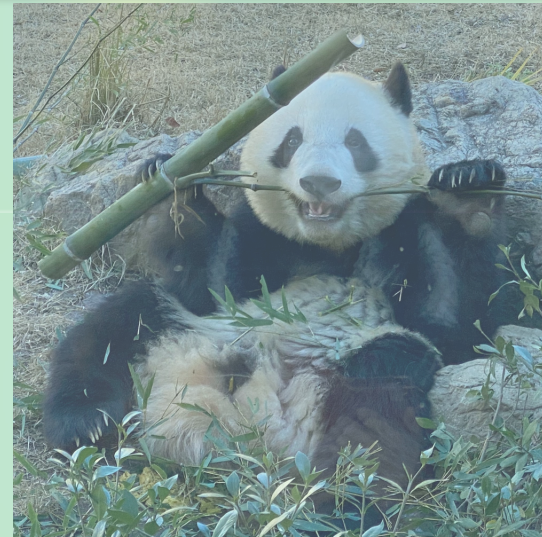


フェムトスコピーによる ハドロン間相互作用の研究



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

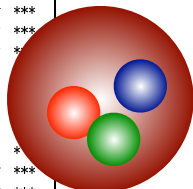
- $\Lambda\alpha$ 相関と核媒質中の Λ

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

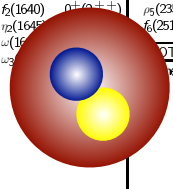
 まとめ

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

バリオン~160種

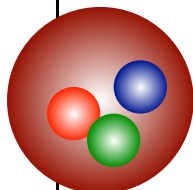


メソソ〜210種



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

2年間で新たに発見されたハドロン



バリオン~170種

[illegible]

メソソ〜210種

全ての ~380種のハドロンはQCDから生じている

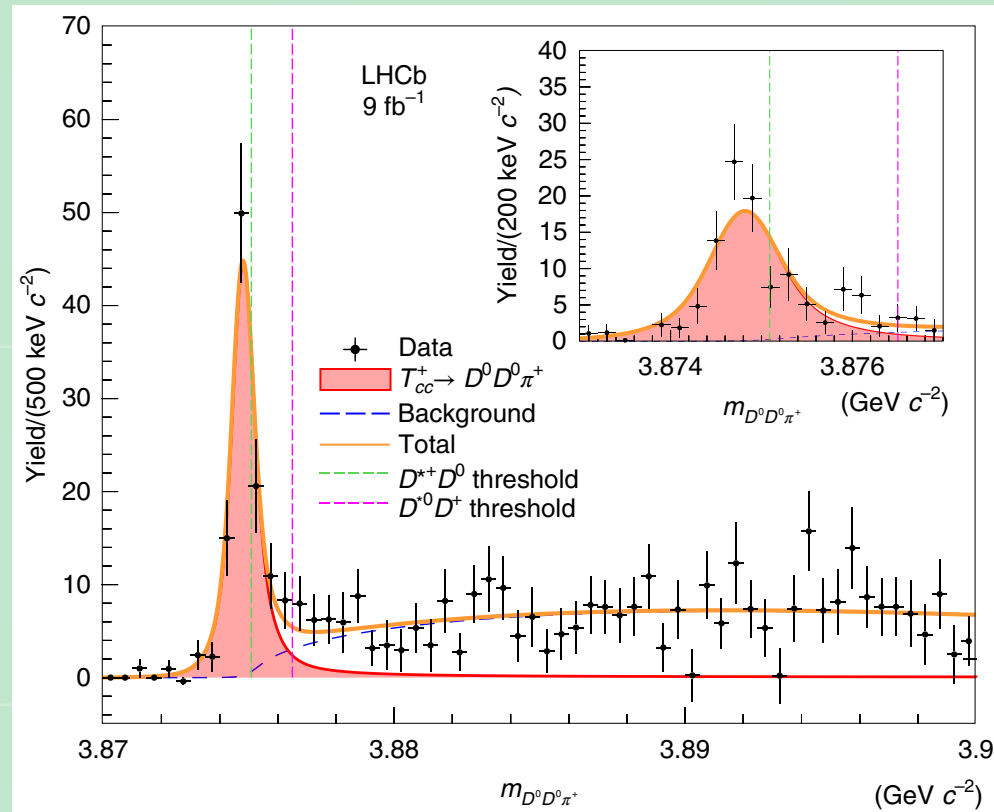
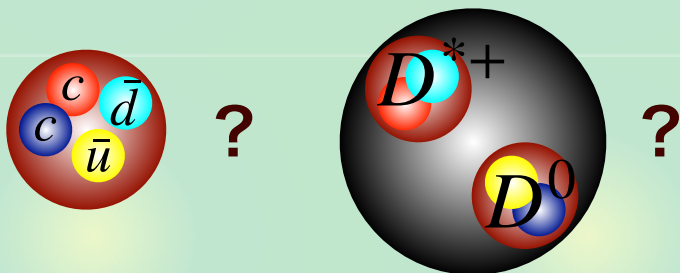
エキゾチックハドロン

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？

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

バリオン~170種



メソン~210種

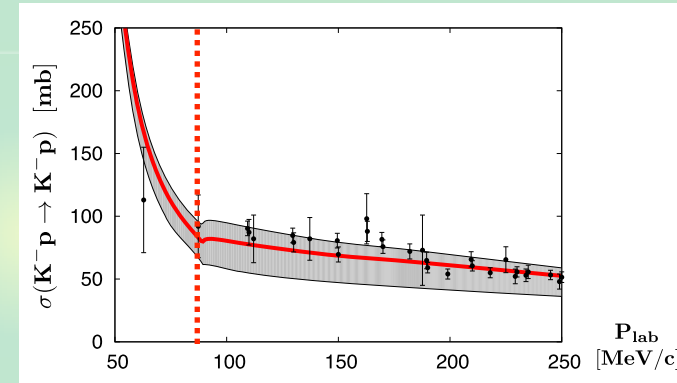
ほとんどのハドロンは不安定：ハドロン散乱中の共鳴状態

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)

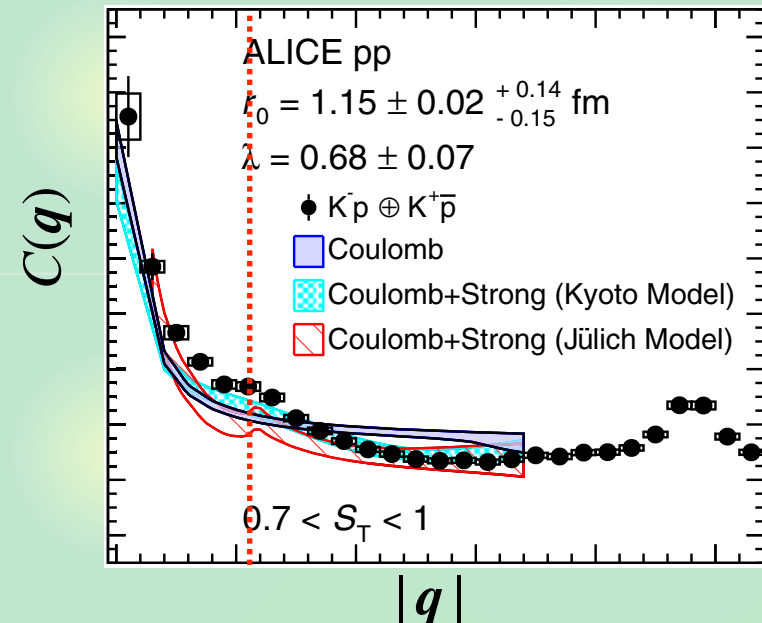
- 統計精度が良くない（低エネルギー）
- 限られた系： $NN, \Lambda N, \pi N, KN, \bar{K}N, \dots$
- ヘビー（ c, b ）ハドロン：ほぼ不可能



フェムトスコピー：相関関数

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020)

