 まとめ



# 観測されているハドロン(2022)

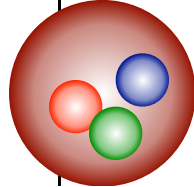
Particle Data Group (PDG) 2022版

<http://pdg.lbl.gov/>

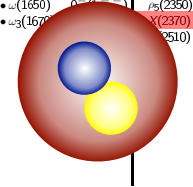
$p$	$n$	$\Delta$	$\Sigma^+$	$\Sigma^0$	$\Sigma^-$	$\Lambda^+$	$\Lambda^0$	$\Lambda_b^0$
$1/2^+$	$1/2^+$	$3/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
****	****	****	****	****	****	****	****	****
$\Delta(1232)$	$\Delta(1600)$	$\Delta(1620)$	$\Delta(1385)$	$\Delta(1750)$	$\Delta(1900)$	$\Delta(1920)$	$\Delta(1930)$	$\Delta(1940)$
$3/2^+$	$1/2^-$	$3/2^-$	$3/2^+$	$1/2^+$	$3/2^-$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
****	****	****	****	****	****	****	****	****
$N(1440)$	$N(1520)$	$N(1535)$	$N(1650)$	$N(1675)$	$N(1680)$	$N(1700)$	$N(1710)$	$N(1720)$
$1/2^+$	$3/2^-$	$1/2^+$	$1/2^-$	$5/2^+$	$5/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
****	****	****	****	****	****	****	****	****
$N(1860)$	$N(1875)$	$N(1880)$	$N(1895)$	$N(1900)$	$N(1910)$	$N(1920)$	$N(1930)$	$N(1940)$
$1/2^+$	$3/2^-$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
****	****	****	****	****	****	****	****	****
$N(2040)$	$N(2060)$	$N(2100)$	$N(2120)$	$N(2190)$	$N(2200)$	$N(2250)$	$N(2300)$	$N(2570)$
$3/2^+$	$5/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$7/2^+$	$9/2^+$	$11/2^+$	$13/2^-$	$13/2^+$
*	*	*	*	****	****	****	****	****
$\Lambda(1380)$	$\Lambda(1405)$	$\Lambda(1520)$	$\Lambda(1600)$	$\Lambda(1670)$	$\Lambda(1690)$	$\Lambda(1710)$	$\Lambda(1800)$	$\Lambda(1810)$
$1/2^-$	$1/2^-$	$3/2^-$	$1/2^+$	$1/2^-$	$3/2^-$	$1/2^+$	$1/2^-$	$1/2^-$
****	****	****	****	****	****	****	****	****
$\Lambda(1820)$	$\Lambda(1830)$	$\Lambda(1890)$	$\Lambda(2000)$	$\Lambda(2050)$	$\Lambda(2070)$	$\Lambda(2080)$	$\Lambda(2085)$	$\Lambda(2100)$
$5/2^+$	$5/2^-$	$3/2^+$	$1/2^-$	$7/2^-$	$7/2^-$	$7/2^-$	$7/2^-$	$5/2^+$
****	****	****	****	****	****	****	****	****
$\Lambda(2110)$	$\Lambda(2325)$	$\Lambda(2350)$	$\Lambda(2585)$	$\Omega(201)$	$\Omega(225)$	$\Omega(238)$	$\Omega(247)$	$\Omega(247)$
$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
****	****	****	****	****	****	****	****	****

LIGHT UNFLAVORED ( $S=C=B=0$ )		STRANGE ( $S=\pm 1, C=B=0$ )		CHARMED, STRANGE ( $C=\pm 1, S=\pm 1$ ) (+ possibly non- $q\bar{q}$ states)		$c\bar{c}$ continued $\bar{c}c$	
$F(J^PC)$	$F^*(J^PC)$	$F(J^PC)$	$F^*(J^PC)$	$F(J^PC)$	$F^*(J^PC)$	$F(J^PC)$	$F^*(J^PC)$
$\pi^\pm$	$\pi^0$	$\rho^\pm$	$\rho^0$	$\eta$	$\eta'$	$\eta_c$	$\eta_c'$
$1^-(0^-)$	$1^-(0^-)$	$1^-(1^-)$	$1^-(1^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\omega(782)$	$\omega(1370)$	$\phi(1020)$	$\phi(1680)$	$\omega(1450)$	$\omega(1780)$	$\omega(2000)$	$\omega(2350)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(958)$	$\eta(1750)$	$\eta(1835)$	$\eta(2200)$	$\eta(2350)$	$\eta(2450)$	$\eta(2750)$	$\eta(3000)$
$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(1295)$	$\eta(1320)$	$\eta(1405)$	$\eta(1405)$	$\eta(1405)$	$\eta(1405)$	$\eta(1405)$	$\eta(1405)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(1520)$	$\eta(1520)$	$\eta(1520)$	$\eta(1520)$	$\eta(1520)$	$\eta(1520)$	$\eta(1520)$	$\eta(1520)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(1700)$	$\eta(1700)$	$\eta(1700)$	$\eta(1700)$	$\eta(1700)$	$\eta(1700)$	$\eta(1700)$	$\eta(1700)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(1900)$	$\eta(1900)$	$\eta(1900)$	$\eta(1900)$	$\eta(1900)$	$\eta(1900)$	$\eta(1900)$	$\eta(1900)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(2000)$	$\eta(2000)$	$\eta(2000)$	$\eta(2000)$	$\eta(2000)$	$\eta(2000)$	$\eta(2000)$	$\eta(2000)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(2100)$	$\eta(2100)$	$\eta(2100)$	$\eta(2100)$	$\eta(2100)$	$\eta(2100)$	$\eta(2100)$	$\eta(2100)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(2200)$	$\eta(2200)$	$\eta(2200)$	$\eta(2200)$	$\eta(2200)$	$\eta(2200)$	$\eta(2200)$	$\eta(2200)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(2300)$	$\eta(2300)$	$\eta(2300)$	$\eta(2300)$	$\eta(2300)$	$\eta(2300)$	$\eta(2300)$	$\eta(2300)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(2400)$	$\eta(2400)$	$\eta(2400)$	$\eta(2400)$	$\eta(2400)$	$\eta(2400)$	$\eta(2400)$	$\eta(2400)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(2500)$	$\eta(2500)$	$\eta(2500)$	$\eta(2500)$	$\eta(2500)$	$\eta(2500)$	$\eta(2500)$	$\eta(2500)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(2600)$	$\eta(2600)$	$\eta(2600)$	$\eta(2600)$	$\eta(2600)$	$\eta(2600)$	$\eta(2600)$	$\eta(2600)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(2700)$	$\eta(2700)$	$\eta(2700)$	$\eta(2700)$	$\eta(2700)$	$\eta(2700)$	$\eta(2700)$	$\eta(2700)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(2800)$	$\eta(2800)$	$\eta(2800)$	$\eta(2800)$	$\eta(2800)$	$\eta(2800)$	$\eta(2800)$	$\eta(2800)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(2900)$	$\eta(2900)$	$\eta(2900)$	$\eta(2900)$	$\eta(2900)$	$\eta(2900)$	$\eta(2900)$	$\eta(2900)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****
$\eta(3000)$	$\eta(3000)$	$\eta(3000)$	$\eta(3000)$	$\eta(3000)$	$\eta(3000)$	$\eta(3000)$	$\eta(3000)$
$0^-(0^-)$	$0^-(0^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$	$0^-(1^-)$
****	****	****	****	****	****	****	****

## 2年間で新たに発見されたハドロン



バリオン~170種



メソン~210種

全ての ~380種のハドロンはQCDから生じている

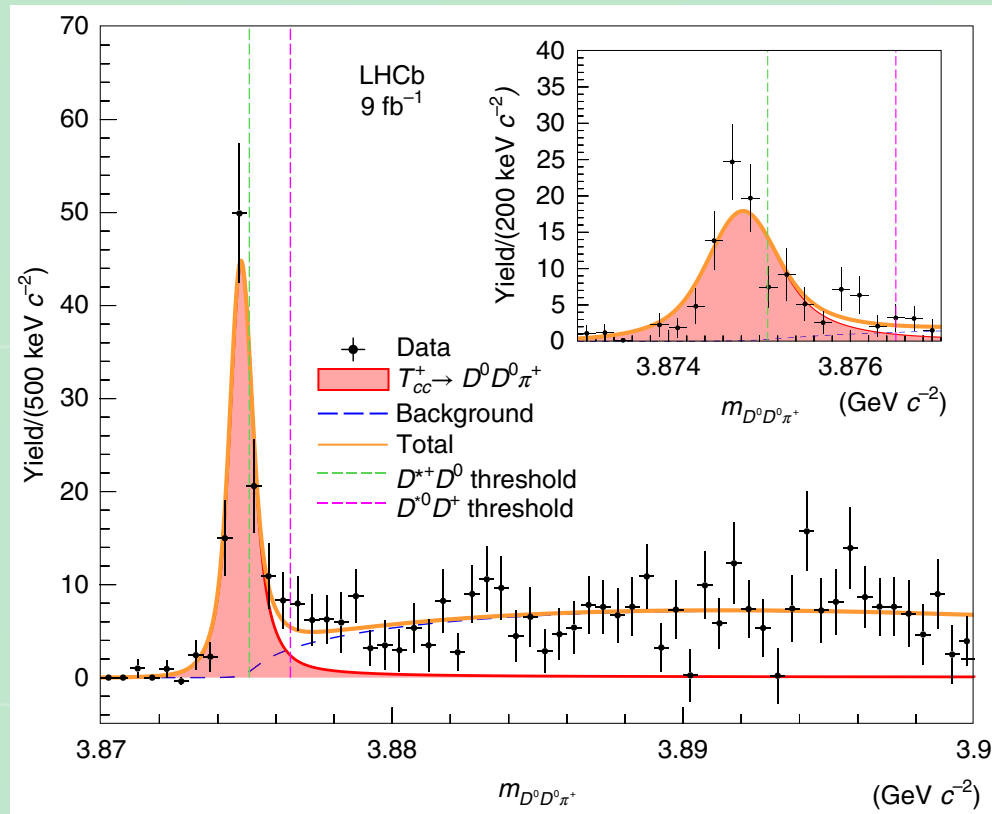
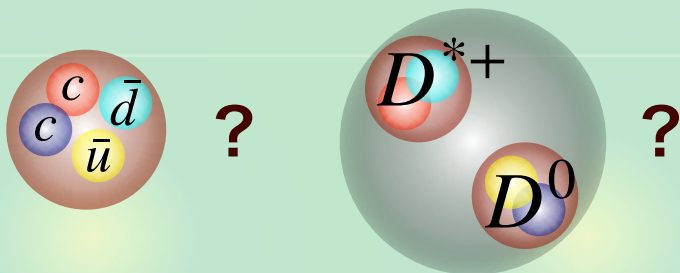
# エキゾチックハドロン

