

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

京都大学基礎物理学研究所 (2006/4-2008/11, 2013/8-2019/3)

2024, Mar. 3rd 1

画像

動画

ショッピング

ニュース

書籍

地図

フライト

ファイナンス

約 2,370 件 (0.31 秒)



京都大学

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp> > HIP2022-AO  :

フェムトスコープによるハドロン間相互作用の研究

大西さん

フェムトスコープによるハドロン間相互作用研究. 相関関数 (CF) を利用する研究 =Femtoscopy.
基本公式 =Koonin-Pratt formula. Koonin('77), Pratt('86), Lednicky+('82 ...
60 ページ



兵藤 哲雄

<https://hyodo.fpark.tmu.ac.jp> > publication  :

フェムトスコープによるハドロン間相互作用の研究 - 兵藤 哲雄

フェムトスコープによる. ハドロン間相互作用の研究. Page 2. 2. 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. ハドロン・原子核相関 ...



九州大学 理学研究院

<https://www.sci.kyushu-u.ac.jp> > koho > event > detail :

イベント情報の詳細

2023/08/02 — 第3回 物理学教室談話会 フェムトスコープによるハドロン間相互作用の研究・講演会・兵藤 哲雄氏 (東京都立大学理学部物理学科 准教授) .



兵藤 哲雄

<https://hyodo.fpark.tmu.ac.jp> > publication  :

フェムトスコープによるハドロン間相互作用の研究 - 兵藤 哲雄

フェムトスコープによる. ハドロン間相互作用の研究. Page 2. 2. Introduction. In ... 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.



京都大学

<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp> > Slide > Clust...  :

フェムトスコープによるハドロン間相互作用の研究 Femtoscopy ...

大西さん

2023/02/09 — フェムトスコープによるハドロン間相互作用の研究. Femtoscopy for hadron-

目次



導入：フェムトスコピー



K^-p 相関関数と $\Lambda(1405)$

- early attempts

A. Ohnishi, K. Morita, K. Miyahara, T. Hyodo, NPA 954, 294 (2016);

S. Cho, ..., A. Ohnishi, ..., ExHIC collaboration, PPNP 95, 279 (2017)

- ALICEの結果と理論解析

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020);

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

- その後の進展

ALICE collaboration, PLB 822, 136708 (2021); EPJC 83, 340 (2023)



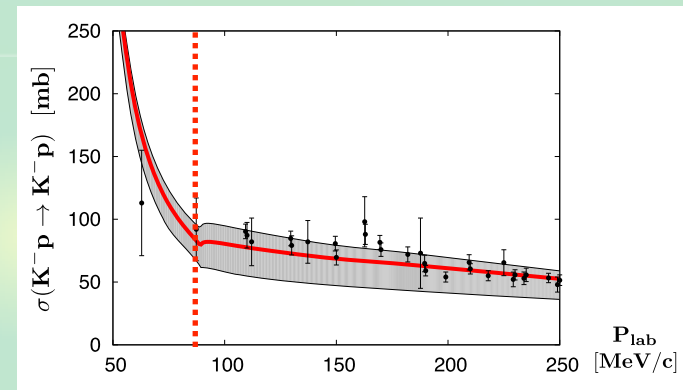
まとめ

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)

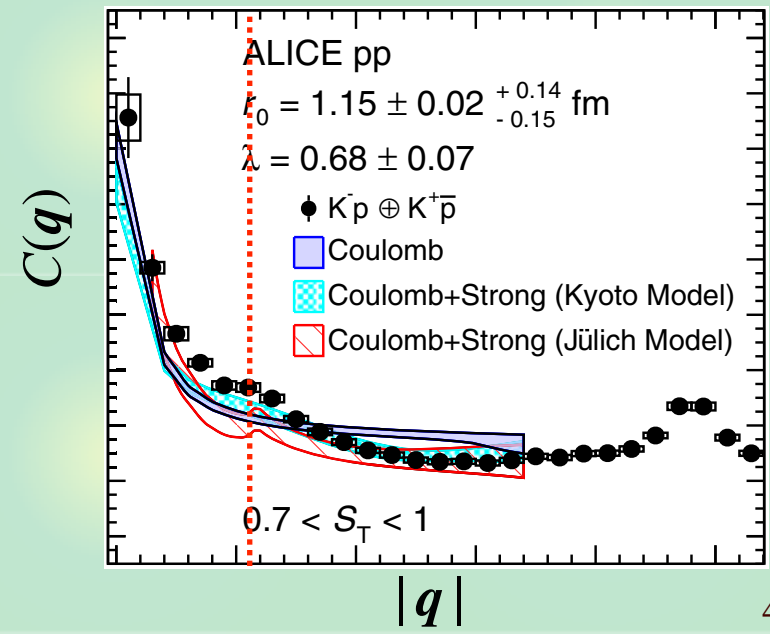
- 統計精度が良くない（低エネルギー）
- 限られた系： $NN, \Lambda N, \pi N, KN, \bar{K}N, \dots$
- ヘビー（ c, b ）ハドロン：ほぼ不可能



フェムトスコピー：相関関数

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020)