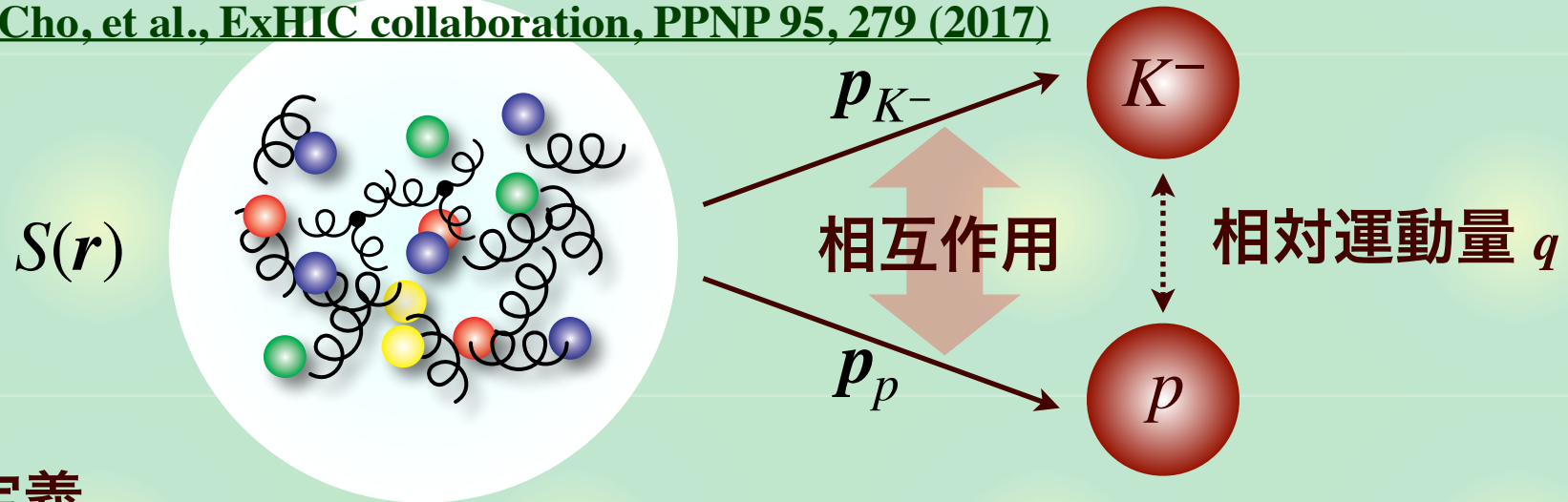
- 高い**精度**（ $\bar{K}^0_n$ カスプが見える）
- **様々な系**： $\Lambda\Lambda, N\Xi, N\Omega, \phi N, \bar{K}\Lambda, \textcolor{red}{DN}, \dots$
- **ヘビーハドロン**：可能！



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)

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

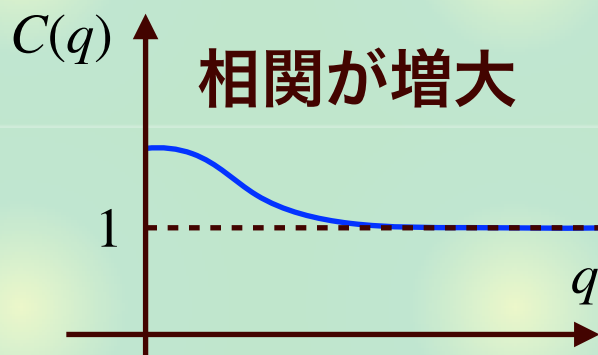
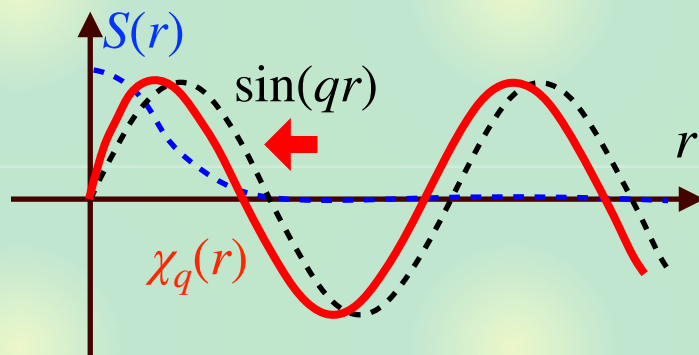
ソース関数 $S(\mathbf{r})$ (放出源) $\longleftrightarrow$ 波動関数 $\Psi_q^{(-)}(\mathbf{r})$ (相互作用)

波動関数の振る舞いと相関関数

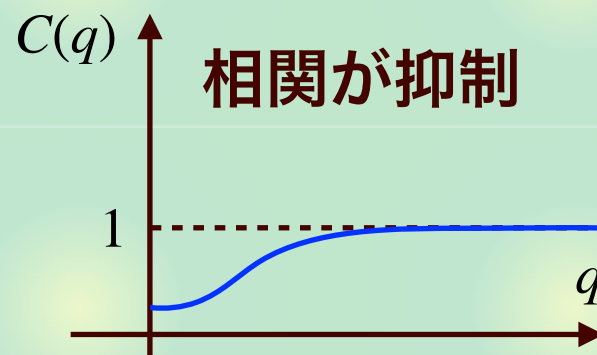
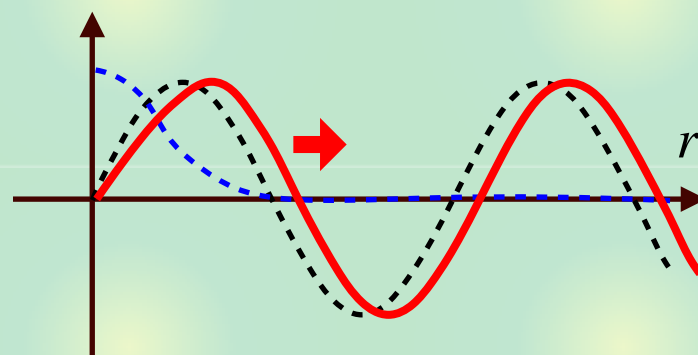
球対称ソースでs波相互作用が支配的な場合

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

引力



斥力



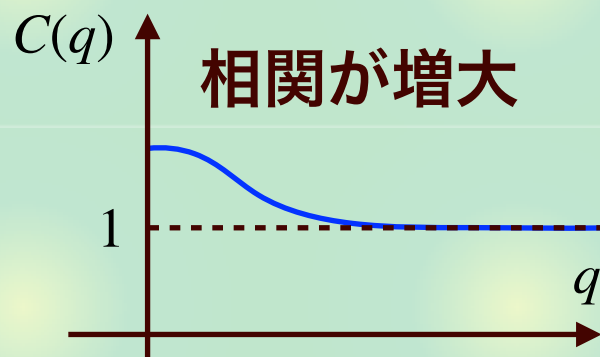
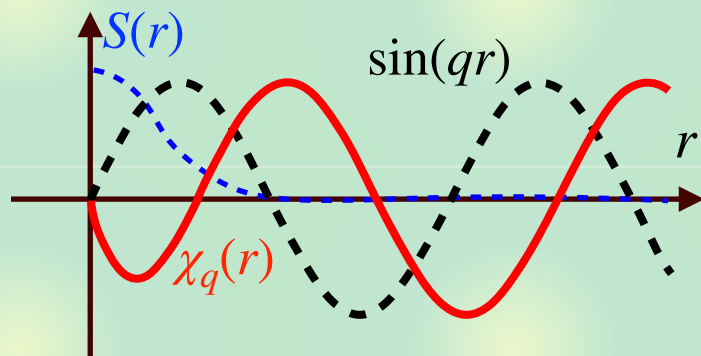
相関の定性的な振る舞いは**相互作用の性質**を反映

強い引力で束縛状態がある場合相関関数

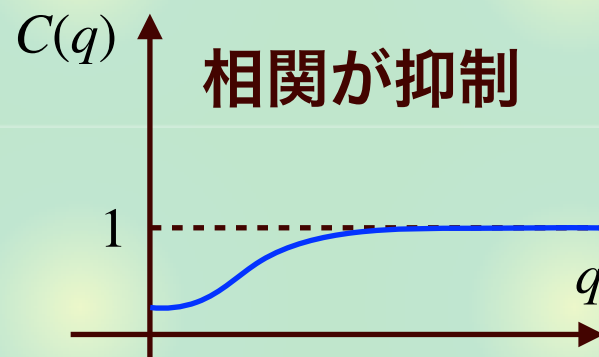
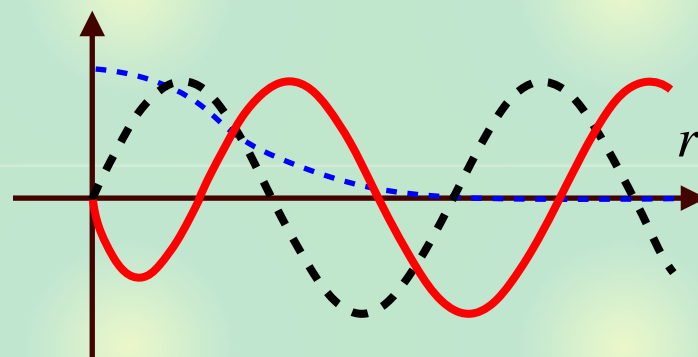
球対称ソースでs波相互作用が支配的な場合