## テトラクォーク $T_{cc}$ の観測

LHCb collaboration, Nature Phys. 18, 7, 751 (2022); Nature Commun. 13, 1, 3351 (2022)



- クォーク組成  $\sim cc\bar{u}\bar{d}$
- $q\bar{q}$  で構成できないメソン
- 内部構造は？



$D^0 D^0 \pi^+$  に崩壊：不安定状態の内部構造？

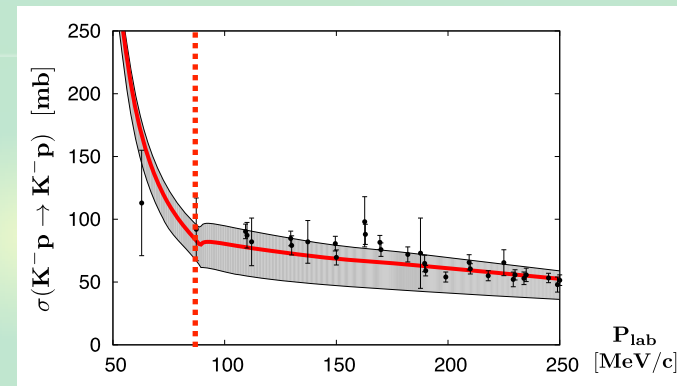


# 散乱実験とフェムトスコピー

## 従来の方法：散乱実験

Y. Ikeda, T. Hyodo, W. Weise, PLB 706, 63 (2011)

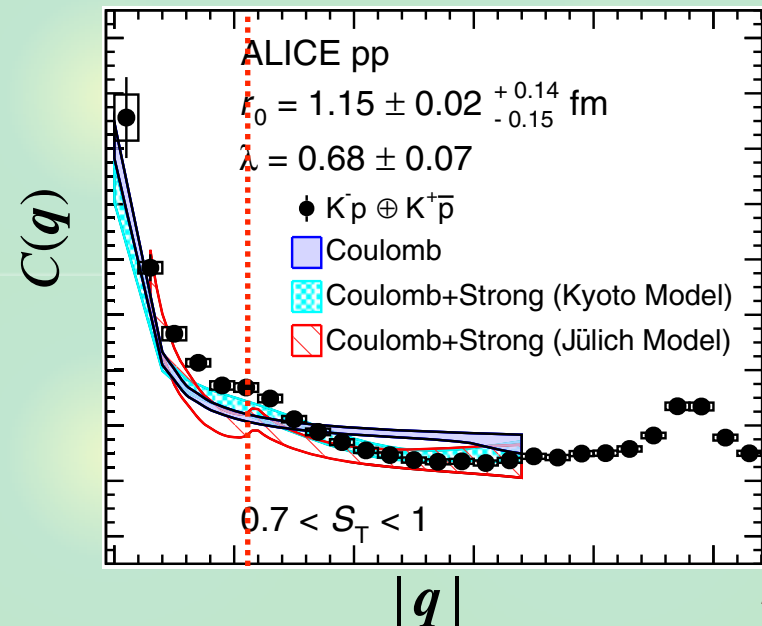
- 統計精度が良くない（低エネルギー）
- 限られた系： $NN, \Lambda N, \pi N, KN, \bar{K}N, \dots$
- ヘビー ( $c, b$ ) ハドロン：ほぼ不可能



## フェムトスコピー：相関関数

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020)

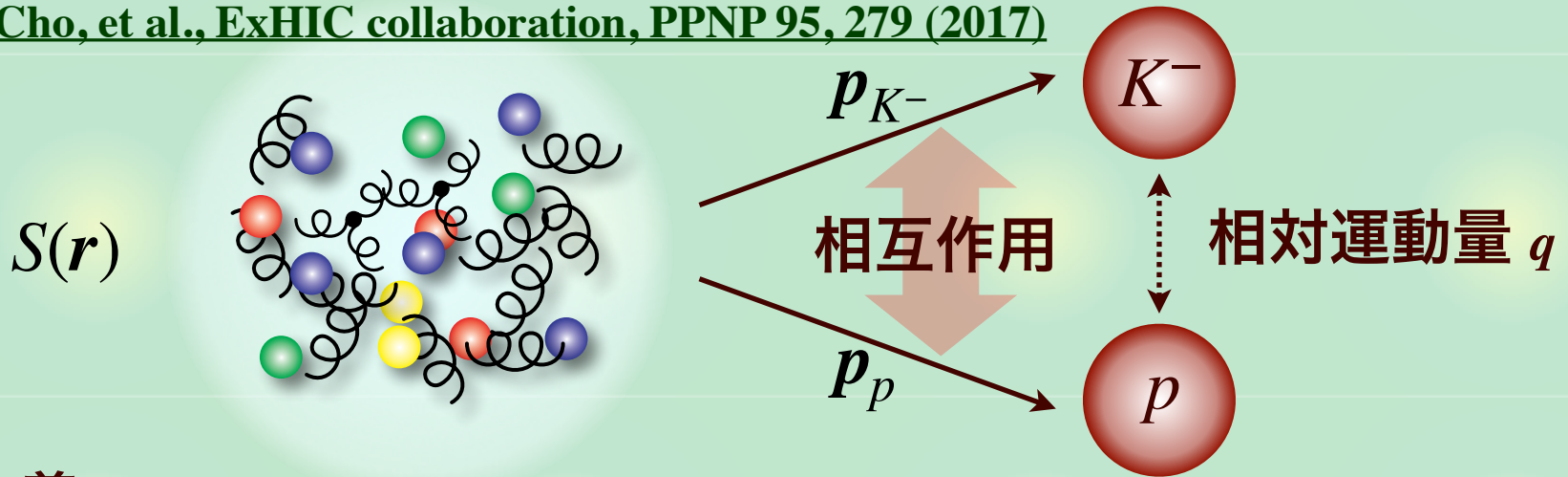
- 高い精度 ( $\bar{K}^0 n$  カスプが見える)
- 様々な系： $\Lambda\Lambda, N\Xi, N\Omega, \phi N, \bar{K}\Lambda, DN, \dots$
- ヘビーハドロン：可能！



# 相関関数とハドロン相互作用

高エネルギー衝突 (RHIC, LHC) : 統計的なハドロン生成

S. Cho, et al., ExHIC collaboration, PPNP 95, 279 (2017)



## - 定義

$$C(q) = \frac{N_{K-p}(\mathbf{p}_{K^-}, \mathbf{p}_p)}{N_{K^-}(\mathbf{p}_{K^-})N_p(\mathbf{p}_p)} \quad (\text{相互作用/量子統計が無ければ} = 1)$$

## - 理論：Koonin-Pratt 公式

S.E. Koonin PLB 70, 43 (1977); S. Pratt, PRD 33, 1314 (1986)

$$C(q) \simeq \int d^3\mathbf{r} S(\mathbf{r}) |\Psi_q^{(-)}(\mathbf{r})|^2$$

ソース関数  $S(\mathbf{r})$  (放出源)  $\leftrightarrow$  波動関数  $\Psi_q^{(-)}(\mathbf{r})$  (相互作用)

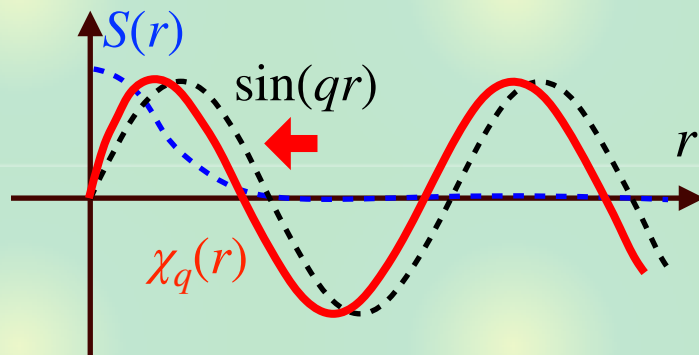


# 波動関数の振る舞いと相関関数

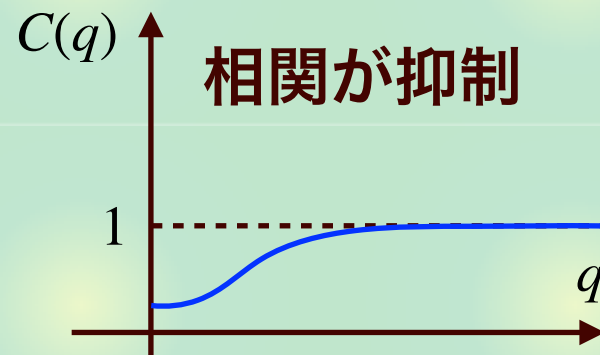
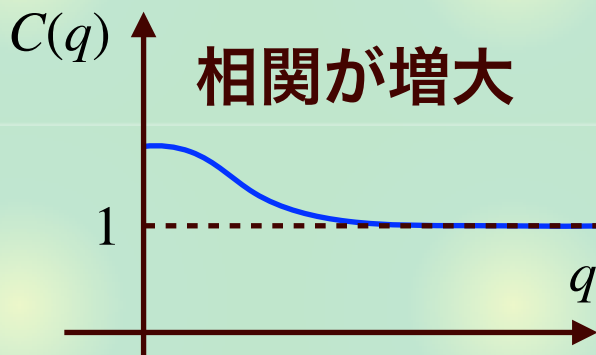
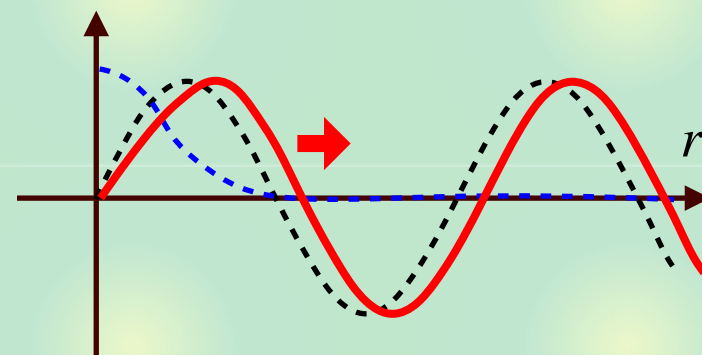
球対称ソースでs波相互作用が支配的な場合