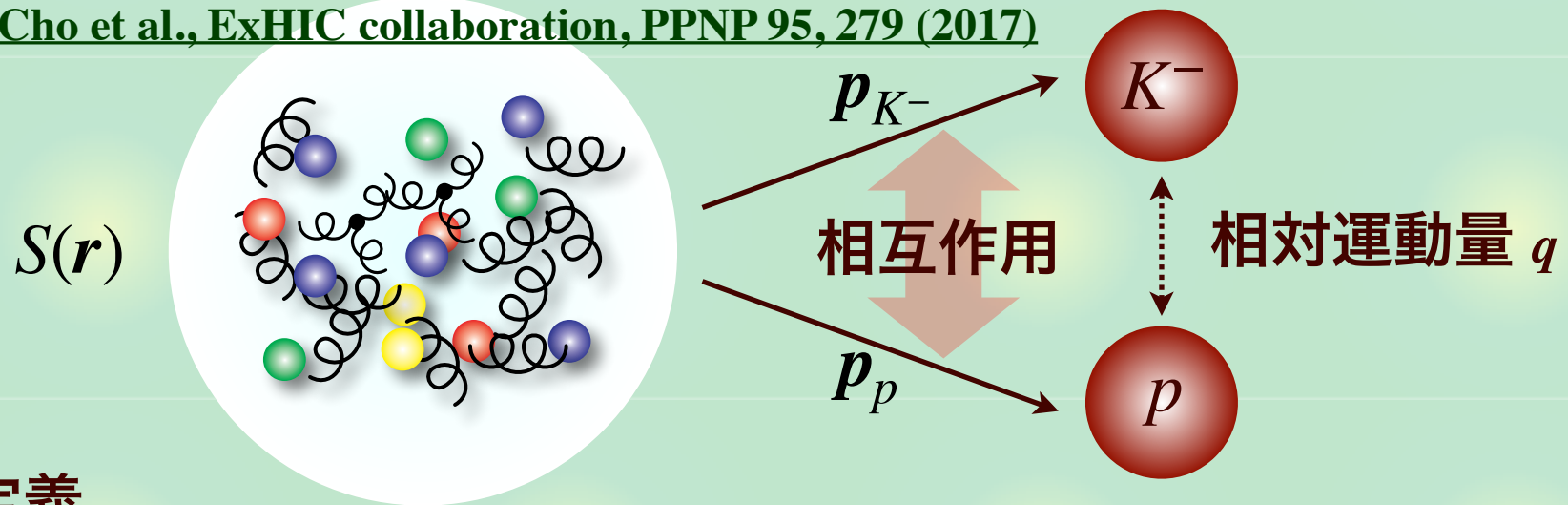
- 高い精度（ $\bar{K}^0 n$ カスプが見える）
- 様々な系： $\Lambda\Lambda, N\Xi, N\Omega, \phi N, \bar{K}\Lambda, DN, \dots$
- ヘビーハドロン：可能！



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)

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

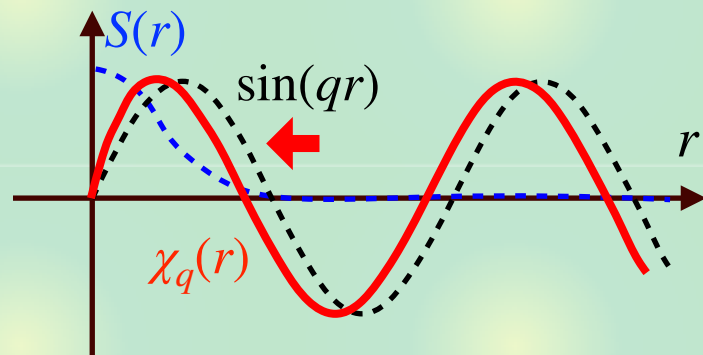
ソース関数 $S(\mathbf{r})$ (放出源) \leftrightarrow 波動関数 $\Psi_q^{(-)}(\mathbf{r})$ (相互作用)

波動関数の振る舞いと相関関数

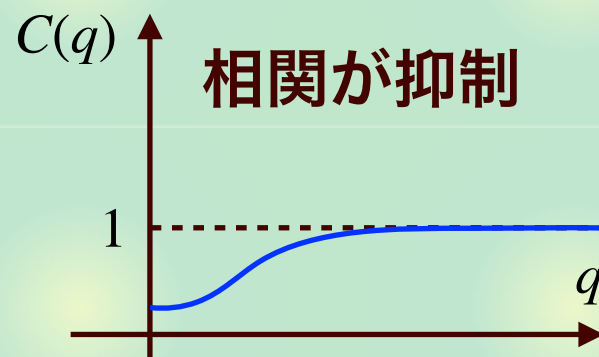
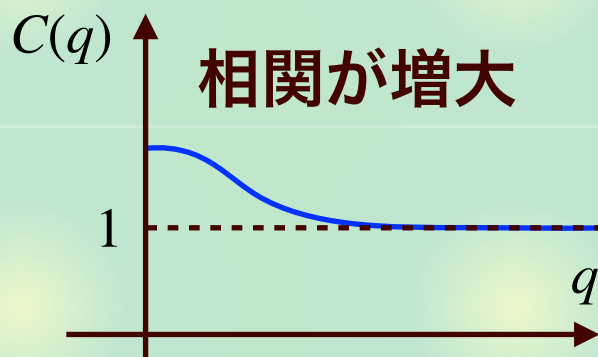
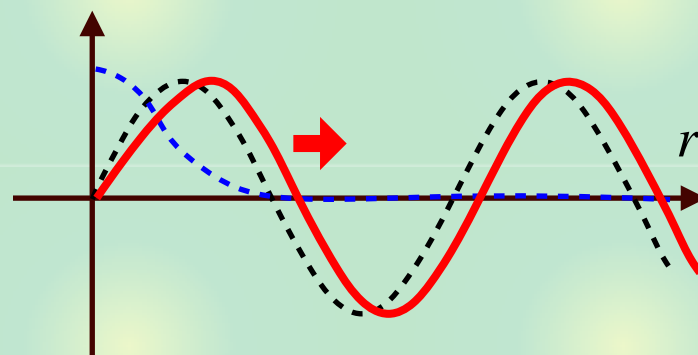
球対称ソースでs波相互作用が支配的な場合