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

束縛：小さいソース



束縛：大きいソース



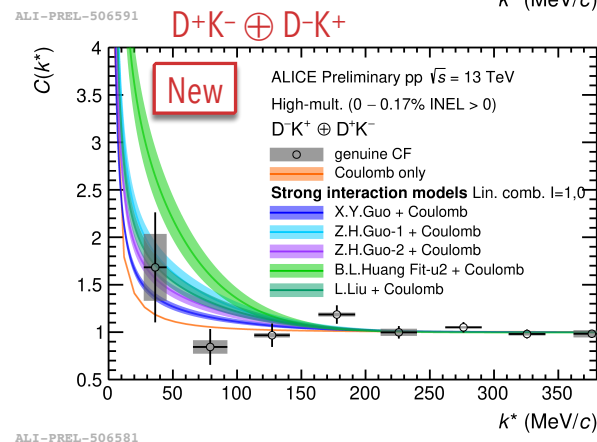
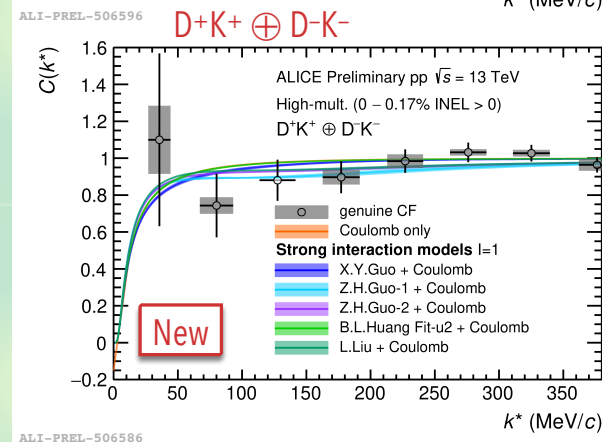
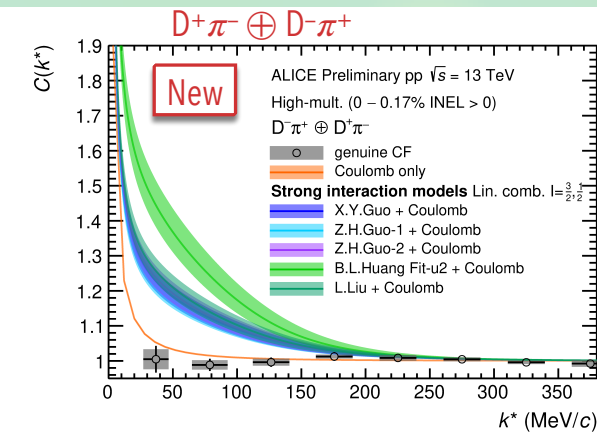
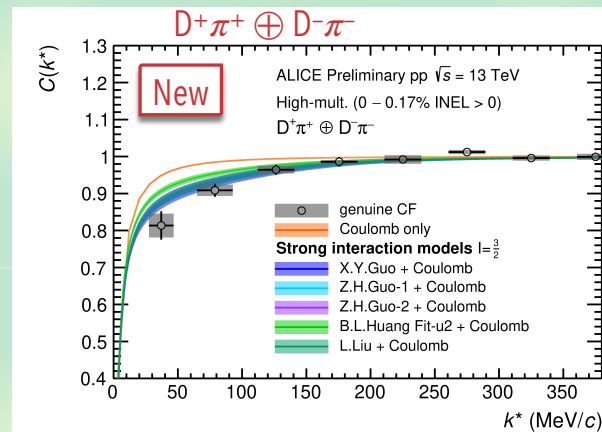
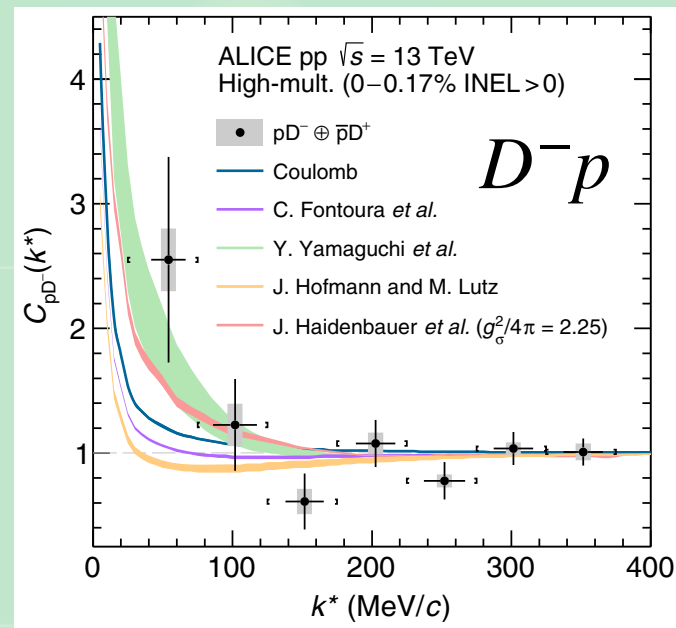
束縛状態がある場合は相関の振る舞いがソースサイズ依存

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 Λ

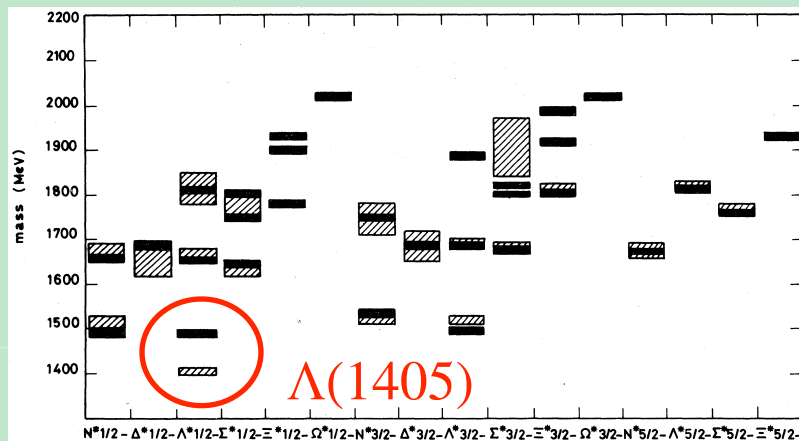
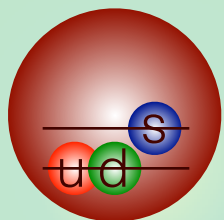
A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation

 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)

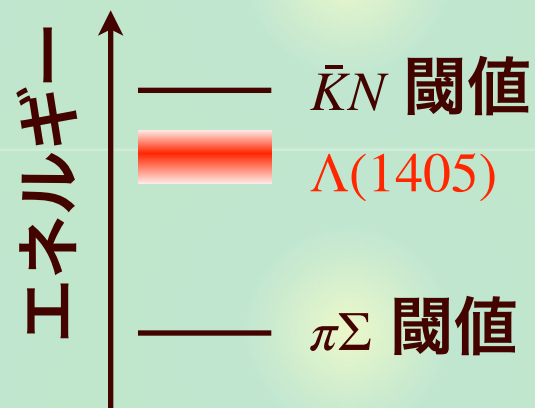
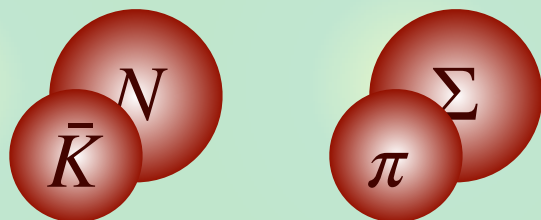


— : 理論
▨ : 実験

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)