$$C(q) \simeq 1 + \int_0^{\infty} dr S(r) \{ |\chi_q(r)|^2 - \sin^2(qr) \}$$

引力



斥力



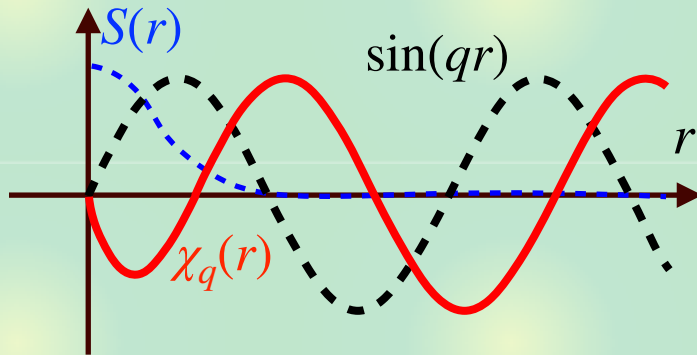
相関の定性的な振る舞いは相互作用の性質を反映

# 強い引力で束縛状態がある場合相関関数

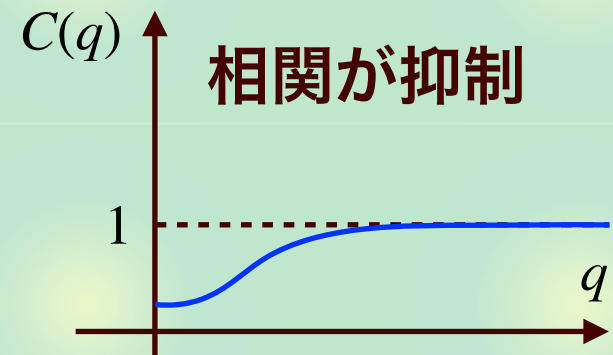
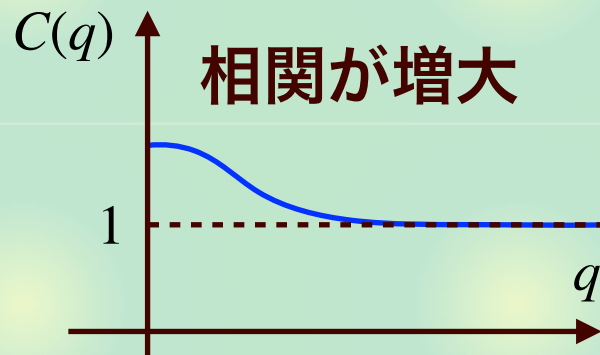
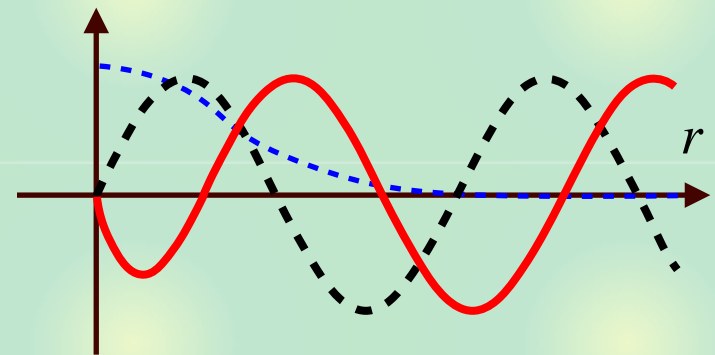
球対称ソースでs波相互作用が支配的な場合

$$C(q) \simeq 1 + \int_0^\infty dr S(r) \{ |\chi_q(r)|^2 - \sin^2(qr) \}$$

束縛：小さいソース



束縛：大きいソース



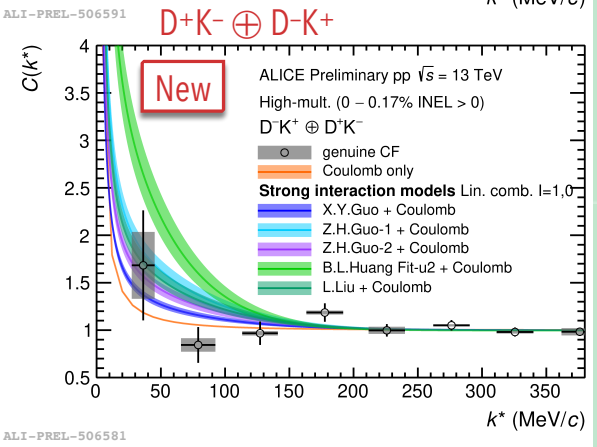
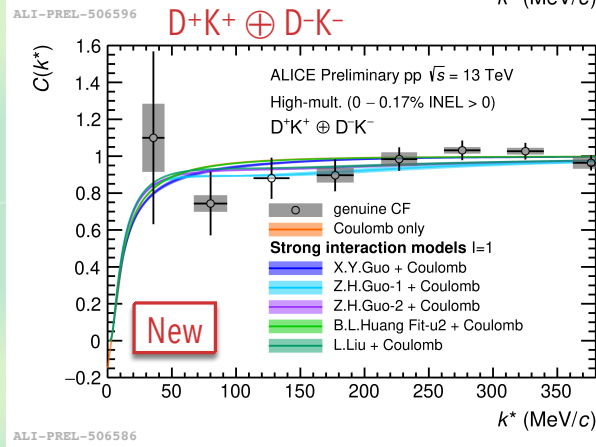
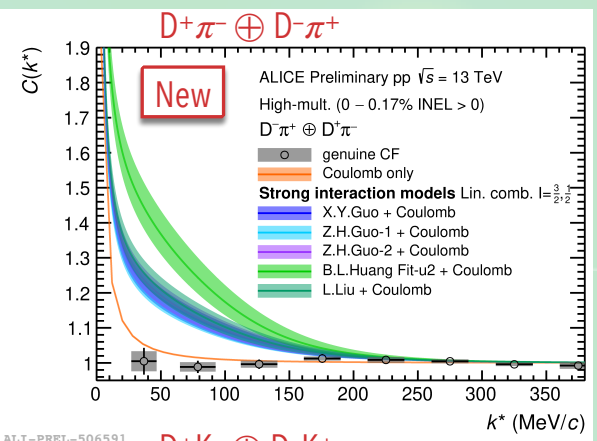
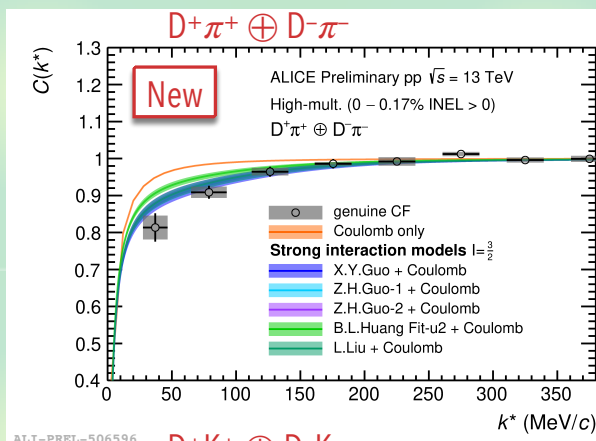
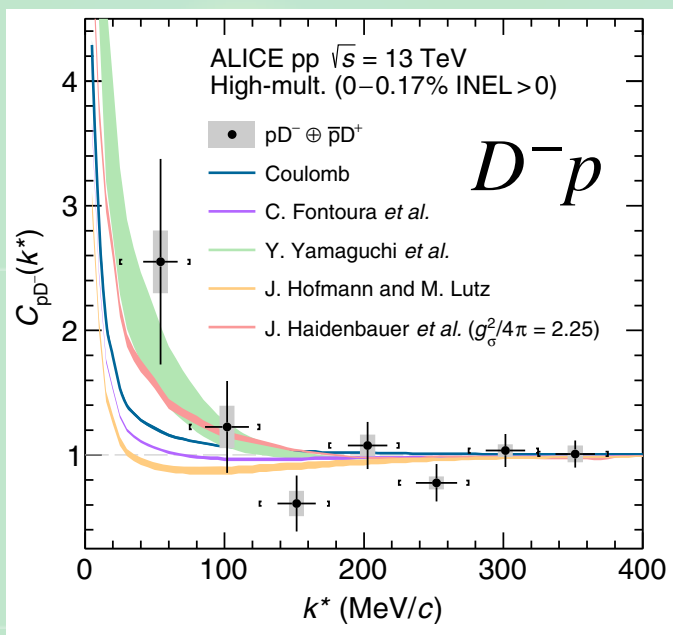
束縛状態がある場合は相関の振る舞いがソースサイズ依存

# チャームセクターの実験データ

観測されたチャームを含む相関関数： $DN, D\pi, DK$

ALICE collaboration, PRD 106, 052010 (2022);

Talk by F. Grosa @ Quark Matter 2022



チャーム系で散乱データを得る**唯一の方法** (統計はまだ低い)

## 目次

📌 導入：ハドロン物理とフェムトスコープ

📌 ハドロン相関関数とエキゾチックハドロン

-  $K^-p$  相関と  $\Lambda(1405)$

Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020)

-  $DD^* / D\bar{D}^*$  相関と  $T_{cc} / X(3872)$

Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022)

📌 ハドロン・原子核相関関数とハイパー核物理

-  $\Lambda\alpha$  相関と核媒質中の  $\Lambda$

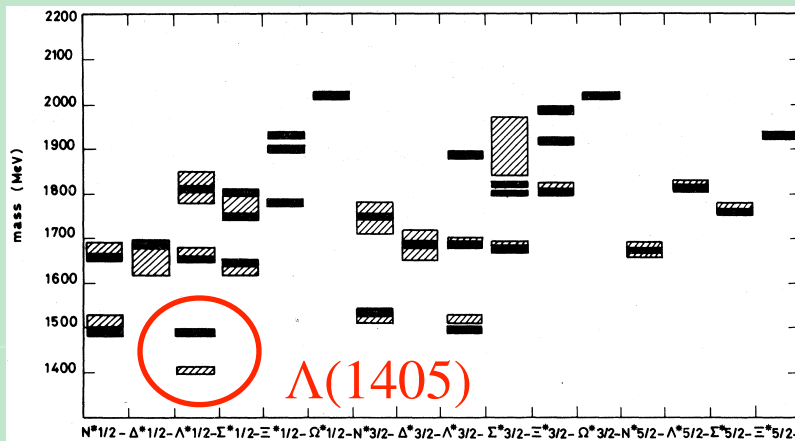
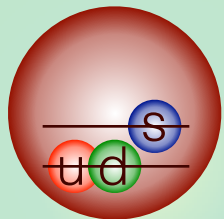
A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation

📌 まとめ

# $\Lambda(1405)$ と $\bar{K}N$ 散乱

$\Lambda(1405)$  は標準的な描像で記述できない → エキゾチック候補

N. Isgur and G. Karl, PRD18, 4187 (1978)

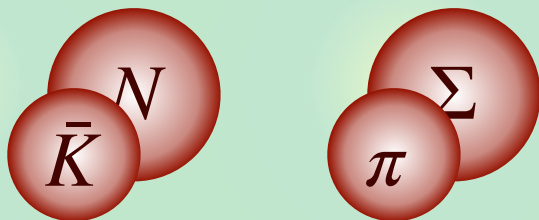
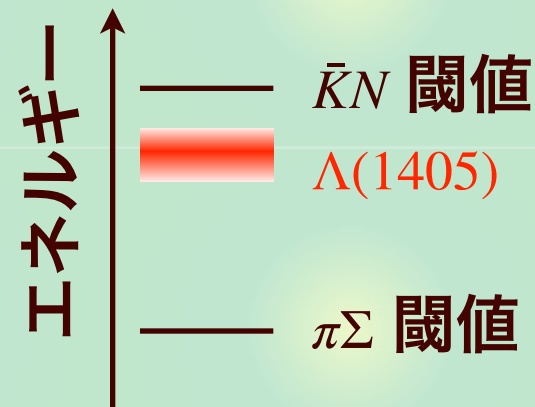


— : 理論  
 [Hatched Box] : 実験

## チャンネル結合散乱での共鳴状態

- MB状態との結合：カイラルSU(3)動力学

永江知文、兵藤哲雄「K中間子原子核の物理」(共立出版)



# PDGの極の位置

## PDGの2020年の更新

Y. Ikeda, T. Hyodo, W. Weise, PLB 706, 63 (2011); NPA 881, 98 (2012); ▲

Z.H. Guo, J.A. Oller, PRC87, 035202 (2013); ✕

M. Mai, U.G. Meißner, EPJA51, 30 (2015) ■ ○

### - Particle Listing section:

Citation: P.A. Zyla *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 083C01 (2020)

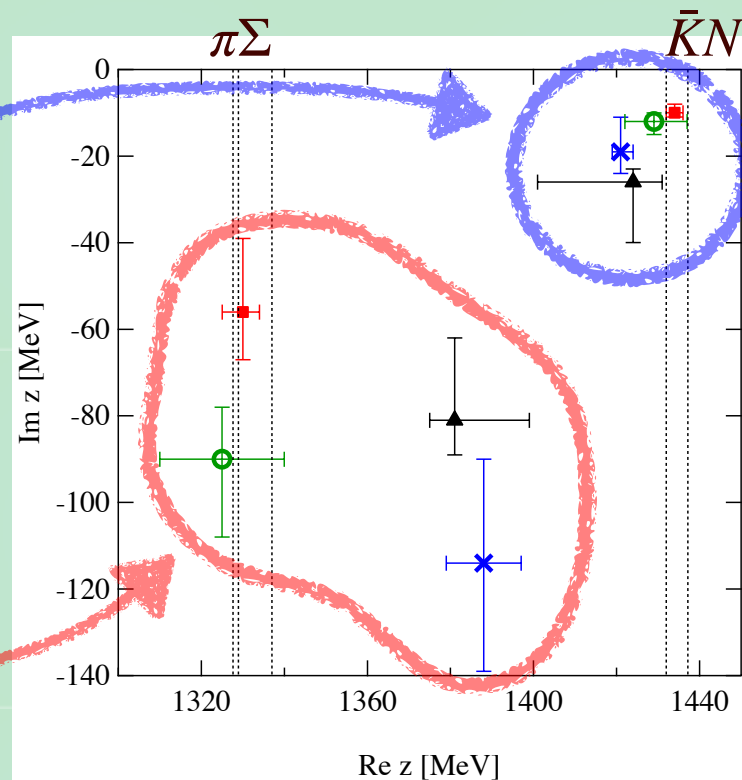
**$\Lambda(1405) 1/2^-$**

$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^-)$  Status: \*\*\*\*

Citation: P.A. Zyla *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 083C01 (2020)

**$\Lambda(1380) 1/2^-$**

$J^P = \frac{1}{2}^-$  Status: \*\*  
**new!**



T. Hyodo, M. Niyama, Prog. Part. Nucl. Phys. 120, 103868 (2021)

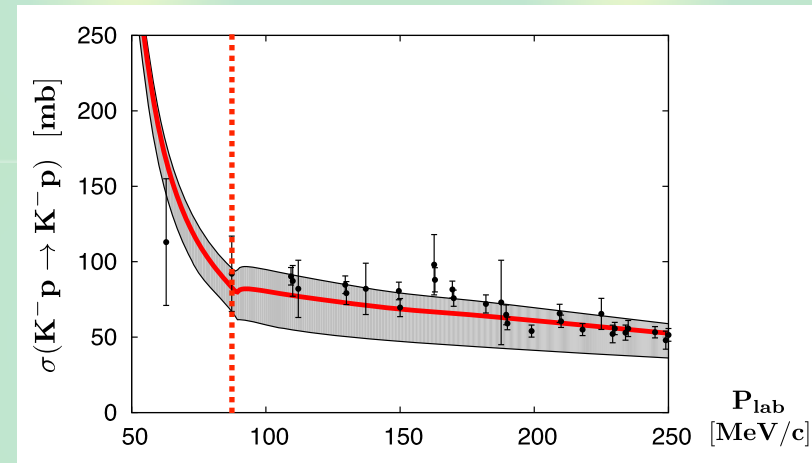
- “ $\Lambda(1405)$ ” の極は1405 MeVではなく ~ 1420 MeVに位置する
- Lower pole : 新しい two-star 共鳴  $\Lambda(1380)$

# $K^-p$ 相関の実験データ

## $K^-p$ 散乱の全断面積

Y. Ikeda, T. Hyodo, W. Weise, PLB 706, 63 (2011)

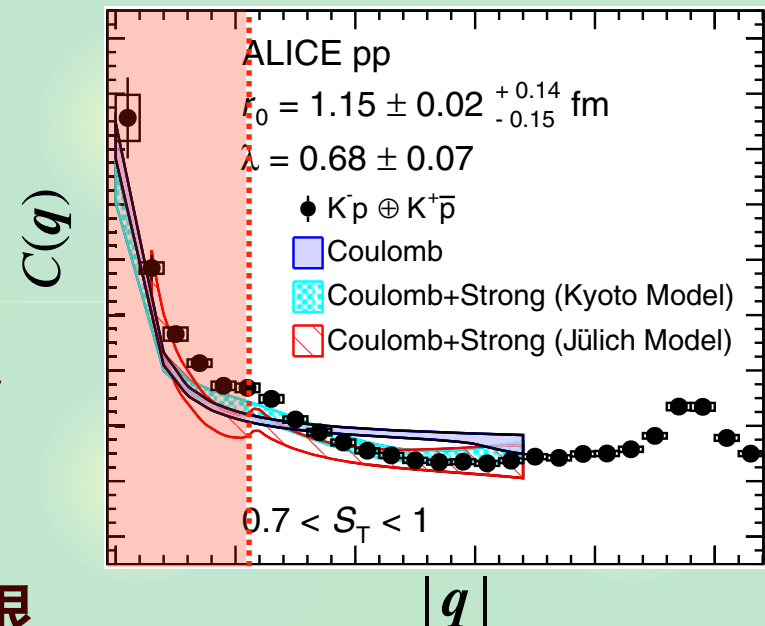
- 古い泡箱のデータ
- 統計精度、解像度が良くない
- $\bar{K}^0_n$  閾値カスプは見えない



## $K^-p$ 相関関数

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020)

- 高い精度 ( $\bar{K}^0_n$  カスプが見える)
- $\bar{K}^0_n$  閾値下のエネルギーでのデータ



→  $\Lambda(1405)$  の理論に関する重要な制限

# チャンネル結合効果

## s波Schrödinger方程式

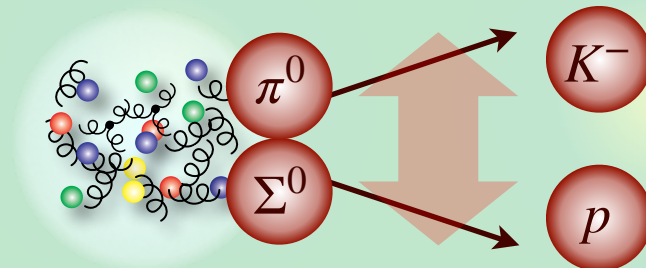
$$\begin{pmatrix} \frac{-1}{2\mu_1} \frac{d^2}{dr^2} + V_{11}(r) + V_C(r) & V_{12}(r) & \cdots \\ V_{21}(r) & \frac{-1}{2\mu_2} \frac{d^2}{dr^2} + V_{22}(r) + \Delta_2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi_{K^-p}(r) \\ \chi_{\bar{K}^0n}(r) \\ \vdots \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} \chi_{K^-p}(r) \\ \chi_{\bar{K}^0n}(r) \\ \vdots \end{pmatrix}$$

クーロン    閾値エネルギー差    (アイソスピンの破れ)

## 波動関数の漸近形 ( $r \rightarrow \infty$ )

$$\begin{pmatrix} \chi_{K^-p}(r) \\ \chi_{\bar{K}^0n}(r) \\ \vdots \end{pmatrix} \propto \begin{pmatrix} \#e^{-iqr} + \#e^{iqr} \\ \#e^{-iq_2r} + \#e^{iq_2r} \\ \vdots \end{pmatrix} \quad \text{内向き} + \text{外向き}$$

-  $\bar{K}^0n, \pi^+\Sigma^-, \pi^0\Sigma^0, \pi^-\Sigma^+, \pi^0\Lambda$  からの遷移が  $\chi_i(r)$   $i \neq K^-p$  に含まれる