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

引力



斥力



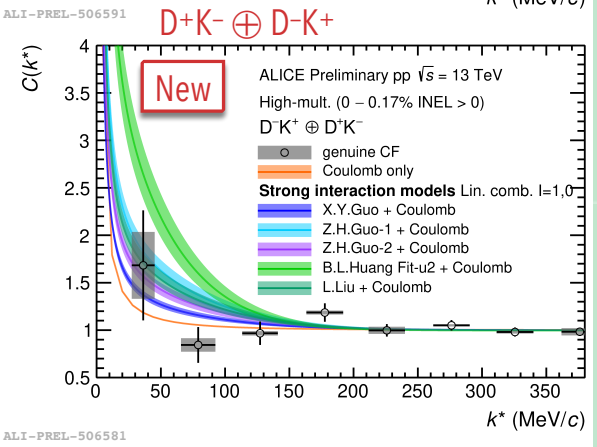
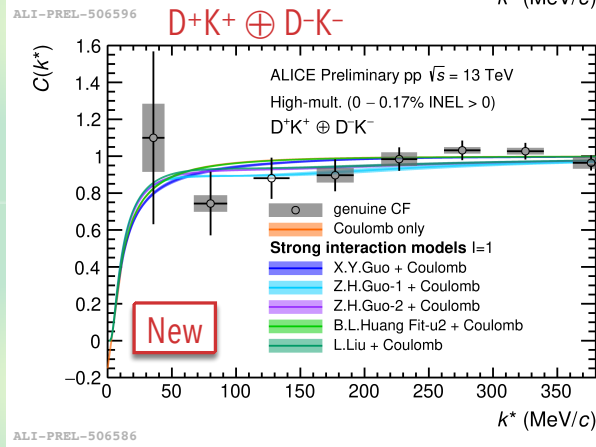
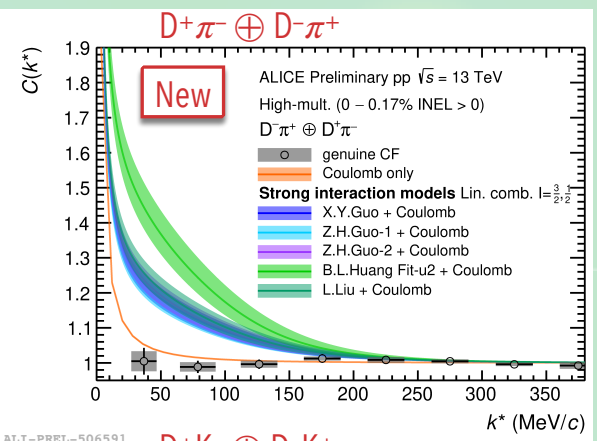
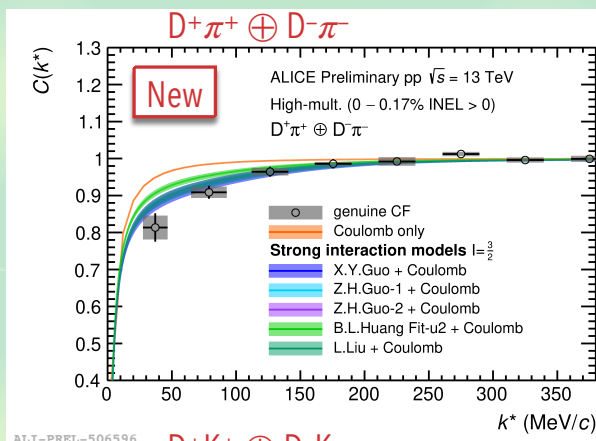
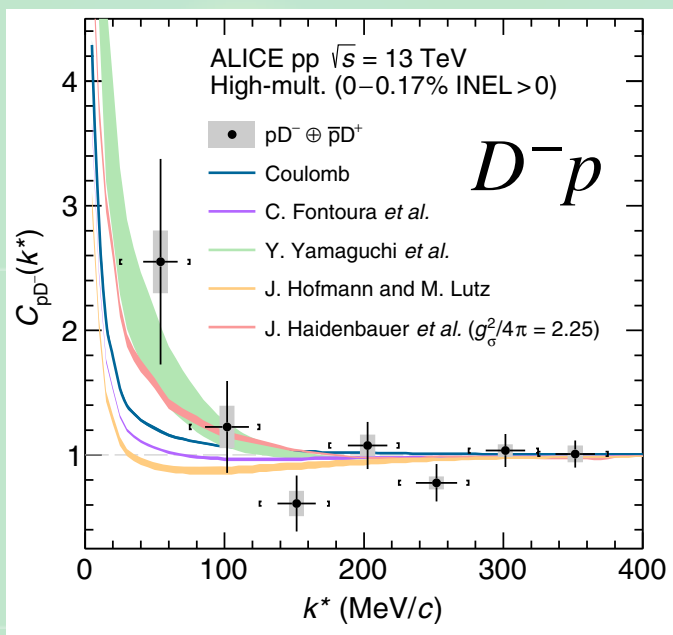
相関の定性的な振る舞いは相互作用の性質を反映

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)

多彩な応用の可能性

Scope of Femtoscopic study of HHI

pK^-
Chiral CC pot.
(examined)
Bound state
(favored)

$p\Xi^-$
Lattice QCD CC
pot. (examined)
Bound state
(disfavored)

$p\Omega$
Lattice QCD pot.
 $J=2$ (examined)
Bound state
(favored)

$p\phi \rightarrow a_0$ (Lattice pot. ?)

pD^\pm
Chamed
hadron-
nucleon
interaction
Bound
state ?


	n	p	K ⁻	K ⁺	π ⁻	π ⁺	Λ	Σ	Ξ ⁻	Ω	D ⁻	D ⁺	K _s	φ	+α
n															
p		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
K ⁻		○	○	○	○	○					○	○	○		
K ⁺		○	○	○	○	○					○	○	○		
π ⁻		○	○	○	○	○					○	○			
π ⁺		○	○	○	○	○					○	○			
Λ		○					○		○						
Σ		○						○	○						
Ξ ⁻		○						○	○						
Ω		○													
D ⁻		○	○	○	○	○					○	○	○		
D ⁺		○	○	○	○	○					○	○	○		
K _s			○	○											
φ		○													
+α															


$\Lambda\Lambda$
Scattering pars. (a_0, r_{eff})
(constrained)
Bound state (disfavored)

$K^\pm K_s^0$
Tetraquark
component
in a_0 meson

$\Lambda\Xi, DK, D\bar{K}, D\pi,$
 $\Xi\Xi, pd, \Lambda d, \dots$

目次

 導入：フェムトスコピー

 K^-p 相関関数と $\Lambda(1405)$

- early attempts

A. Ohnishi, K. Morita, K. Miyahara, T. Hyodo, NPA 954, 294 (2016);

S. Cho, ..., A. Ohnishi, ..., ExHIC collaboration, PPNP 95, 279 (2017)


- ALICEの結果と理論解析

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020);

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

- その後の進展

ALICE collaboration, PLB 822, 136708 (2021); EPJC 83, 340 (2023)

 まとめ

K^-p 相関関数の始まり

2014-2015 : $\Lambda\Lambda$ 相関 (森田・古本・大西 / STARのデータ)

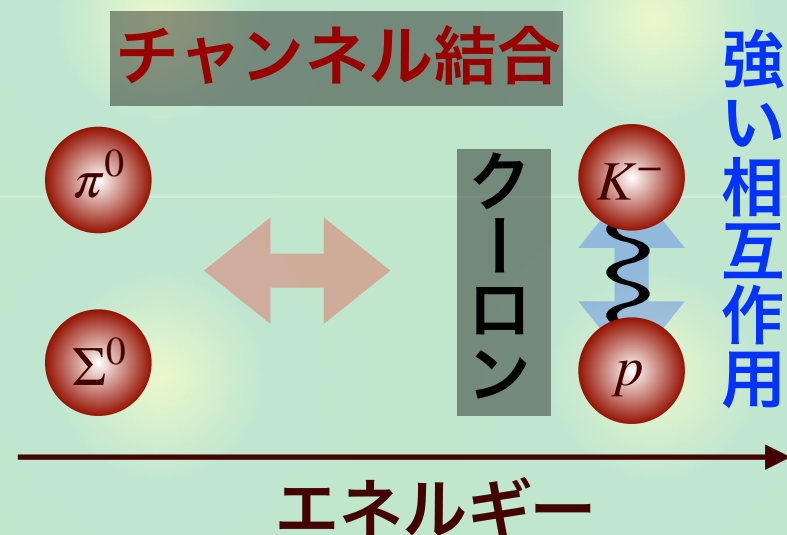
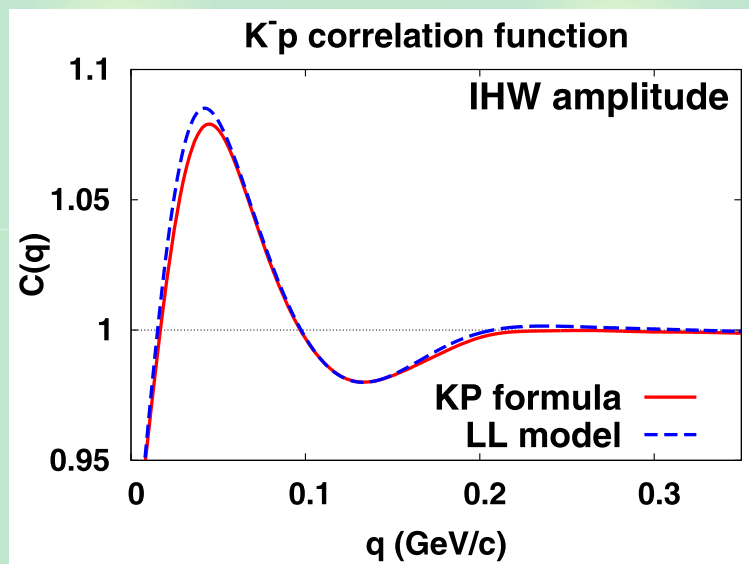
2015年5月 大西さん 「 K^-p 相関関数なら興味はありますか？」

- K^-p 座標空間ポテンシャル (京都 $\bar{K}N$ ポテンシャル)

K. Miyahara, T. Hyodo, PRC 93, 015201 (2016)

NPA special issue : チャンネル結合なし、クーロンなし

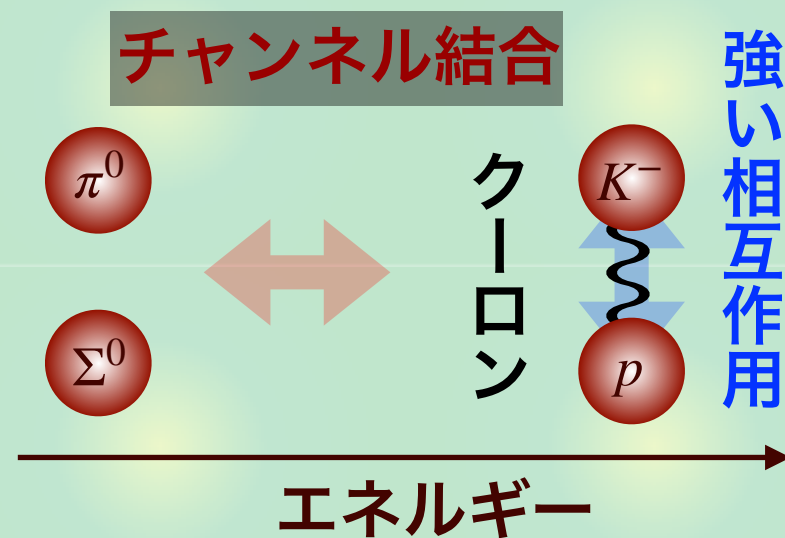
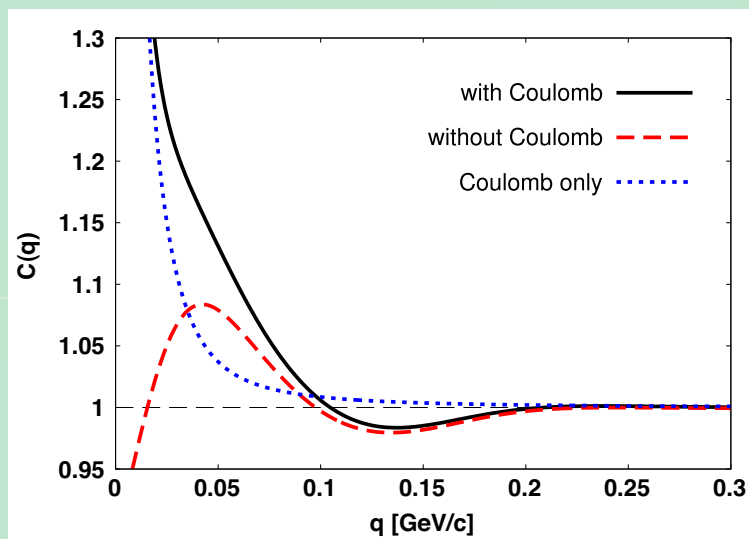
A. Ohnishi, K. Morita, K. Miyahara, T. Hyodo, NPA 954, 294 (2016)



ExHIC collaboration

ExHIC review paper : チャンネル結合なし、クーロンあり

S. Cho, ..., A. Ohnishi, ..., ExHIC collaboration, PPNP 95, 279 (2017)




ExHIC collaboration : モレキュール研究会 (S.H. Lee)


- ハドロン構造 <-> 重イオン衝突の生成量

S. Cho et al., PRL 106, 212001 (2011);
PRC 84, 064910 (2011); PPNP 95, 279 (2017)



目次

 導入：フェムトスコピー

 K^-p 相関関数と $\Lambda(1405)$

- early attempts

A. Ohnishi, K. Morita, K. Miyahara, T. Hyodo, NPA 954, 294 (2016);

S. Cho, ..., A. Ohnishi, ..., ExHIC collaboration, PPNP 95, 279 (2017)


- ALICE実験の結果と理論解析

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020);

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

- その後の進展

ALICE collaboration, PLB 822, 136708 (2021); EPJC 83, 340 (2023)

 まとめ

ALICE実験

2015年10月 : トレント研究会でALICEの情報

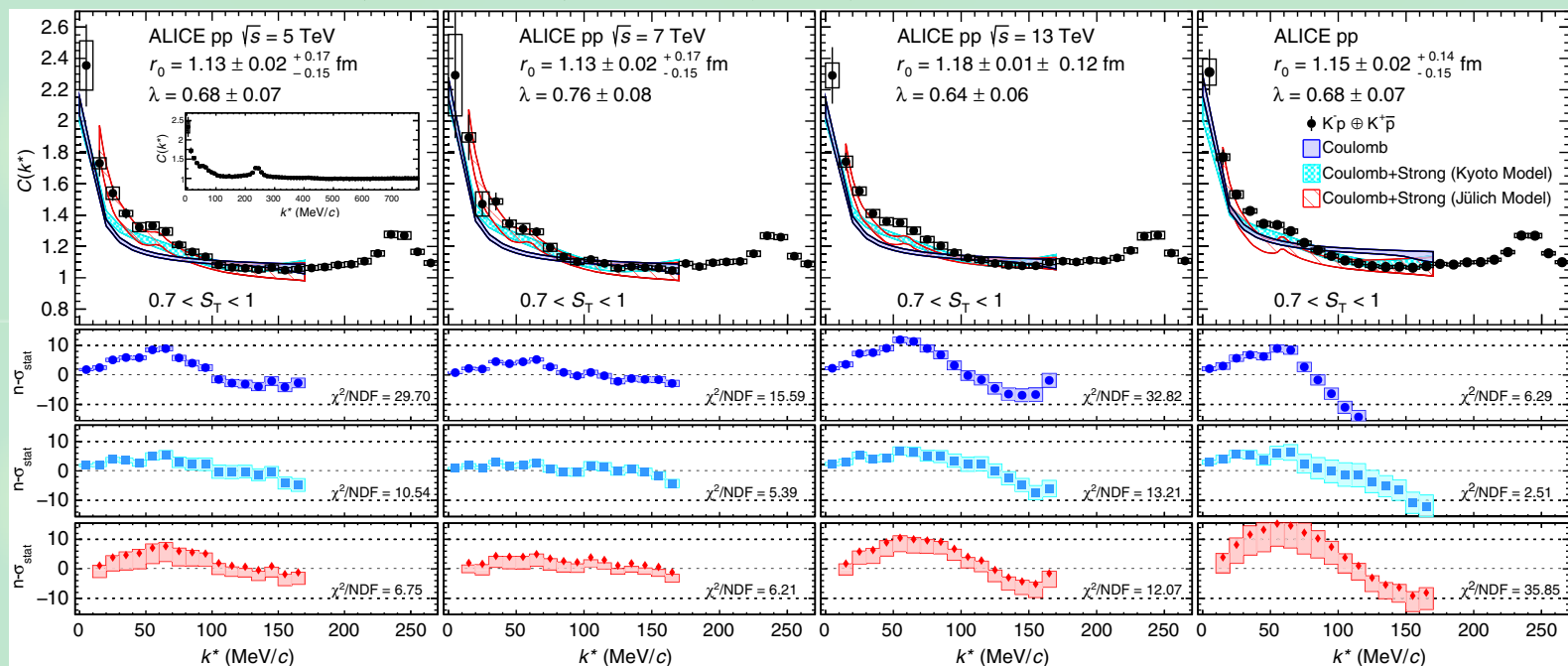
- L. Fabbietti 「HADESで pp , $p\Lambda$ 相関を測定、ALICEで K^-p ?」

2018年2月 : CATS by ALICE members

D.L. Mihaylov *et al.*, EPJC78, 394 (2018)

2019年5月 : ALICE K^-p correlation data

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020)



Drei Maß



大西さん

神谷さん

チャンネル結合効果

s波Schrödinger方程式

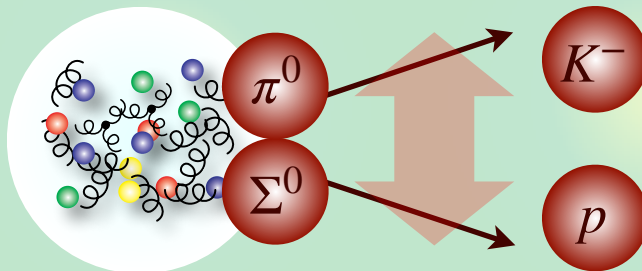
$$\begin{pmatrix} \frac{-1}{2\mu_1} \frac{d^2}{dr^2} + V_{11}(r) + V_C(r) & V_{12}(r) & \dots \\ V_{21}(r) & \frac{-1}{2\mu_2} \frac{d^2}{dr^2} + V_{22}(r) + \Delta_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi_{K^-p}(r) \\ \chi_{\bar{K}^0n}(r) \\ \vdots \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix}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

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 ($r \rightarrow \infty$)

$$\begin{pmatrix} \chi_{K^-p}(r) \\ \chi_{\bar{K}^0n}(r) \\ \vdots \end{pmatrix} \propto \begin{pmatrix} \#H_0^-(\eta, qr) + \#H_0^+(\eta, qr) \\ \#e^{-iq_2r} + \#e^{iq_2r} \\ \vdots \end{pmatrix} \text{ 内向き + 外向き}$$

- $\bar{K}^0n, \pi^+\Sigma^-, \pi^0\Sigma^0, \pi^-\Sigma^+, \pi^0\Lambda$ 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 (2019年11月)

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

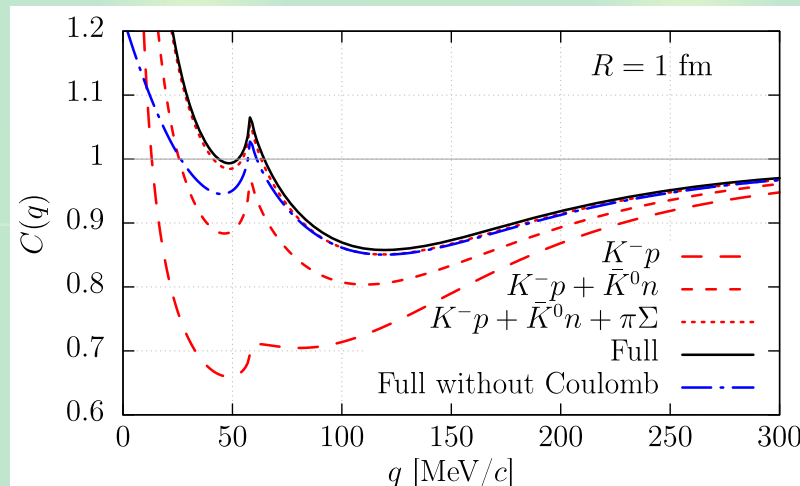
J. Haidenbauer, NPA 981, 1 (2019);

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

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

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

- ω_i : K^-p に対するチャンネル i の重み



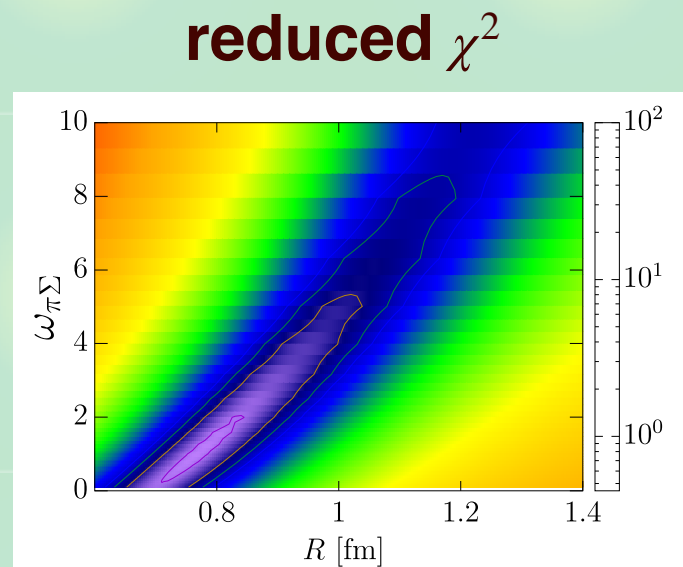
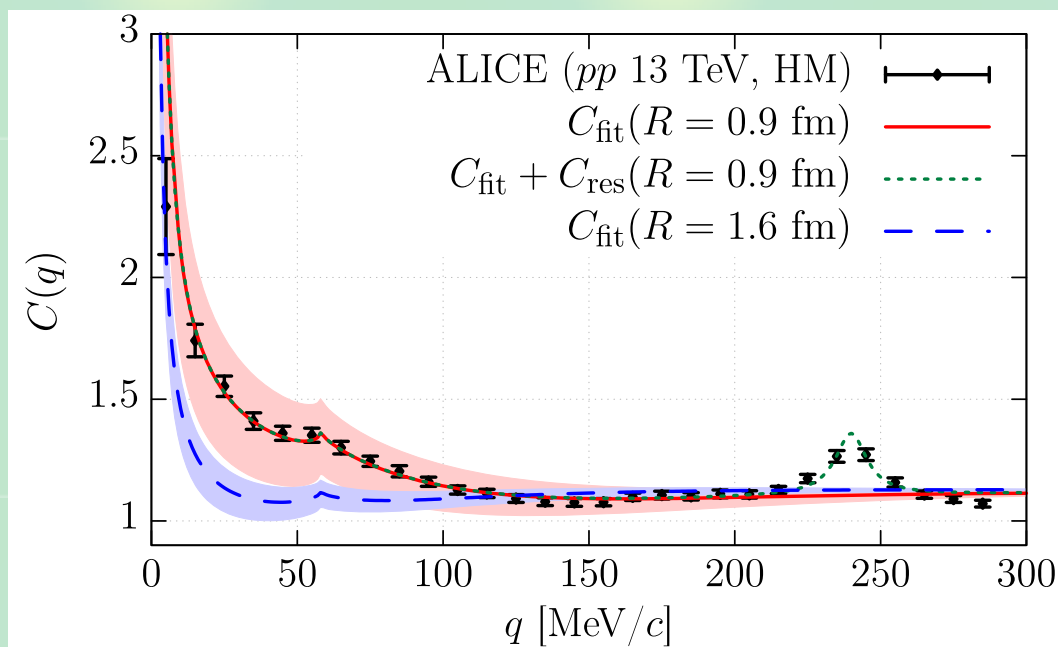
チャンネル結合効果によって相関が変化する

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

目次

 導入：フェムトスコピー

 K^-p 相関関数と $\Lambda(1405)$

- early attempts

A. Ohnishi, K. Morita, K. Miyahara, T. Hyodo, NPA 954, 294 (2016);

S. Cho, ..., A. Ohnishi, ..., ExHIC collaboration, PPNP 95, 279 (2017)


- ALICE実験の結果と理論解析

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020);

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

- その後の進展

ALICE collaboration, PLB 822, 136708 (2021); EPJC 83, 340 (2023)

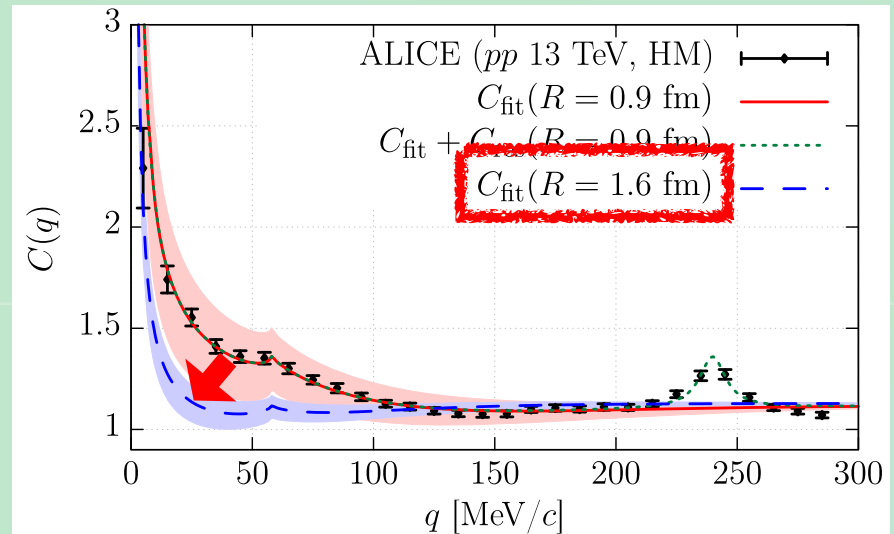
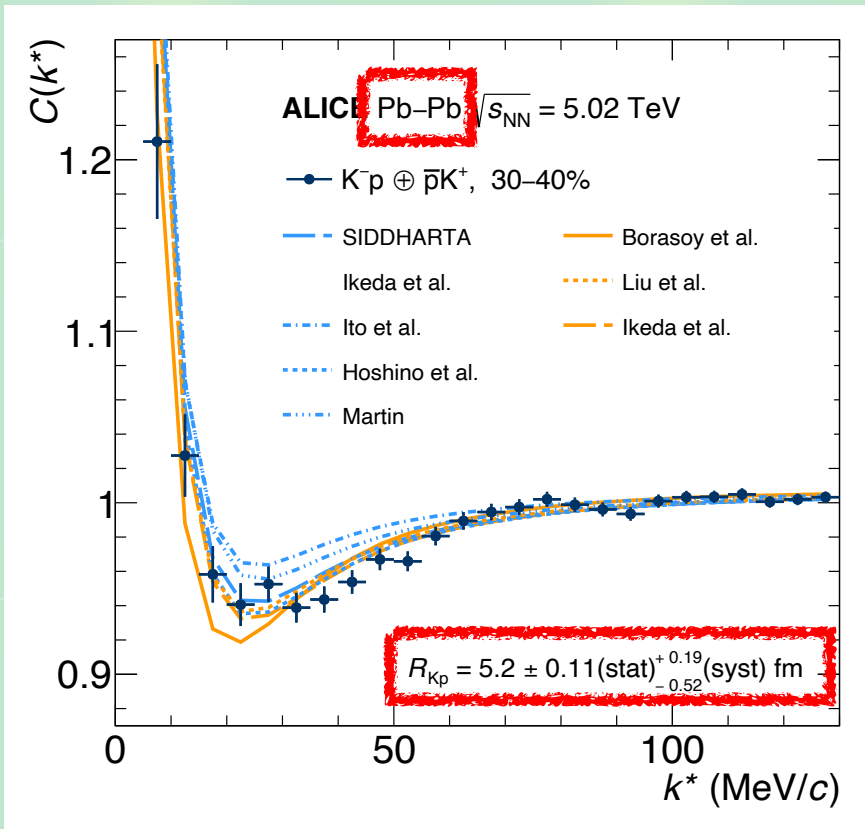
 まとめ

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



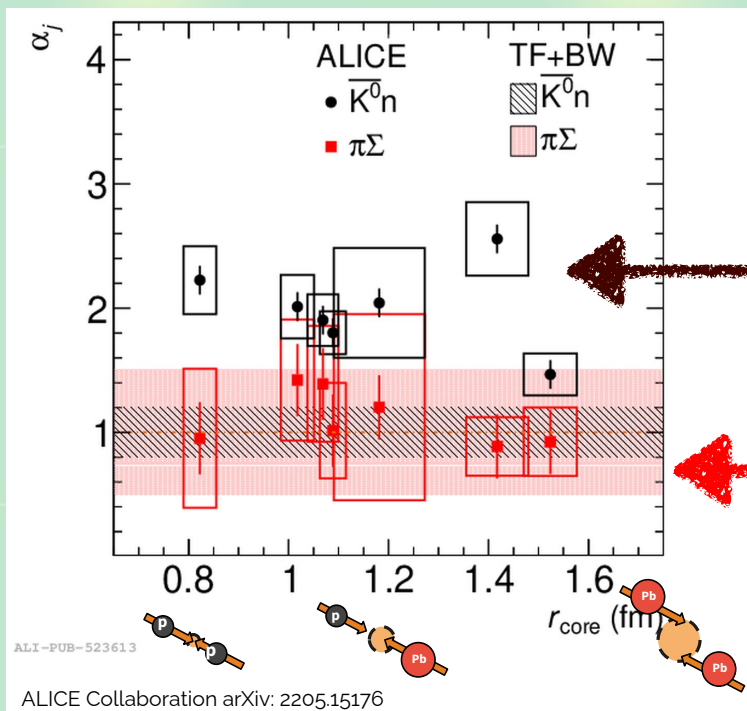
サイズ R の大きいソースで相関が抑制 ← 理論の予言

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

フェムトスコピーのデータから K^-p 相互作用の改良の可能性

まとめ

実験 (STAR, ALICE)



重イオン衝突



フェムトスコーピーによる
ハドロン間相互作用の研究



ハドロン現象論



大西さんどうもありがとうございました。