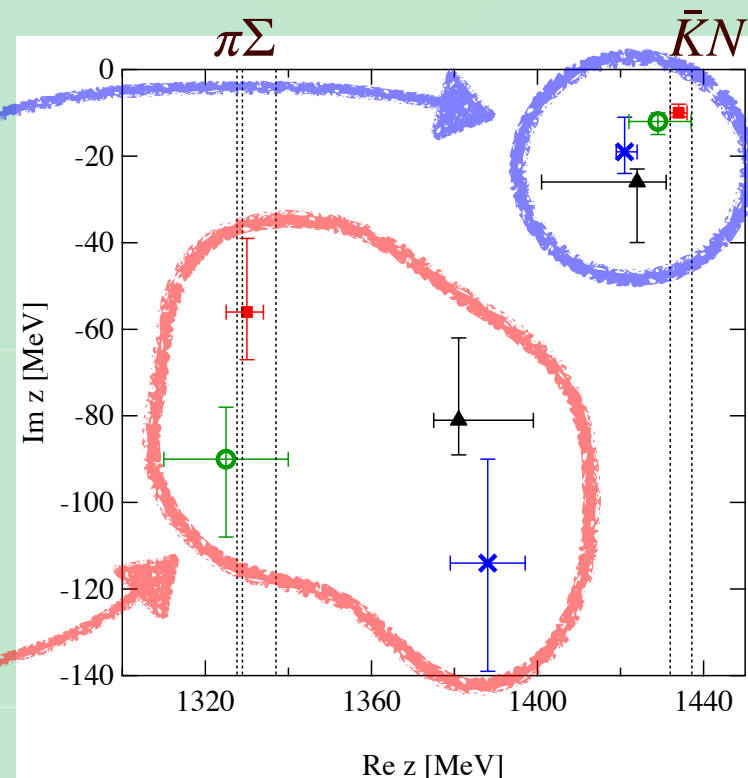
$\Lambda(1405) \ 1/2^-$

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

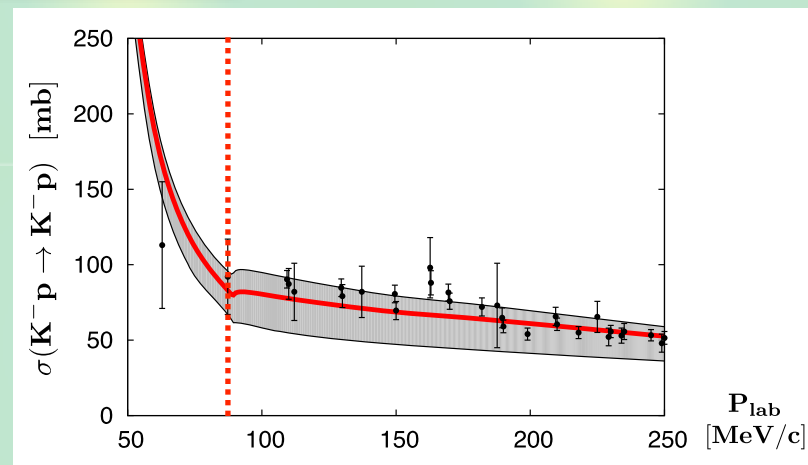
- “ $\Lambda(1405)$ ” の極は1405 MeVではなく ~ 1420 MeVに位置する
- Lower pole : 新しい two-star 共鳴 $\Lambda(1380)$

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)

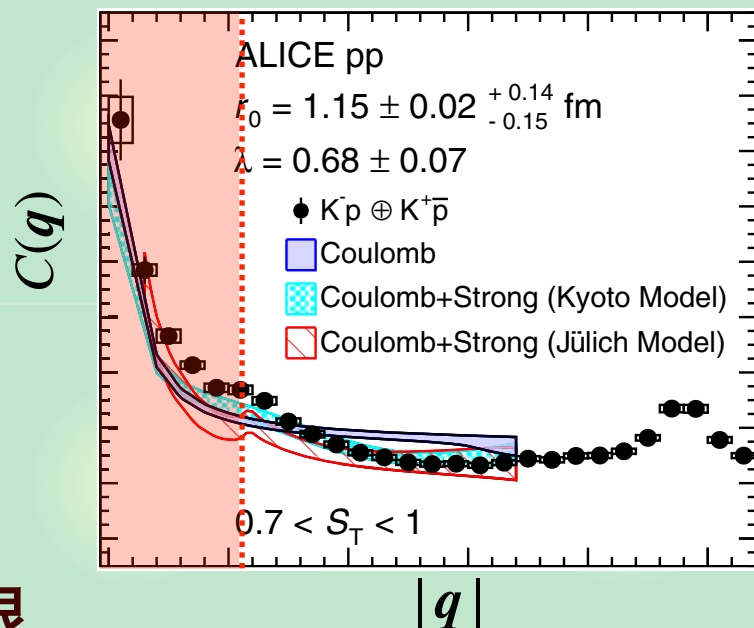
- 古い泡箱のデータ
- 統計精度、解像度が良くない
- $\bar{K}^0_n$ 閾値カスプは見えない



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

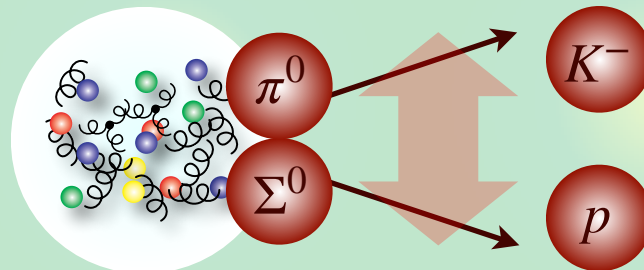
$$\begin{pmatrix} \frac{-1}{2\mu_1} \frac{d^2}{dr^2} + V_{11}(r) + V_C(r) & V_{12}(r) & \cdots \\ V_{21}(r) & \frac{-1}{2\mu_2} \frac{d^2}{dr^2} + V_{22}(r) + \Delta_2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi_{K^-p}(r) \\ \chi_{\bar{K}^0n}(r) \\ \vdots \end{pmatrix} = E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

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);

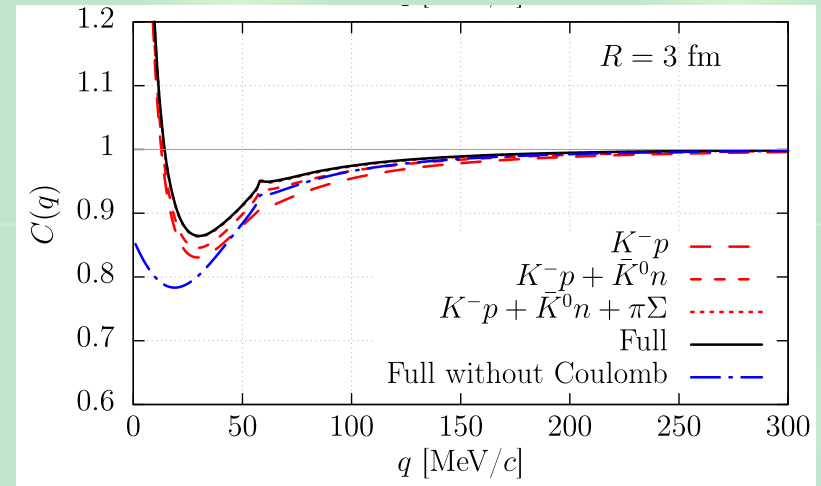
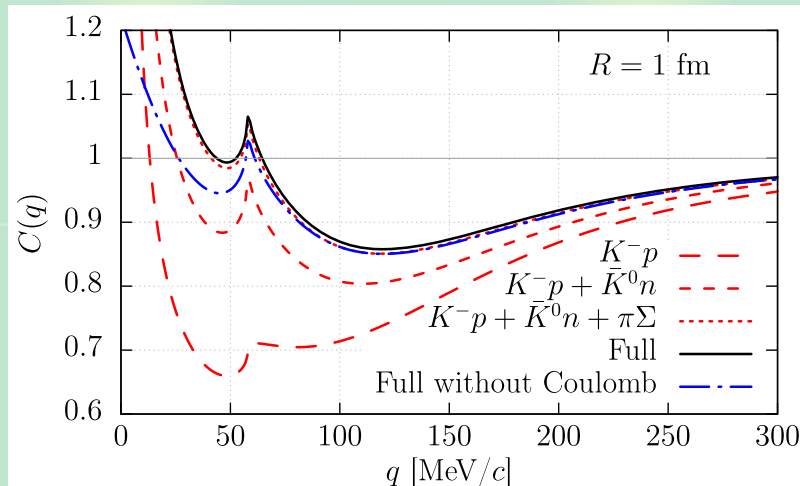
J. Haidenbauer, NPA 981, 1 (2019);