# チャンネル結合と相関関数

## チャンネル結合Koonin-Pratt公式

R. Lednicky, V.V. Lyuboshitz, V.L. Lyuboshitz, Phys. Atom. Nucl. 61, 2950 (1998);

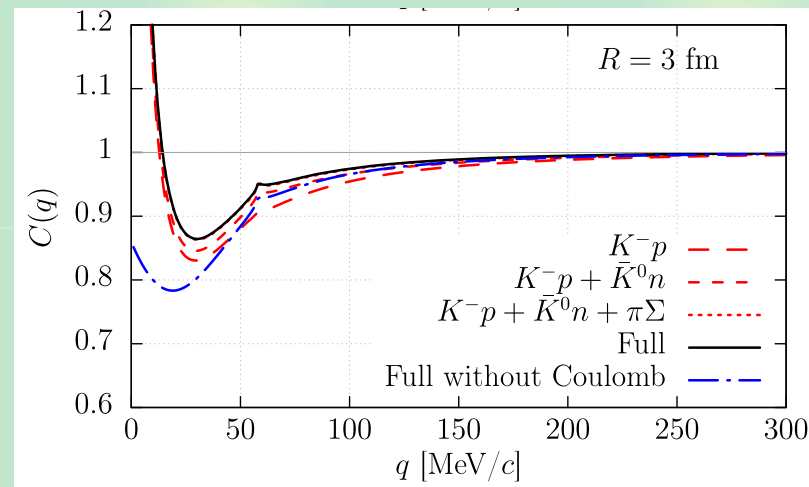
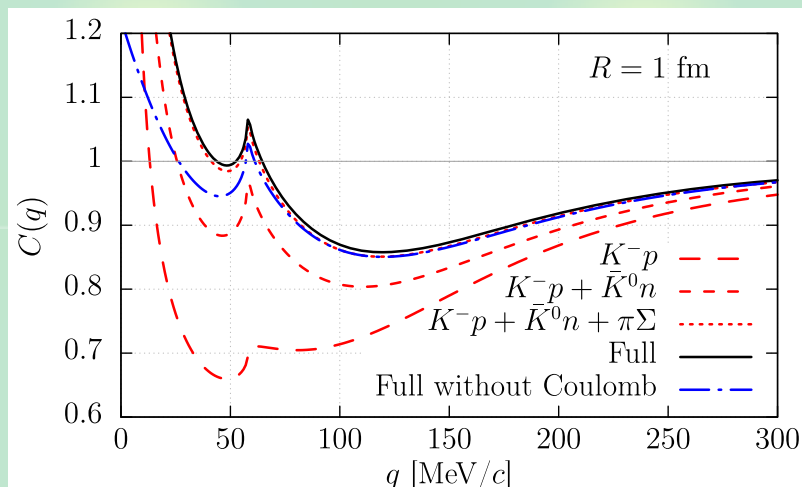
J. Haidenbauer, NPA 981, 1 (2019);

Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020)

$$C_{K^-p}(q) \simeq \int d^3r S_{K^-p}(r) |\Psi_{K^-p,q}^{(-)}(r)|^2 + \sum_{i \neq K^-p} \omega_i \int d^3r S_i(r) |\Psi_{i,q}^{(-)}(r)|^2$$

-  $\bar{K}^0 n, \pi^+ \Sigma^-, \pi^0 \Sigma^0, \pi^- \Sigma^+, \pi^0 \Lambda$ からの遷移

-  $\omega_i$ :  $K^-p$  に対するチャンネル  $i$  の重み



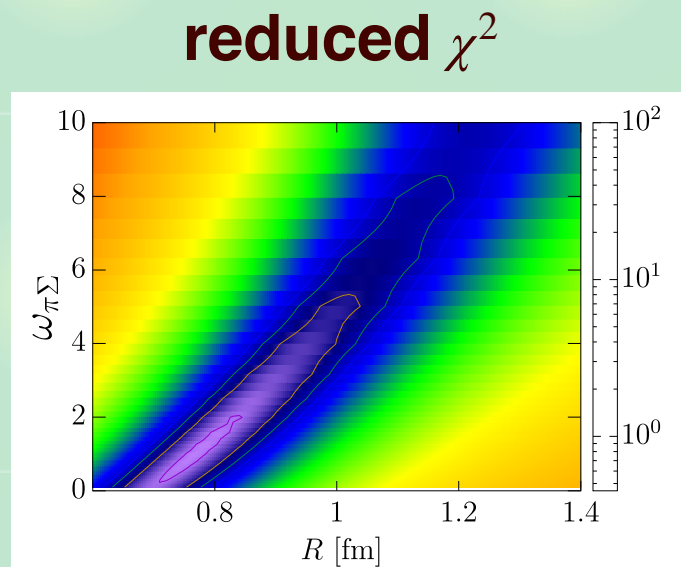
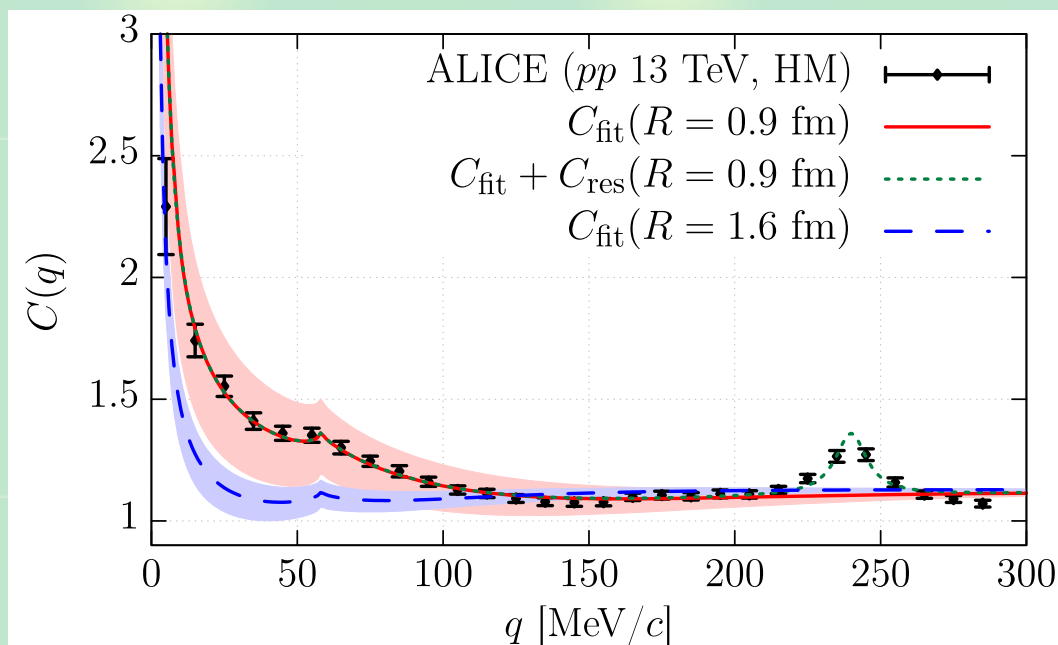
チャンネル結合効果は小さいソースで顕著

# カイラルSU(3)動力学による相関関数

波動関数  $\Psi_{i,q}^{(-)}(r)$  : チャンネル結合京都  $\bar{K}N-\pi\Sigma-\pi\Lambda$  ポテンシャル

K. Miyahara, T. Hyodo, W. Weise, PRC98, 025201 (2018)

- ソース関数  $S(r)$  : ガウシアン,  $R \sim 1$  fm  $\leftarrow K^+p$  データ
- 重み  $\omega_{\pi\Sigma} \sim 2$  : 統計モデルによる見積もり



Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020)

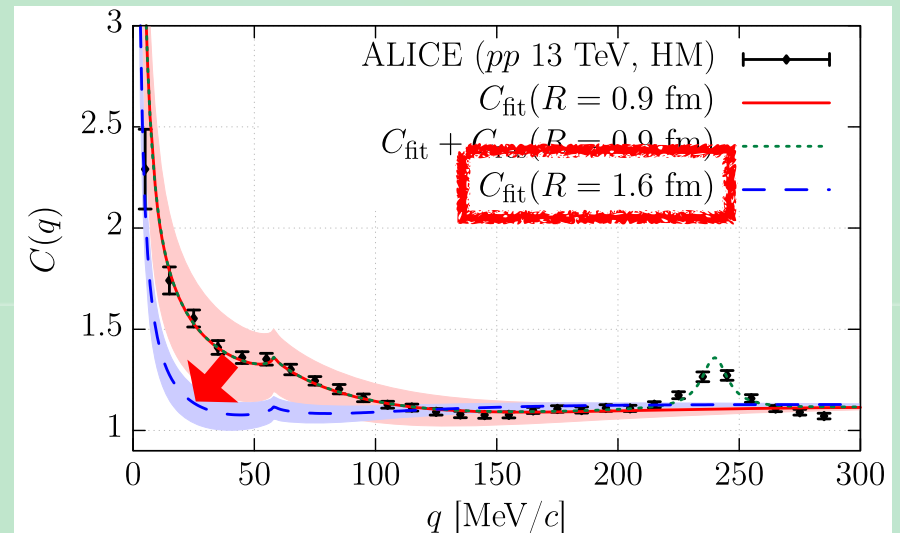
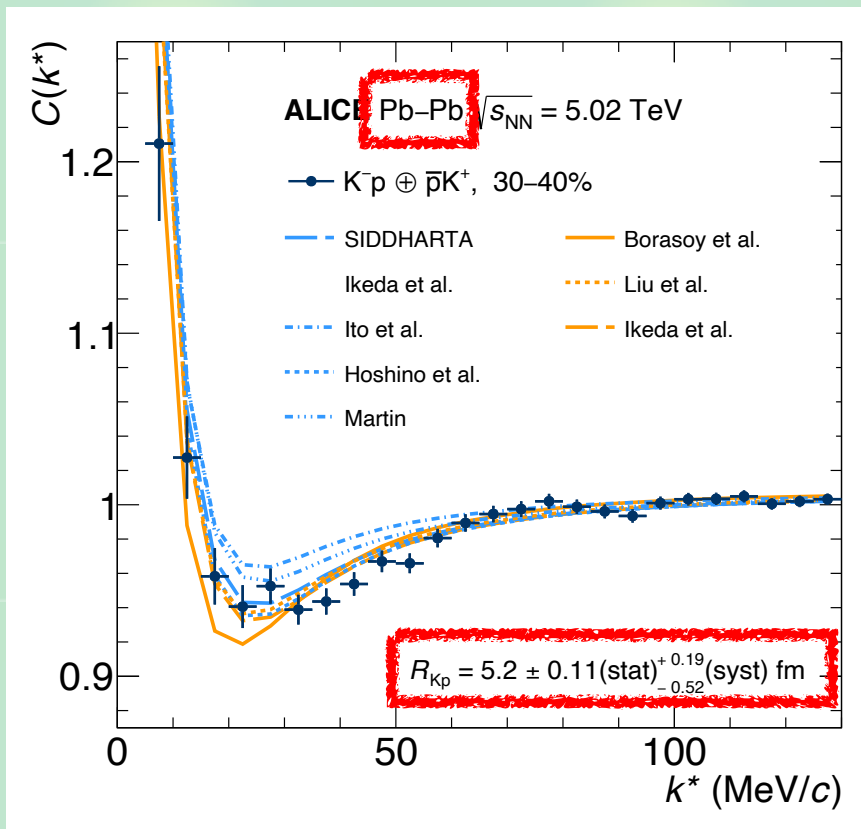
ALICEの相関関数データをよく再現する