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

- ω_i : K^-p に対するチャンネル i の重み



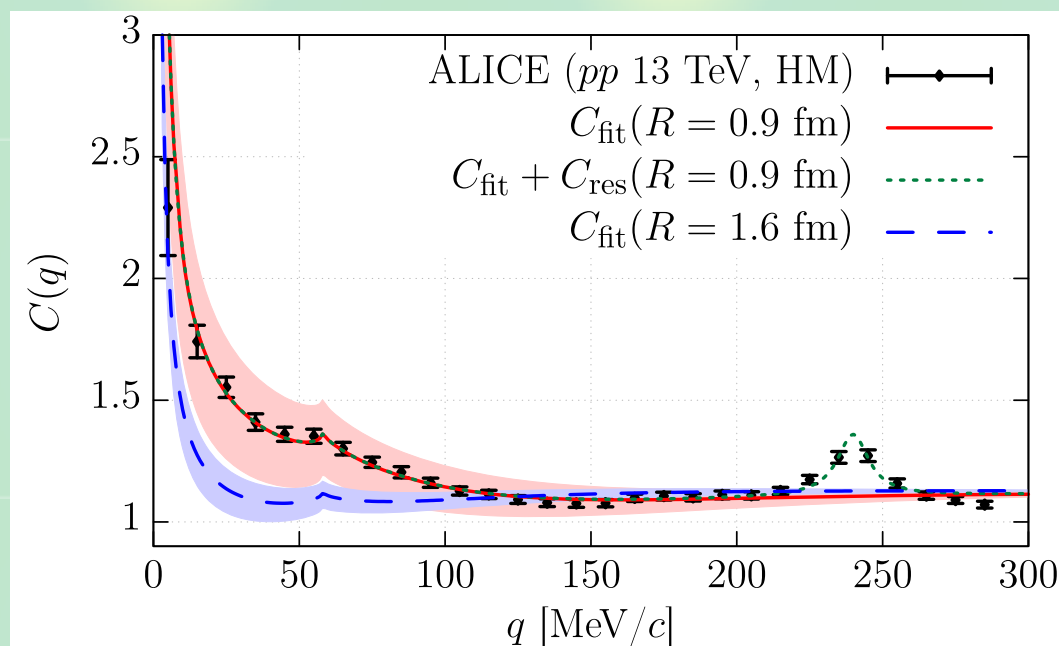
チャンネル結合効果は小さいソースで顕著

カイラルSU(3)動力学による相関関数

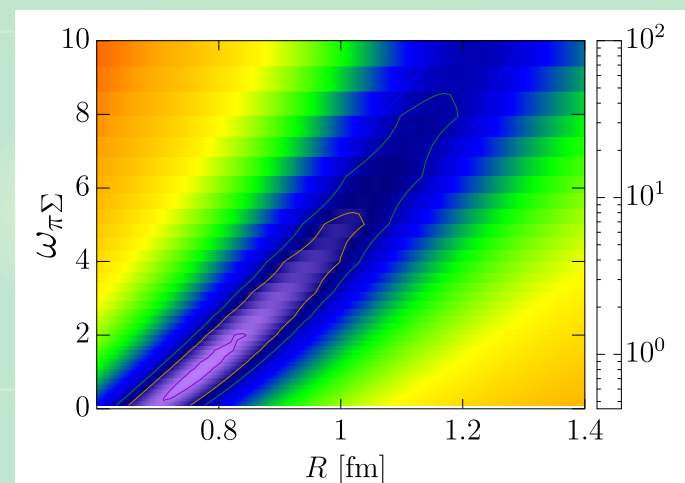
波動関数 $\Psi_{i,q}^{(-)}(r)$: チャンネル結合京都 $\bar{K}N-\pi\Sigma-\pi\Lambda$ ポテンシャル

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



reduced χ^2



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

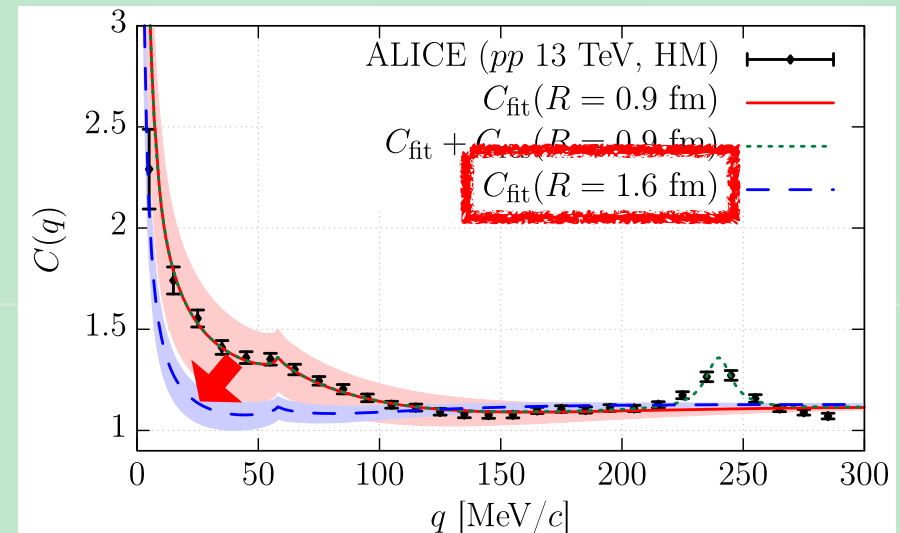
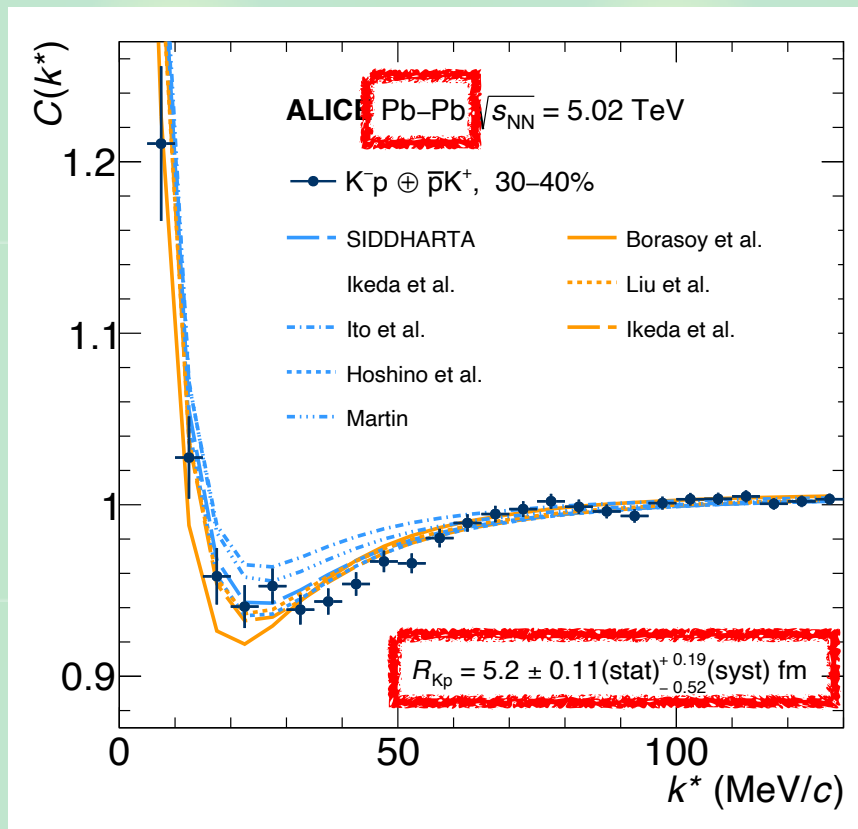
ALICEの相関関数データをよく再現する

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



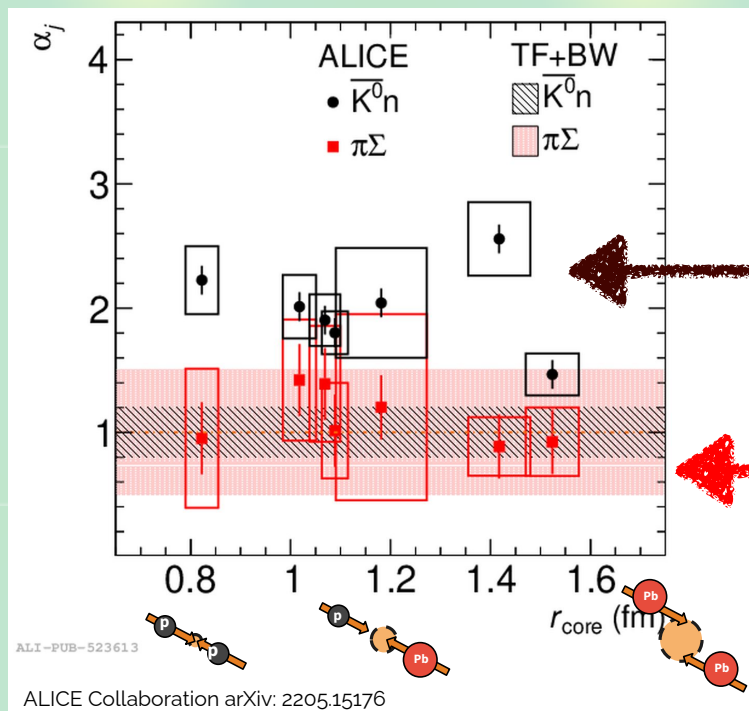
サイズ R の大きいソースで相関が抑制 ← 理論の予言

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 ω_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 Λ

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

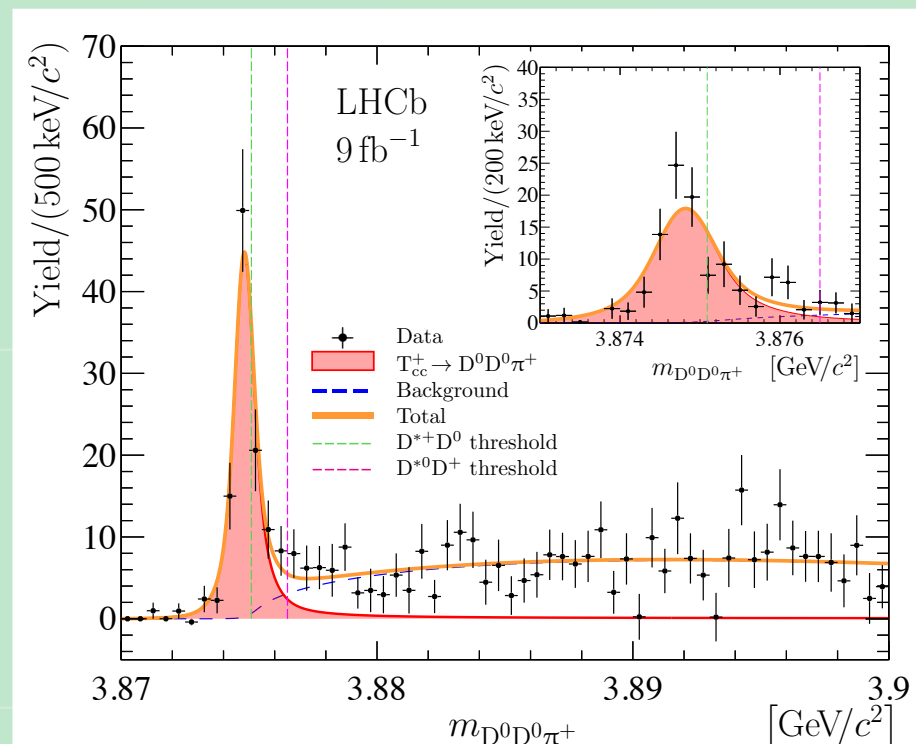
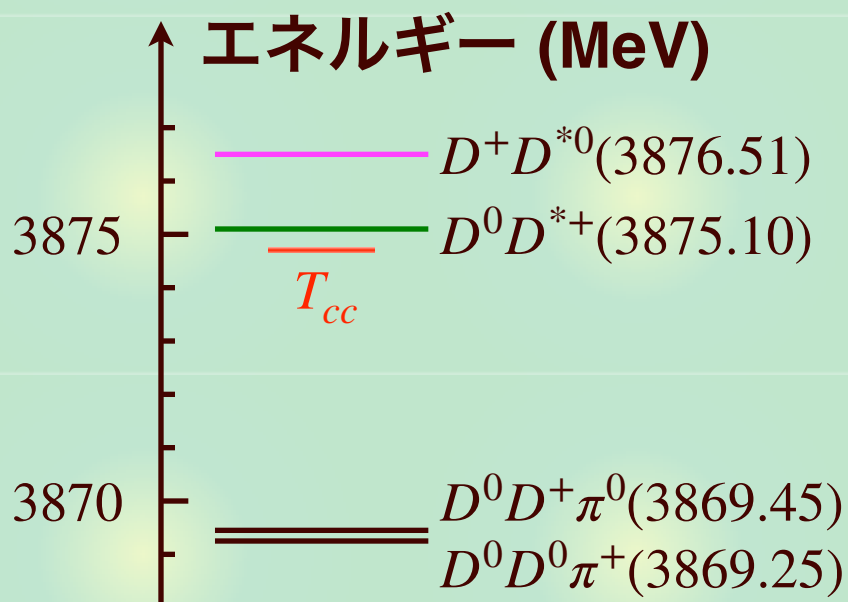
 まとめ