# ソースサイズ依存性

## 5.02 TeV Pb-Pb 衝突のデータ

ALICE collaboration, PLB 822, 136708 (2021)

- 散乱長  $a_{K^-p} = -0.91 + 0.92i$  fm



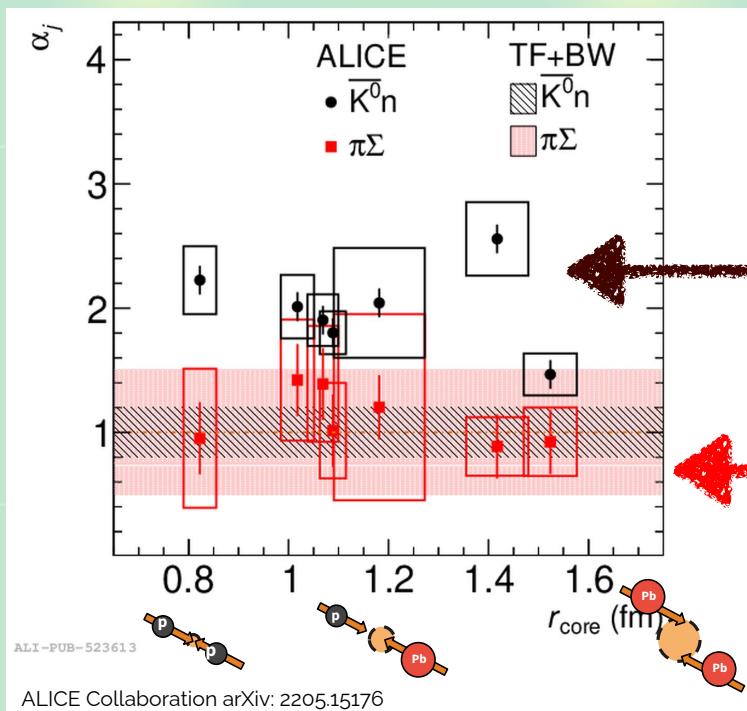
サイズ  $R$  の大きいソースで相関が抑制 ← 理論の予言

# ソースサイズ依存性の体系的な研究

$pp$ ,  $p$ -Pb, Pb-Pb衝突での相関関数

ALICE collaboration, EPJC 83, 340 (2023)

$$C_{K^-p}(\mathbf{q}) \simeq \int d^3\mathbf{r} S_{K^-p}(\mathbf{r}) |\Psi_{K^-p,q}^{(-)}(\mathbf{r})|^2 + \sum_{i \neq K^-p} \omega_i \int d^3\mathbf{r} S_i(\mathbf{r}) |\Psi_{i,q}^{(-)}(\mathbf{r})|^2$$



データを説明するために  
必要な増加因子

Thermal Fist + Blast Wave で  
予言される  $\omega_i$

$\bar{K}^0n$  チャンネルの強度を増加させる必要がある

## 目次

📌 導入：ハドロン物理とフェムトスコープ

📌 ハドロン相関関数とエキゾチックハドロン

-  $K^-p$  相関と  $\Lambda(1405)$

Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020)

-  $DD^* / D\bar{D}^*$  相関と  $T_{cc} / X(3872)$

Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022)

📌 ハドロン・原子核相関関数とハイパー核物理

-  $\Lambda\alpha$  相関と核媒質中の  $\Lambda$

A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation

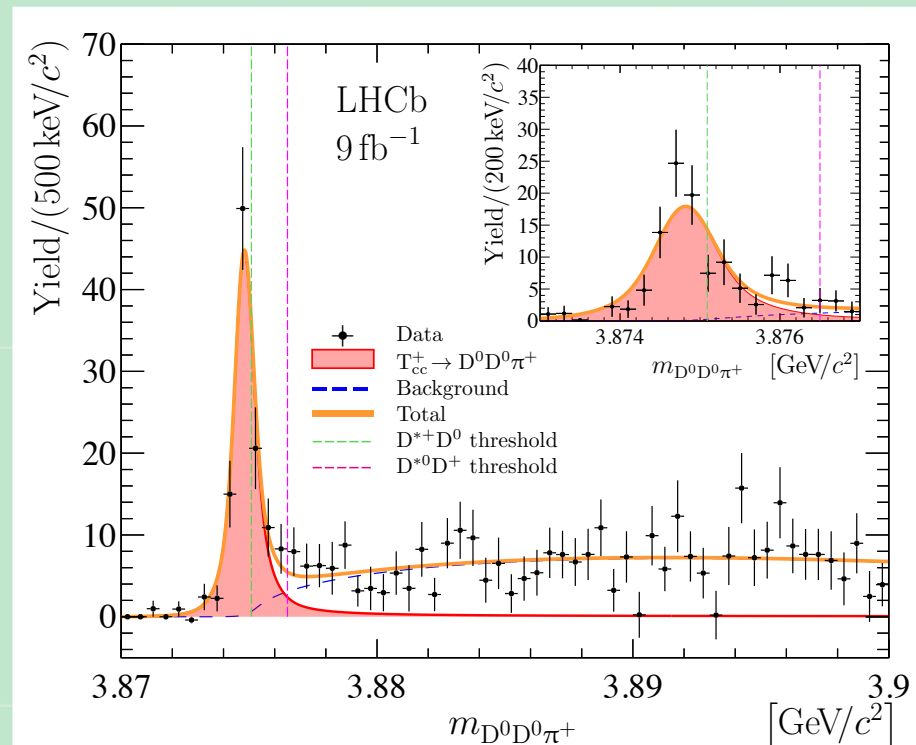
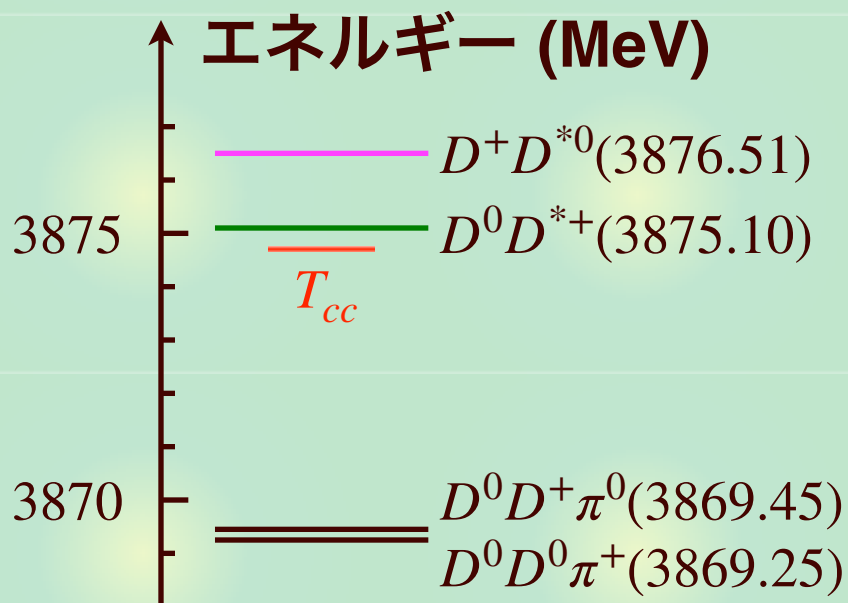
📌 まとめ

# $T_{cc}$ の観測

$D^0D^0\pi^+$  スペクトル中で  $T_{cc}$  が観測される

LHCb collaboration, Nature Phys., 18, 751 (2022); Nature Comm., 13, 3351 (2022)