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

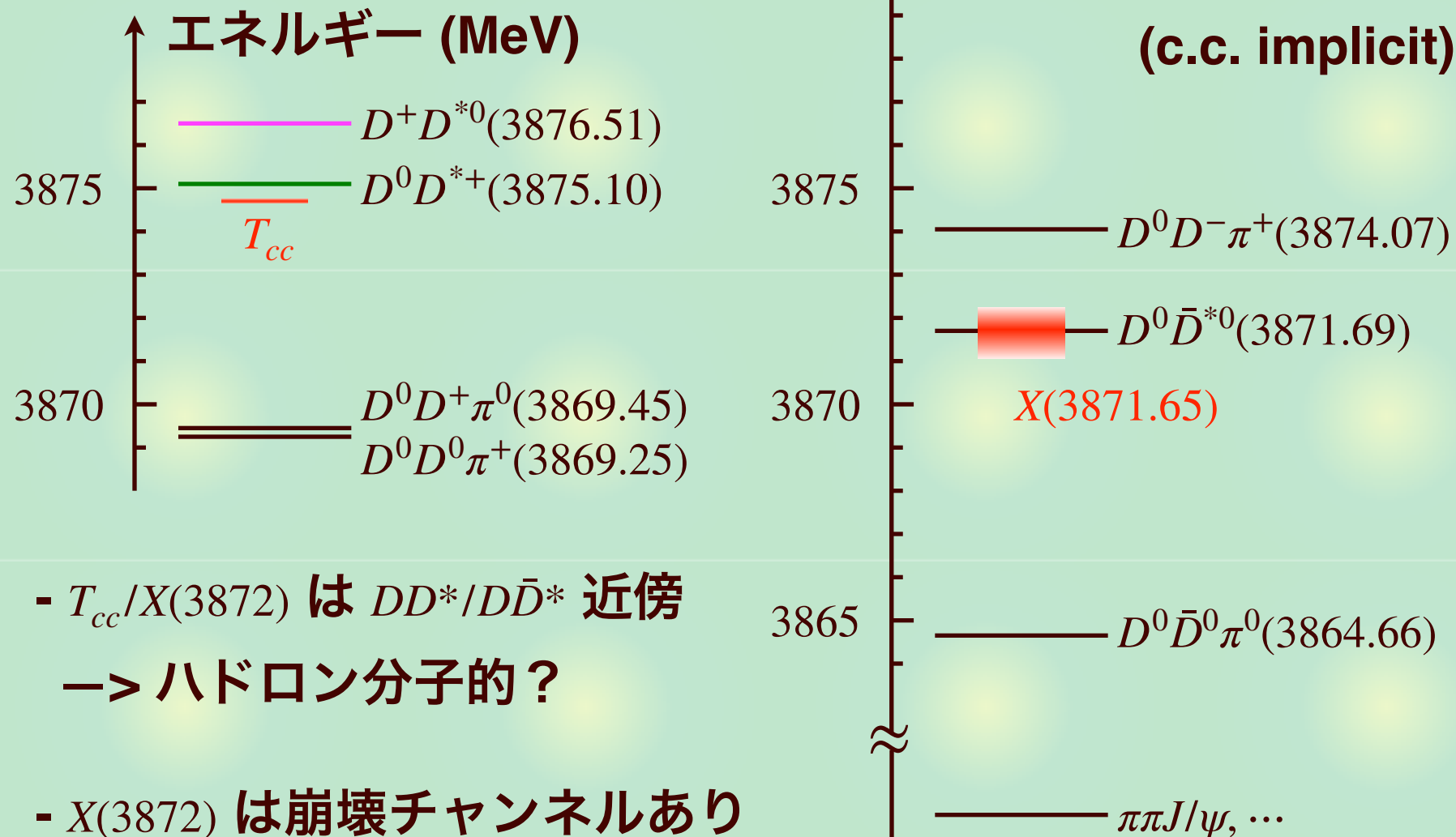


- 非常に小さい (**few MeV ~ keV**) エネルギースケールを含む

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



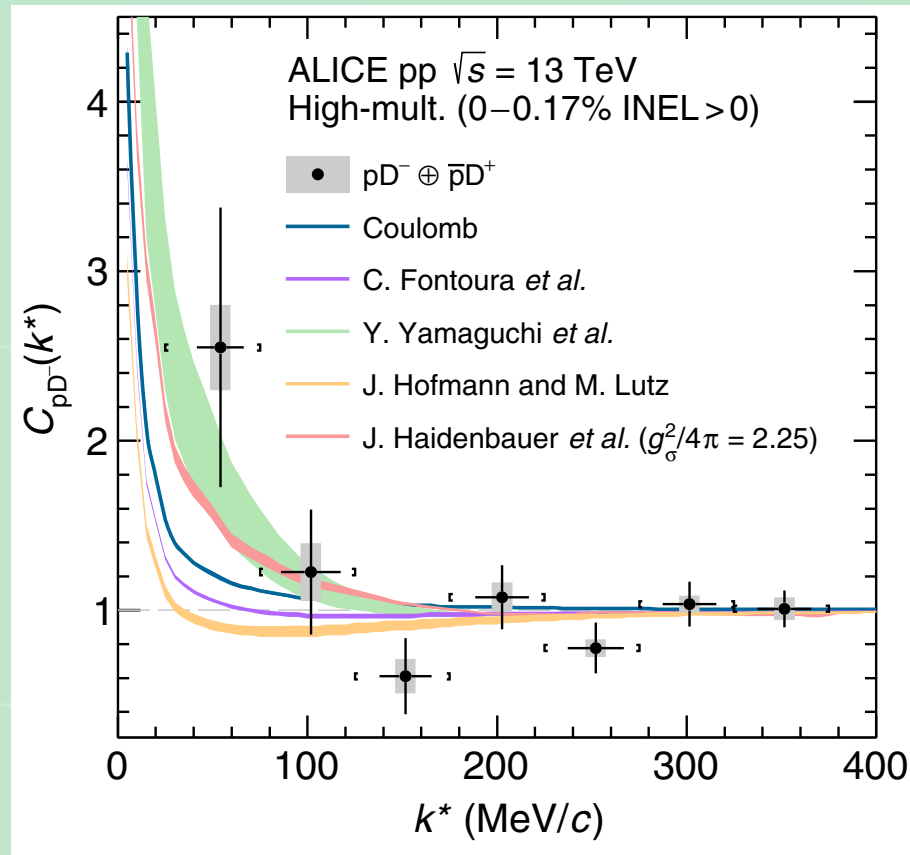
- $T_{cc}/X(3872)$ は $DD^*/D\bar{D}^*$ 近傍
 → ハドロン分子的？

- $X(3872)$ 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

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

↑ π 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)

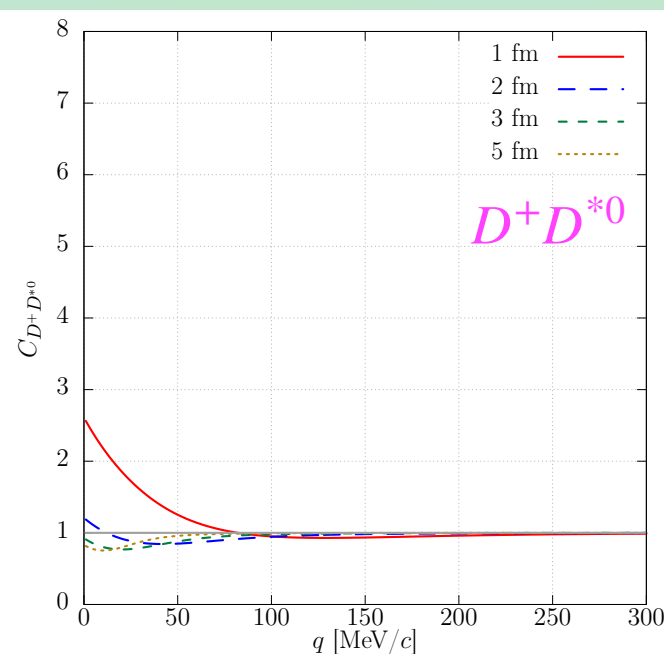
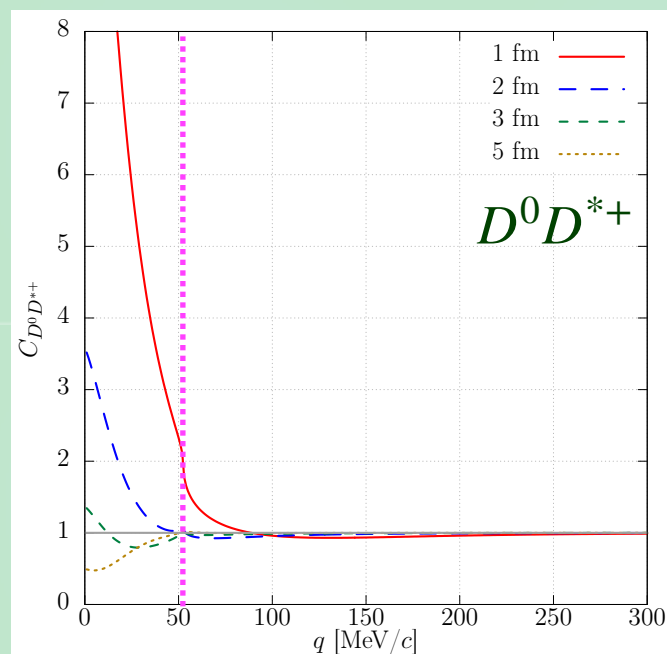
- $X(3872) : a_0^{D^0 \bar{D}^{*0}} = -4.23 + i3.95 \text{ fm} \left(a_0 = -i/\sqrt{2\mu E_h} \leftarrow \text{PDGの } E_h \right)$

$DD^* \sim T_{cc}$ チャンネル

$D^0 D^{*+}$ 、 $D^+ D^{*0}$ 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)

$D^+ D^{*0}$
 $D^0 D^{*+}$
 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)
- $D^0 D^{*+}$ で強いシグナル、 $D^+ D^{*0}$ 相関は比較的小さいシグナル
- $D^0 D^{*+}$ 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

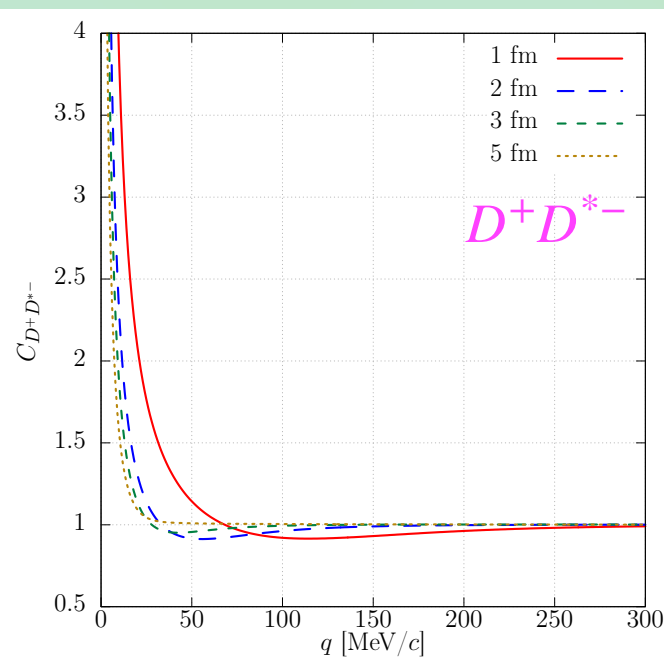
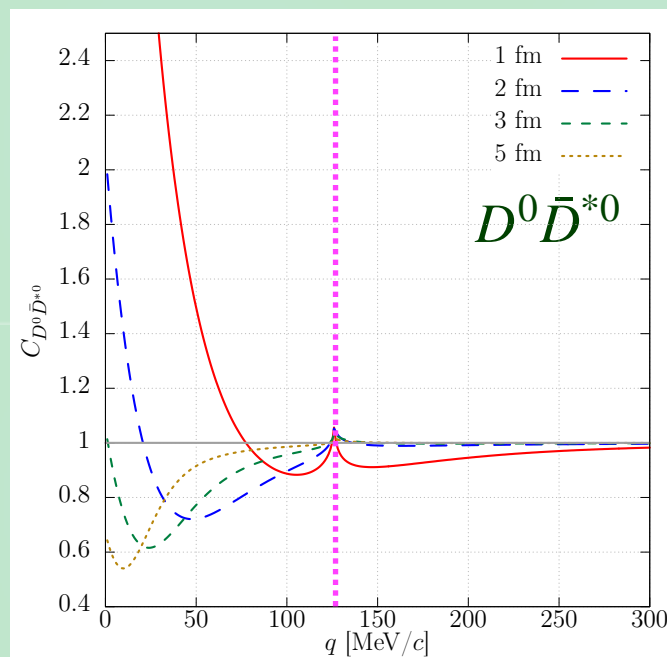
$D^0\bar{D}^{*0}$ 、 $D^+\bar{D}^{*-}$ 相関関数 ($c\bar{c}q\bar{q}$ チャンネル)

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 Λ

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 Λ_{NN} 3体力による斥力

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

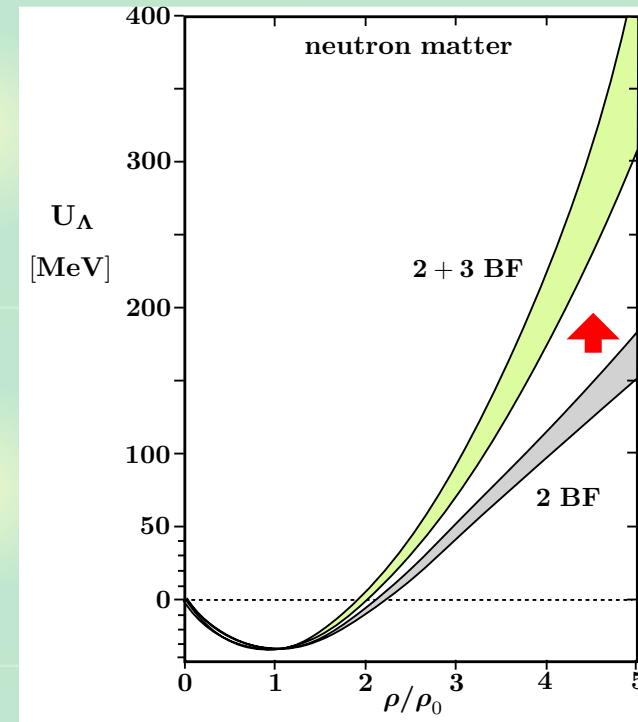
実験で検証する方法は？

- 重イオン衝突での Λ directed flow

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

Λ -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
- α 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

Λ 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 : ΛNN 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

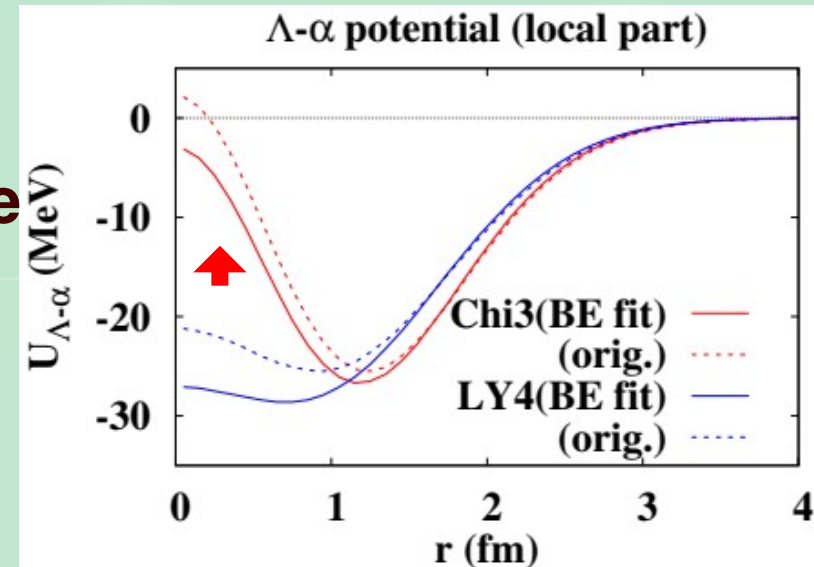
$\Lambda\alpha$ ポテンシャル

- ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ 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

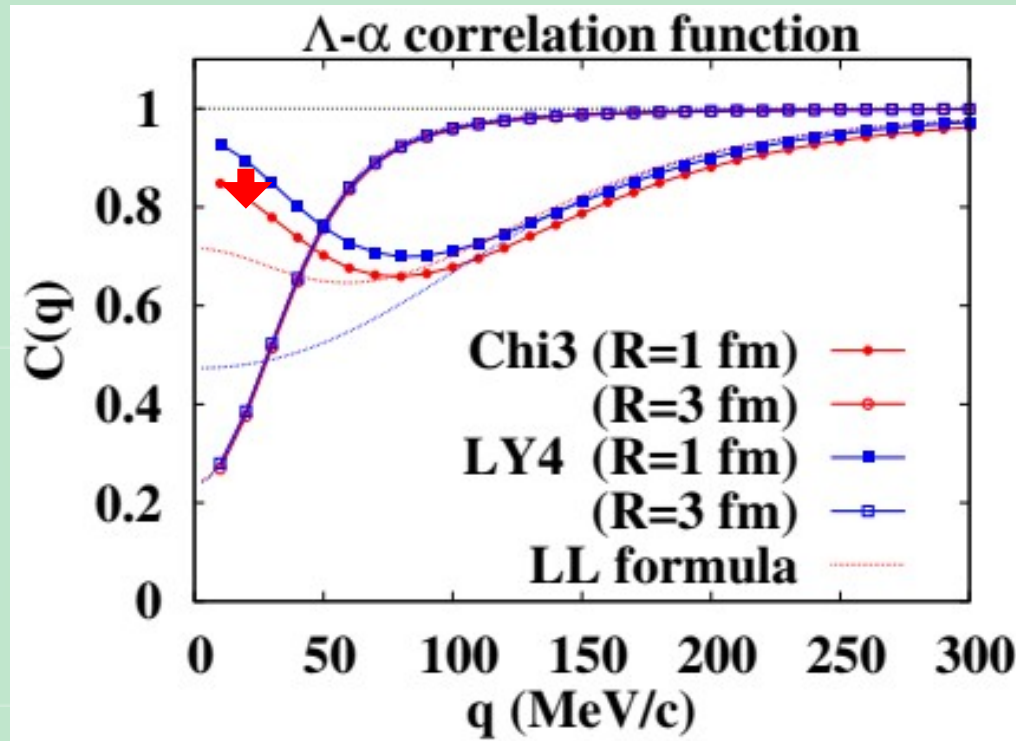
- Chi3 : 中心で斥力的



$\Lambda\alpha$ 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