- $DD^*$  閾値近傍にピーク
- チャーム  $C = +2$  :  $\sim cc\bar{u}\bar{d}$
- 準位構造

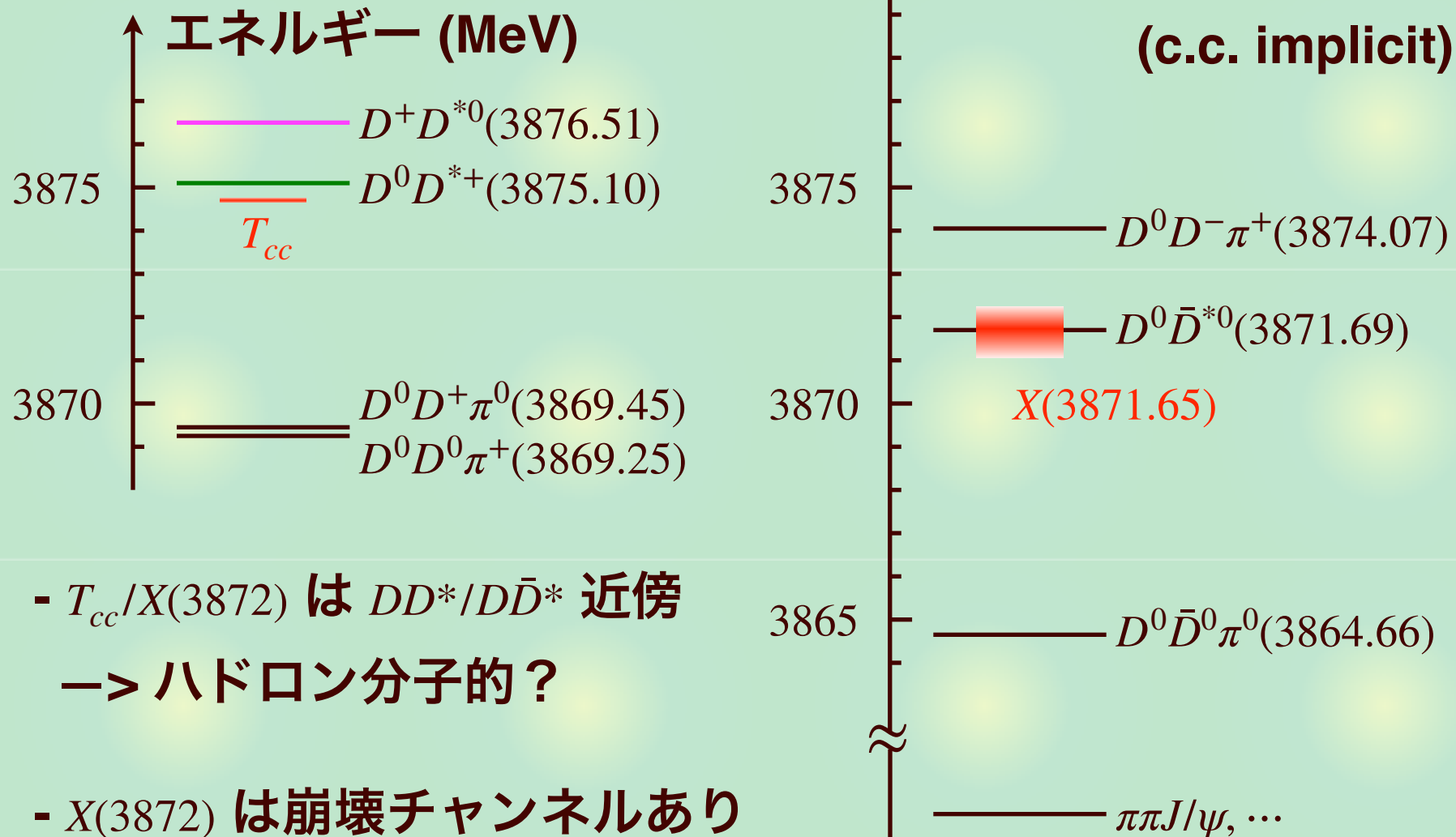


- 非常に小さい (few MeV ~ keV) エネルギースケールを含む

# $T_{cc}$ と $X(3872)$

$X(3872)$  も閾値近傍状態で  $M_{T_{cc}} \sim M_{X(3872)}$

- PDGによる質量と閾値



-  $T_{cc}/X(3872)$  は  $DD^*/D\bar{D}^*$  近傍

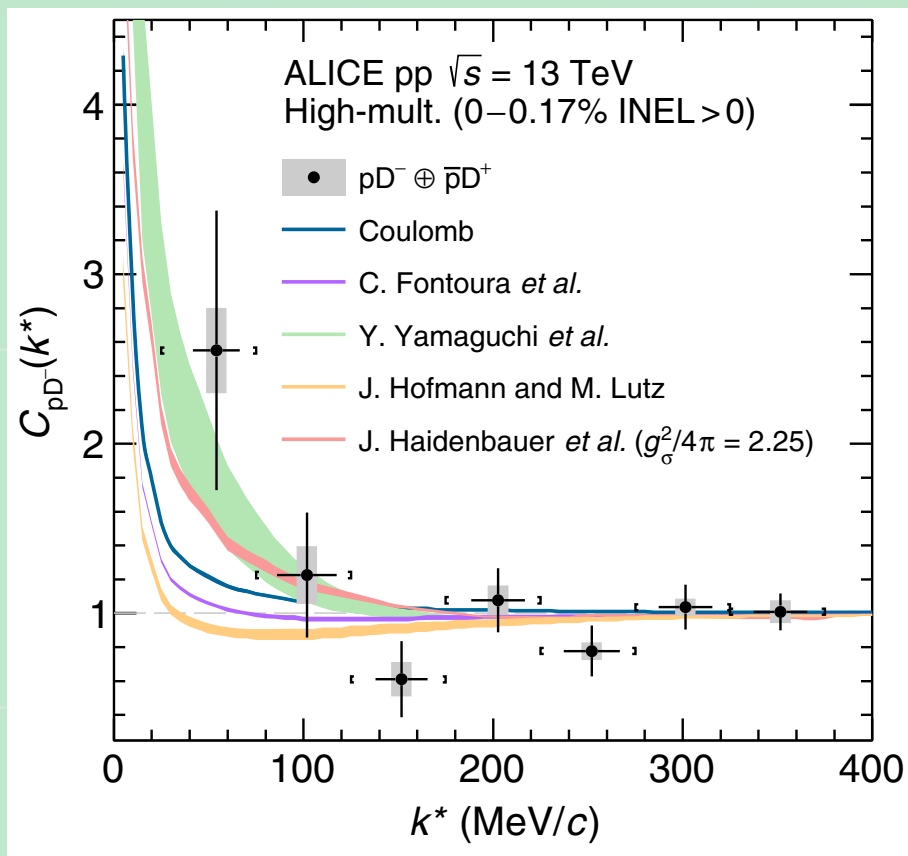
→ ハドロン分子的？

-  $X(3872)$  は崩壊チャンネルあり

# $D^-p$ 相関の測定

## チャームを含むハドロン相関の初めての観測

ALICE collaboration, PRD 106, 052010 (2022)



エキゾチック量子数を持つ束縛状態  $D^-p \sim \bar{c}duud$  を示唆？

チャームを含むハドロン相関は観測可能



# $DD^*/D\bar{D}^*$ ポテンシャル

## チャンネル結合ポテンシャル

$$V_{DD^*/D\bar{D}^*} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} V_{I=1} + V_{I=0} & V_{I=1} - V_{I=0} \\ V_{I=1} - V_{I=0} & V_{I=1} + V_{I=0} + V_c \end{pmatrix} \begin{matrix} D^0 D^{*+} / \{D^0 \bar{D}^{*0}\} \\ D^+ D^{*0} / \{D^+ D^{*-}\} \end{matrix}$$

↑  $\{D^+ D^{*-}\}$  にはクーロン

-  $I=0$  : 1レンジガウス型ポテンシャル、 $I=1$  は無視

$$V_{I=0} = V_0 \exp\{-m_\pi^2 r^2\}, \quad V_{I=1} = 0$$

↑  $\pi$  交換に基づくレンジ

$V_0 \in \mathbb{C} \leftarrow$  散乱長 (ハドロン分子描像)

-  $T_{cc} : a_0^{D^0 D^{*+}} = -7.16 + i1.85 \text{ fm} : \text{LHCbの解析}$

LHCb collaboration, Nature Comm., 13, 3351 (2022)

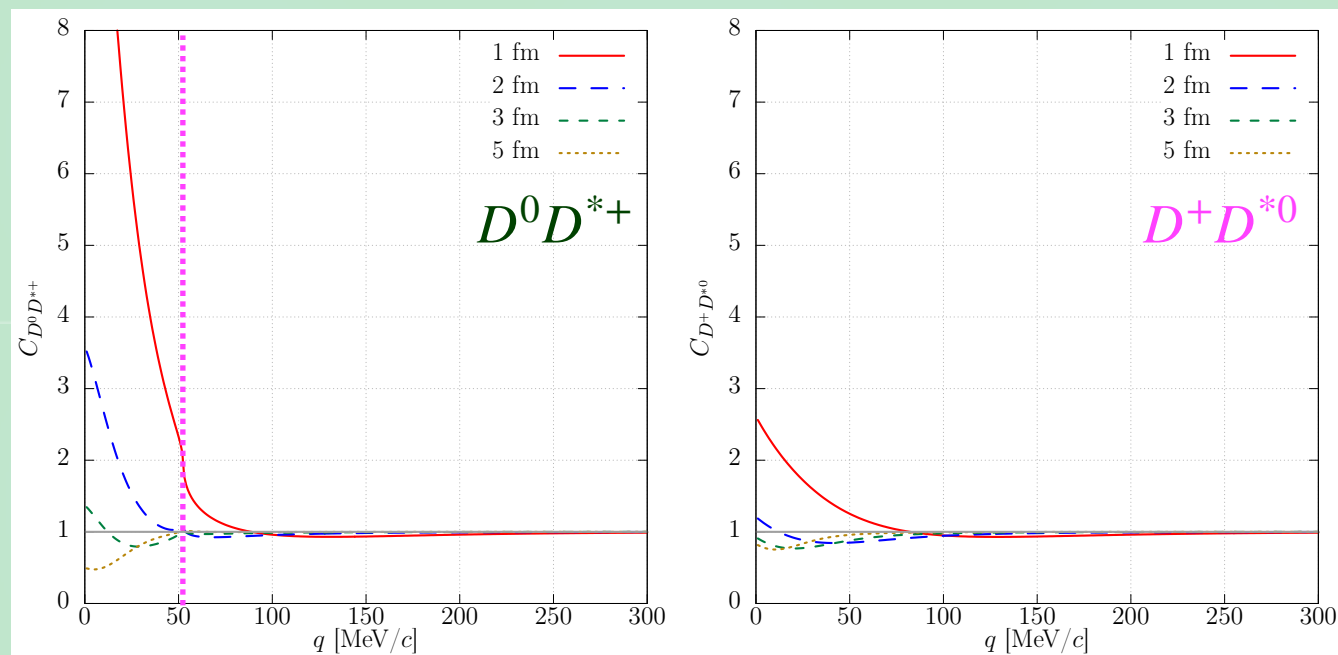
-  $X(3872) : a_0^{D^0 \bar{D}^{*0}} = -4.23 + i3.95 \text{ fm} (a_0 = -i/\sqrt{2\mu E_h} \leftarrow \text{PDGの } E_h)$

# $DD^* \sim T_{cc}$ チャンネル

$D^0D^{*+}$ 、 $D^+D^{*0}$  相関関数 ( $cc\bar{u}\bar{d}$  エキゾチックチャンネル)

Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022)

$D^+D^{*0}$   
 $D^0D^{*+}$   
 $T_{cc}$



- 両方のチャンネルで束縛状態の性質 (ソースサイズ依存性)
- $D^0D^{*+}$  で強いシグナル、 $D^+D^{*0}$  相関は比較的小さいシグナル
- $D^0D^{*+}$  相関中に弱い  $D^+D^{*0}$  閾値カスプ ( $q \sim 52$  MeV)

# $D\bar{D}^* \sim X(3872)$ チャンネル

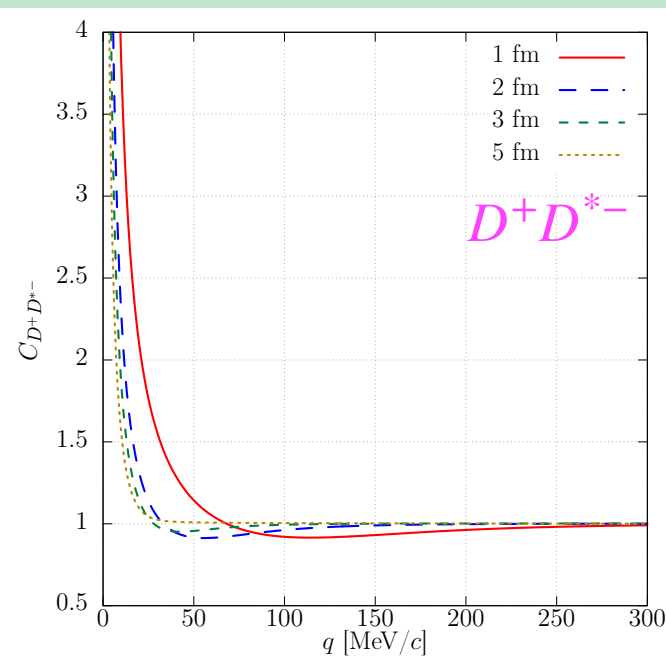
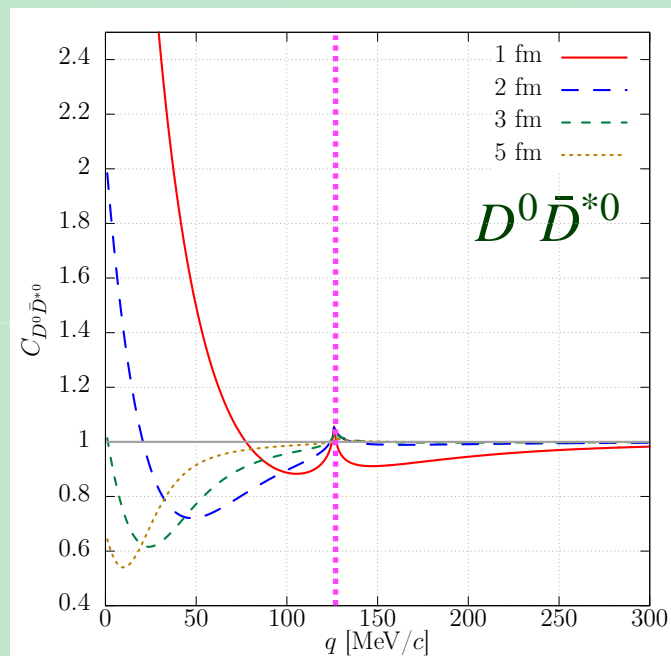
$D^0\bar{D}^{*0}$ 、 $D^+\bar{D}^{*-}$  相関関数 ( $c\bar{c}q\bar{q}$  チャンネル)

Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022)

—————  $D^+\bar{D}^{*-}$

—  —  $D^0\bar{D}^{*0}$

$X(3872)$



- $D^0\bar{D}^{*0}$  相関に束縛状態の性質
- $D^0\bar{D}^{*0}$  相関中に強い  $D^+\bar{D}^{*-}$  閾値カスプ ( $q \sim 126$  MeV)
- $D^+\bar{D}^{*-}$  相関：クーロン引力が支配的

## 目次

📌 導入：ハドロン物理とフェムトスコーピー

📌 ハドロン相関関数とエキゾチックハドロン

-  $K^-p$  相関と  $\Lambda(1405)$

Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020)

-  $DD^* / D\bar{D}^*$  相関と  $T_{cc} / X(3872)$

Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022)

📌 ハドロン・原子核相関関数とハイパー核物理

-  $\Lambda\alpha$  相関と核媒質中の  $\Lambda$

A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation

📌 まとめ

# 動機：高密度での斥力

## 中性子星中のハイペロンパズル

- 高密度で  $\Lambda NN$  3体力による斥力

D. Gerstung, N. Kaiser, W. Weise, EPJA 55, 175 (2020)

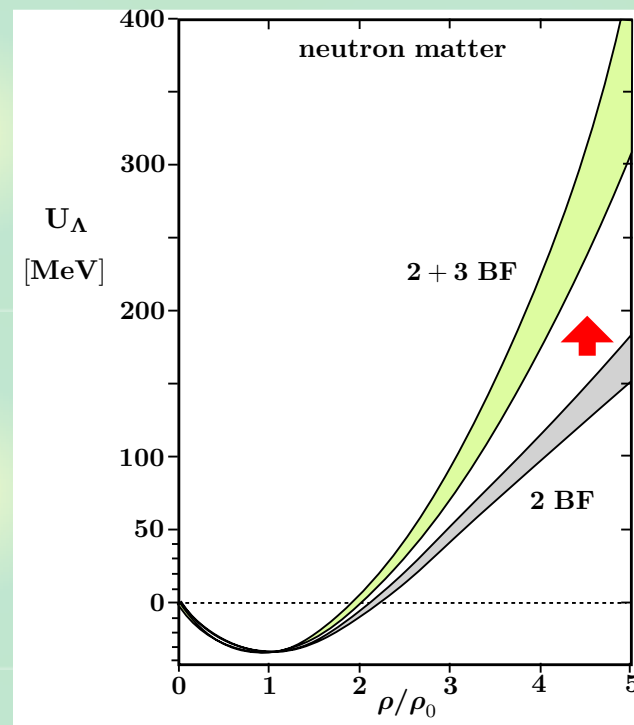
## 実験で検証する方法は？

- 重イオン衝突での  $\Lambda$  directed flow

Y. Nara, A. Jinno, K. Murase, A. Ohnishi,  
PRC 106, 044902 (2022)

## $\Lambda$ -原子核の相関関数で検証できないか？

- 重い原子核は生成が困難
- $\alpha$  の強い束縛  $\rightarrow$  高い中心密度  $\gtrsim 2\rho_0$



高密度での斥力効果を  $\Lambda\alpha$  相関関数で検証する可能性

# $\Lambda\alpha$ ポテンシャル

## $\Lambda$ ハイパー核のSkyrme-Hartree Fockポテンシャル

### - LY4 : 現象論的なポテンシャル

D.E. Lanskoy, Y. Yamamoto, PRC 55, 2330 (1997)

### - Chi3 : $\Lambda NN$ 3体力を含むカイラルEFTに基づくポテンシャル

A. Jinno, K. Murase, Y. Nara, A. Ohnishi, arXiv:2306.17452 [nucl-th]

### - どちらも C から Pb までのハイパー核データを再現する

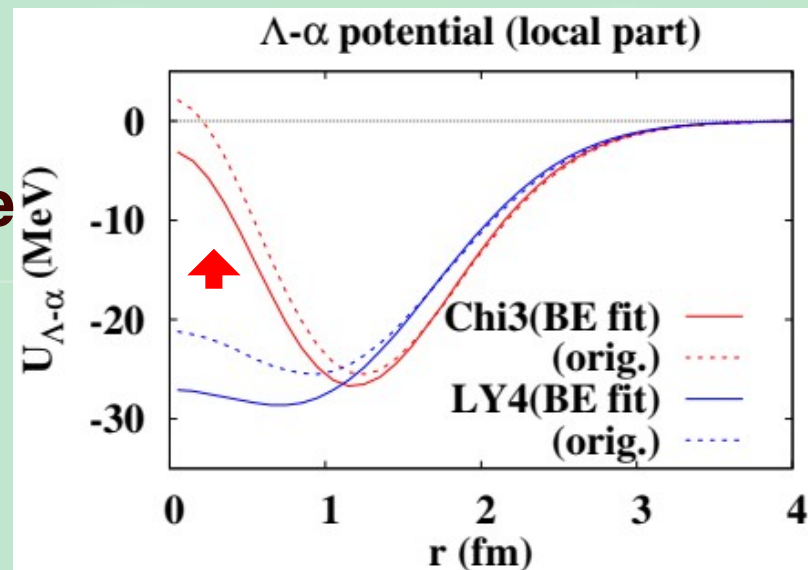
## $\Lambda\alpha$ ポテンシャル

### - ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ 束縛エネルギーをoverestimate

→ パラメーターを調整 (BE fit)

### - LY4 : ウッズサクソンの

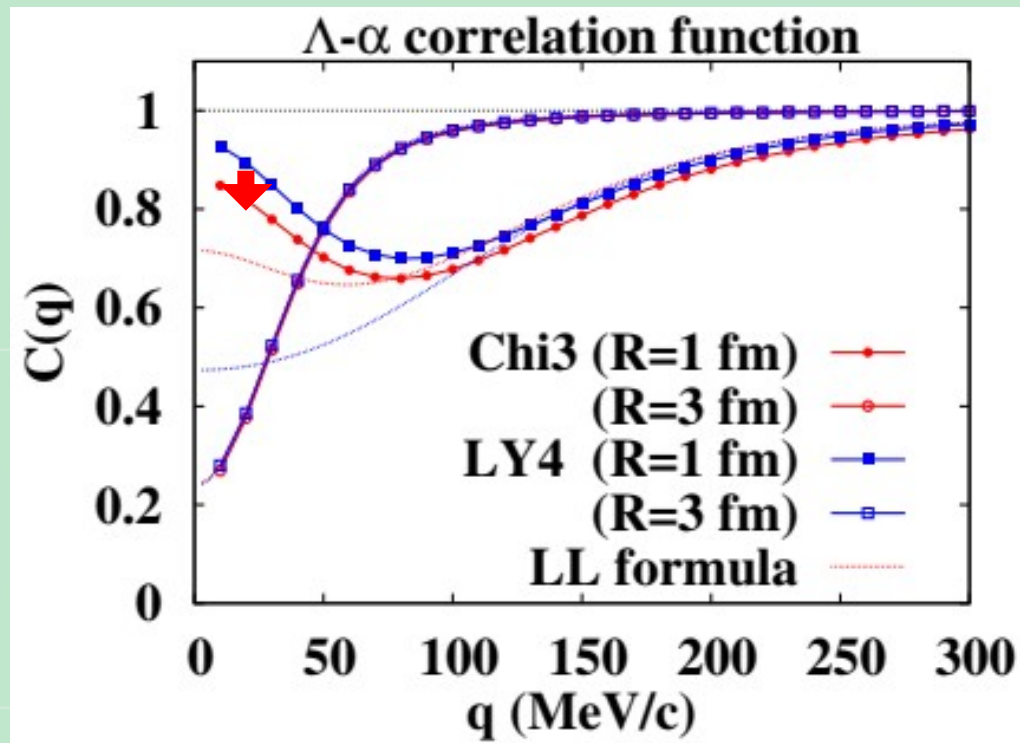
### - Chi3 : 中心で斥力的



$\Lambda\alpha$  相関関数

## 相関関数の結果

A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation



- 束縛状態の性質（小さい  $q$  でdip）
- 高密度での斥力の効果： $R = 3$  fm ではほとんど見えない
- $R = 1$  fm で少し相関を強める

## まとめ

📌 高エネルギー衝突実験での相関関数はエキゾチック  
クハドロン・原子核の相互作用の研究に有用

📌  $K^-p$  相関

-  $\Lambda(1405)$  と  $\bar{K}N$  相互作用の精密な検証

Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020)

📌  $DD^* / D\bar{D}^*$  相関

- (準) 束縛状態  $T_{cc} / X(3872)$  の性質を反映

Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022)

📌  $\Lambda\alpha$  相関

- ハイパー核物理への展望

A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation