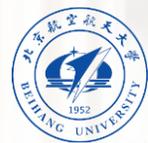

第一届超子物理研讨会
(2024年4月14日, 南方核科学理论研究中心)

超子-核子、超子-超子相互作用 及其动量关联函数

刘志伟

合作者: 耿立升、李凯文、宋晶



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY



目录

1. 研究背景

- 研究意义
- 实验现状
- 理论现状

2. 重子-重子相互作用

- 协变手征有效场论
- 超子-核子、超子-超子相互作用
- 相互作用随奇异数的演化

3. 重子-重子动量关联函数

- 动量关联函数的分析方法
- 超子-核子、超子-超子动量关联函数
- $SU(3)$ 对称性及其破缺的检验

4. 总结与展望

德才兼备

知行合一



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

目录

1. 研究背景

- 研究意义
- 实验现状
- 理论现状

2. 重子-重子相互作用

- 协变手征有效场论
- 超子-核子、超子-超子相互作用
- 相互作用随奇异数的演化

3. 重子-重子动量关联函数

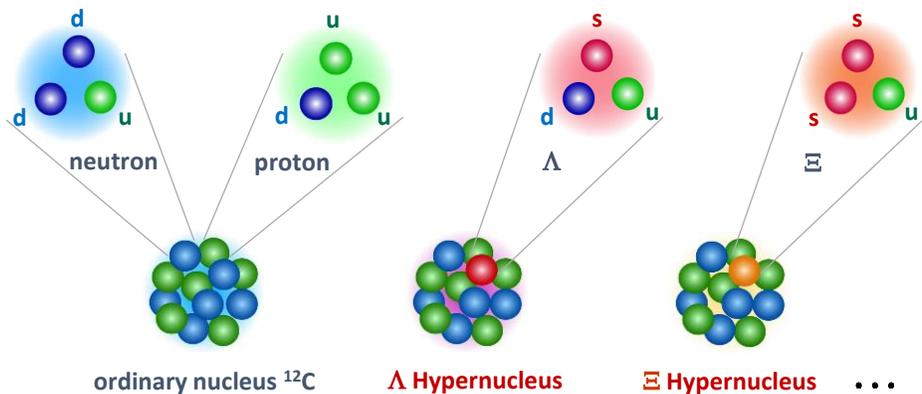
- 动量关联函数的分析方法
- 超子-核子、超子-超子动量关联函数
- SU(3)对称性及其破缺的检验

4. 总结与展望

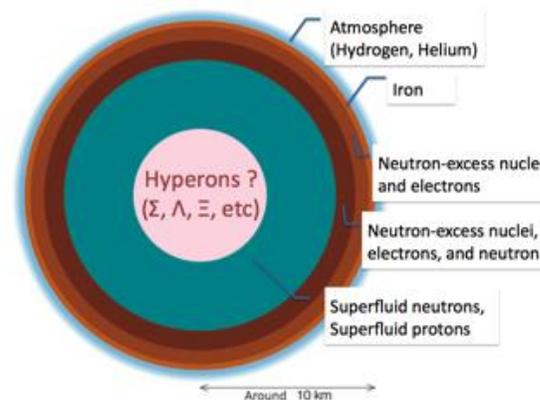
德才兼备

知行合一

● 超子-核子和超子-超子相互作用 — 基本输入量



超核物理



核天体物理

束缚的 H-双重子态 (uuddss) ?

自旋依赖的 ΛN 电荷对称性破缺 ?

中子星的超子困惑 ?

...

Jaffe R. L., Phys. Rev. Lett. 38 (1977) 195

Yamamoto T. O., et al., Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 222501

Lonardonì D., et al., Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 092301



● 超子-核子散射实验

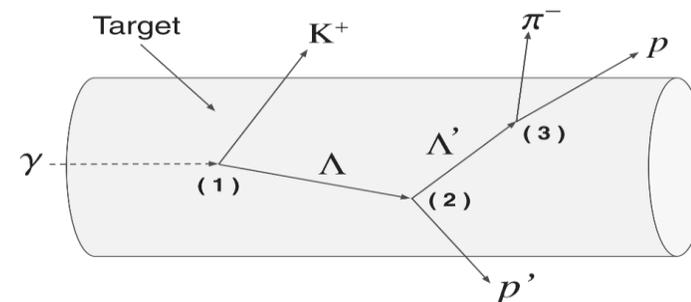
- $S=-1$ ($\Lambda N, \Sigma N$) : 少量散射数据, 且精度有限

*Engelmann R., et al., Phys. Lett. 21 (1966) 587; Alexander G., et al., Phys. Rev. 173 (1968) 1452
Sechi-Zorn B., et al., Phys. Rev. 175 (1968) 1735; Eisele F., et al., Phys. Lett. 37B (1971) 204
Hepp V. and Schleich H., Z. Phys. 214 (1968) 71*

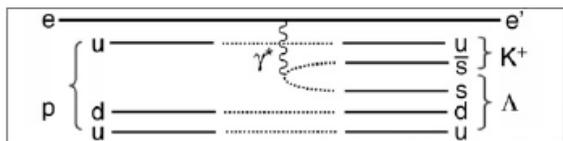
- $S=-2$ ($\Lambda\Lambda, \Lambda\Sigma, \Sigma\Sigma, \Xi N$) : 实验数据匮乏, 且仅为定性结果

Ahn J. K. et al., Phys. Lett. B 633 (2006) 214

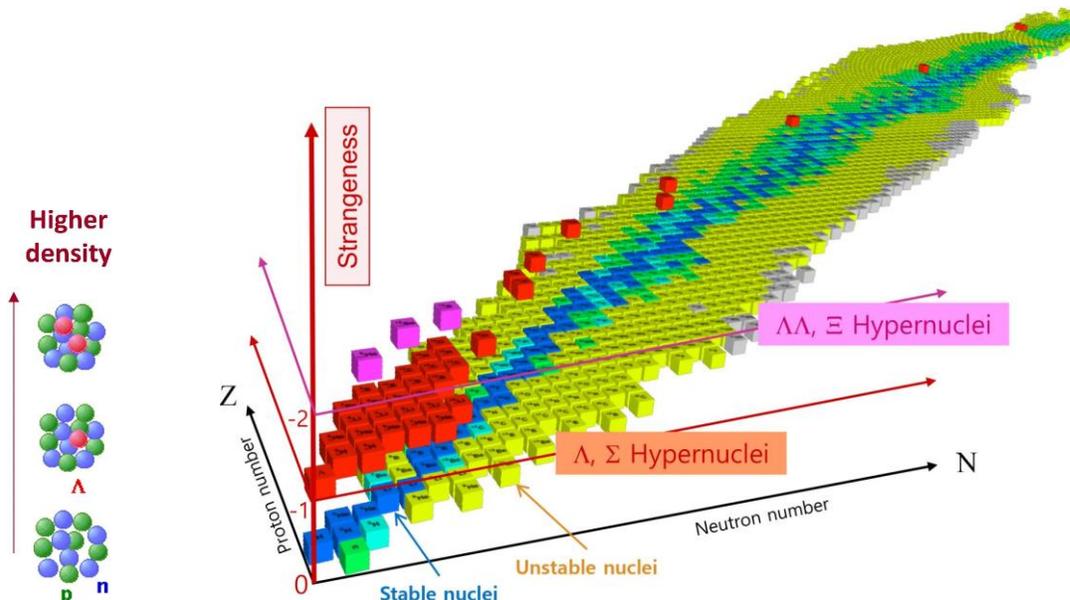
- $S=-3, -4$ ($\Xi\Lambda, \Xi\Sigma, \Xi\Xi$) : 暂无实验信息



● 超核性质测量实验



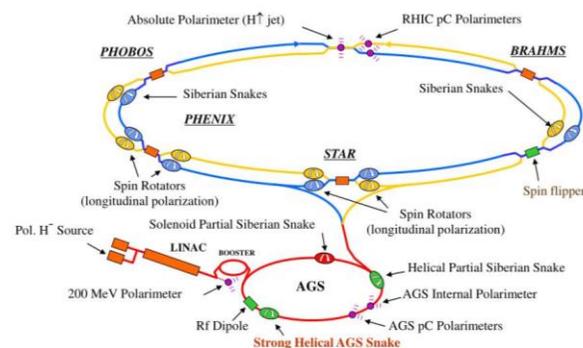
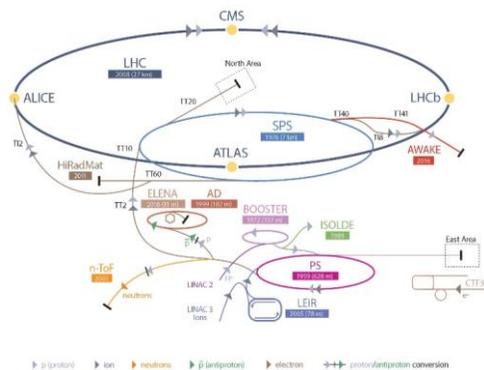
- (K^-, π) KEK, BNL, CERN
- (π^+, K^+) KEK, BNL
- ($e, e'K^+$) JLab
- (γ, K^+) JLab
- anti-hypernuclei HIC



实验现状：两粒子动量关联函数



“十二五”国家重大科技基础设施



$K_S^0 K^\pm$

$K^\pm p$

$K^- p$

ϕp

$\bar{p} \bar{p}$

Λ

$\Xi^- p$

$\Omega^- p$

$K^- d$

$\Sigma^0 p$

$\Lambda \Xi$

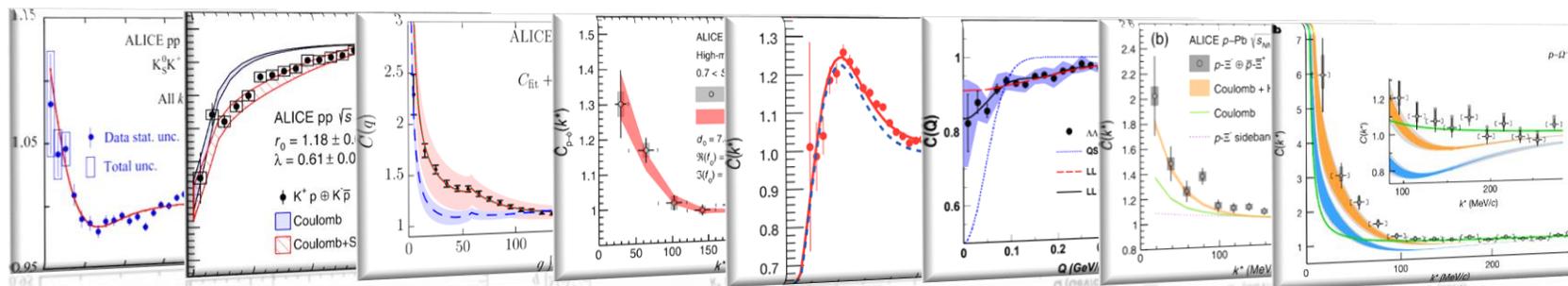
$\Xi \Xi$

$\Omega \Omega$

$p D$

ppp

$pp\Lambda$



ALICE Collaboration, *Phys. Lett. B* **790** (2019) 22

ALICE Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **124** (2020) 092301

Y. Kamiya and et al., *Phys. Rev. Lett.* **124** (2020) 132501

ALICE Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **127** (2021) 172301

STAR Collaboration, *Nature* **527** (2015) 345

STAR Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **114** (2015) 022301

ALICE Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **123** (2019) 112002

ALICE Collaboration, *Nature* **588** (2020) 232

L. Fabbietti, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **71** (2021) 377

理论现状：唯象模型与格点QCD模拟



● 唯象模型

- Nijmegen 介子交换模型
- Bonn-Jülich 介子交换模型
- Beijing-Tübingen 夸克模型
- 夸克去定域色屏蔽模型
- Kyoto-Niigata SU(6) 夸克集团模型

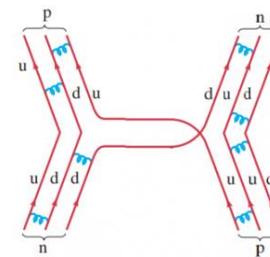
Rijken T. A. et al., Phys. Rev. C, 59 (1999) 21

Haidenbauer J. et al., Phys. Rev. C, 72 (2005) 044005

Straub U. et al., Nucl. Phys. A, 483 (1988) 686
Zhang Z. Y. et al., Nucl. Phys. A, 578 (1994) 573

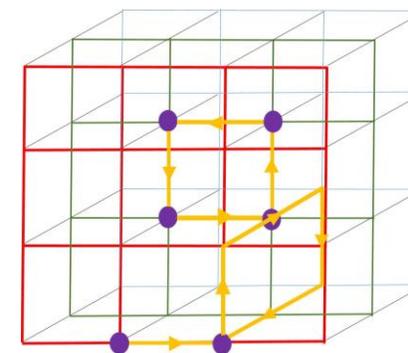
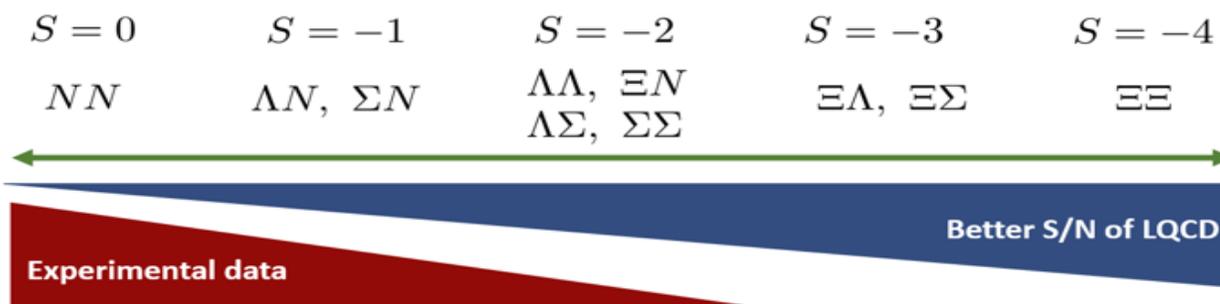
Ping J. L. et al., Nucl. Phys. A, 657 (1999) 95

Fujiwara Y. et al., Phys. Rev. Lett., 76 (1996) 2242



● 格点QCD模拟

- 将四维时空离散化，利用蒙特卡洛重点采样技术计算路径积分，从而数值求解非微扰强相互作用





理论现状：手征有效场论

● 有效场论

- 低能相互作用并不依赖于高能物理的细节

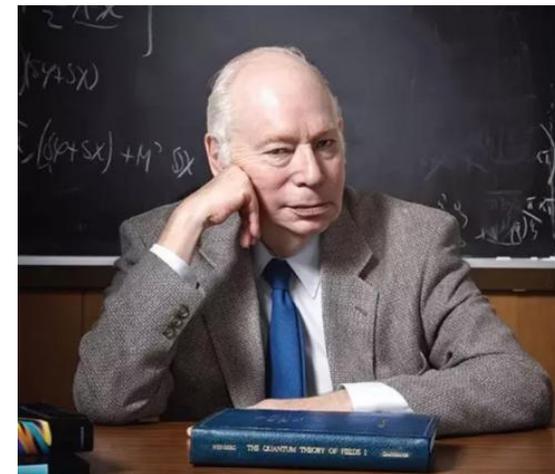
$$Q/\Lambda \ll 1$$

- 硬尺度 Λ

- 软尺度 Q

● 手征有效场论的优势

- 更紧密地联系QCD理论
- 系统地加以改进、并定量地估计理论误差
- 自洽地描述三核子、四核子相互作用



Steven Weinberg
1979年·物理学诺贝尔奖

Phys. Lett. B 251 (1990) 288

Nuclear forces from chiral lagrangians

Steven Weinberg¹

Theory Group, Department of Physics, University of Texas, Austin, TX 78712, USA

Received 14 August 1990

Nucl. Phys. B 363 (1991) 3

EFFECTIVE CHIRAL LAGRANGIANS FOR NUCLEON-PION INTERACTIONS AND NUCLEAR FORCES

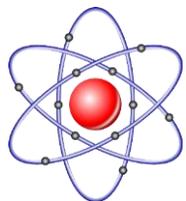
Steven WEINBERG*

Theory Group, Department of Physics, University of Texas, Austin, TX 78712, USA

Received 2 April 1991

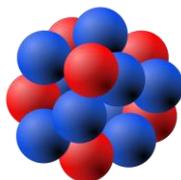


● 相对论效应 (动力学 + 运动学) 的重要性和迫切性



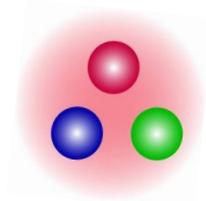
原子系统
 $\sim 10^{-8}\text{cm}$

- ✓ 液态的水银
- ✓ 黄色的金子
- ...



原子核系统
 $\sim 10^{-12}\text{cm}$

- ✓ 自然包含自旋轨道相互作用
- ✓ 微观解释赝自旋对称性
- ✓ 自治处理平均场的奇时间部分
- ✓ 更紧密地联系QCD
- ✓ 自治给出核物质的饱和性质
- ✓ 协变性约束自由参数的个数
- ...



单重子系统
 $\sim 10^{-13}\text{cm}$

- ✓ 提供更好的收敛性质
- ✓ 更好地描述实验/格点数据
- ...

- ✓ 相对论量子多体方法的发展 (Dirac-Brueckner-Hartree-Fock method)

研究动机

基于协变手征有效场论 **构建超子-核子、超子-超子相互作用**，
利用动量关联函数方法 **检验所构建相互作用的可靠性**。



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

目录

1. 研究背景

- 研究意义
- 实验现状
- 理论现状

2. 重子-重子相互作用

- 协变手征有效场论
- 超子-核子、超子-超子相互作用
- 相互作用随奇异数的演化

3. 重子-重子动量关联函数

- 动量关联函数的分析方法
- 超子-核子、超子-超子动量关联函数
- $SU(3)$ 对称性及其破缺的检验

4. 总结与展望

德才兼备

知行合一

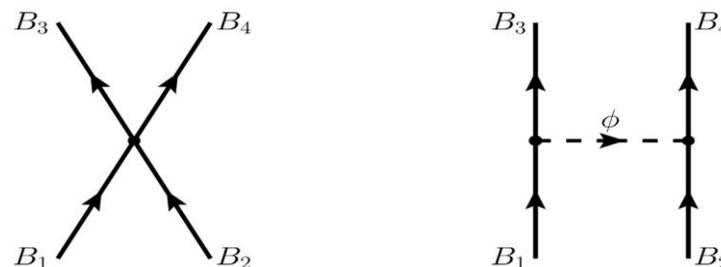
协变手征有效场论

● 领头阶重子-重子协变手征势

X. L. Ren, K. W. Li, L. S. Geng and et al., Chin. Phys. C 42 (2018) 014103
K. W. Li, X. L. Ren, L. S. Geng, Chin. Phys. C 42 (2018) 014105

$$V_{\text{LO}} = V_{\text{CT}} + V_{\text{OPME}}$$

(无偏导)



● 动量空间中的接触项势场

$$V_{\text{CT}}^{YY'} = C_i^{YY'} (\bar{u}_3 \Gamma_i u_1) (\bar{u}_4 \Gamma_i u_2)$$

八重态双重子系统：领头阶总共15个低能量参数

- Clifford 代数 $\Gamma_S = 1, \Gamma_V = \gamma^\mu, \Gamma_T = \sigma^{\mu\nu}, \Gamma_{AV} = \gamma^\mu \gamma_5, \Gamma_A = \gamma_5$
- 重子旋量 (协变性要求保留小分量)

$$u_B(\mathbf{p}, s) = \sqrt{\frac{E_p + M_B}{2M_B}} \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}}{E_p + M_B} \end{pmatrix} \chi_s$$

$$u_B(\mathbf{p}, s) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \chi_s$$



协变手征有效场论

● 动量空间中的接触项势场 (分波分解后)

$$V_{CT}^{YY'}(^1S_0) = \xi_B \left[C_{1S0}^{YY'} (1 + R_p^2 R_{p'}^2) + \hat{C}_{1S0}^{YY'} (R_p^2 + R_{p'}^2) \right]$$

$$V_{CT}^{YY'}(^3S_1) = \xi_B \left[\frac{1}{9} C_{3S1}^{YY'} (9 + R_p^2 R_{p'}^2) + \frac{1}{3} \hat{C}_{3S1}^{YY'} (R_p^2 + R_{p'}^2) \right]$$

$$V_{CT}^{YY'}(^3P_0) = \xi_B \left[-2C_{3P0}^{YY'} R_p R_{p'} \right]$$

$$V_{CT}^{YY'}(^3P_1) = \xi_B \left[-\frac{4}{3} (C_{1S0}^{YY'} - \hat{C}_{1S0}^{YY'}) R_p R_{p'} \right]$$

$$V_{CT}^{YY'}(^1P_1) = \xi_B \left[-\frac{2}{3} (C_{3S1}^{YY'} - \hat{C}_{3S1}^{YY'}) R_p R_{p'} \right]$$

$$V_{CT}^{YY'}(^3D_1) = \xi_B \left[\frac{8}{9} C_{3S1}^{YY'} R_p^2 R_{p'}^2 \right]$$

$$V_{CT}^{YY'}(^3SD_1) = \xi_B \left[\frac{2\sqrt{2}}{9} C_{3S1}^{YY'} R_p^2 R_{p'}^2 + \frac{2\sqrt{2}}{3} \hat{C}_{3S1}^{YY'} R_p^2 \right]$$

$$C_{1S0}^{YY'} = C_S^{YY'} + C_V^{YY'} + 3C_{AV}^{YY'} - 6C_T^{YY'}$$

$$\hat{C}_{1S0}^{YY'} = 3C_V^{YY'} + C_A^{YY'} + C_{AV}^{YY'} - 6C_T^{YY'}$$

$$C_{3S1}^{YY'} = C_S^{YY'} + C_V^{YY'} - C_{AV}^{YY'} + 2C_T^{YY'}$$

$$\hat{C}_{3S1}^{YY'} = 3(C_V^{YY'} - C_A^{YY'} - C_{AV}^{YY'} - 2C_T^{YY'})$$

$$C_{3P0}^{YY'} = C_S - 4C_V + C_A - 4C_{AV} - 12C_T$$

$$R_p = |\mathbf{p}| / (E_p + M_B)$$

$$R_{p'} = |\mathbf{p}'| / (E_{p'} + M_B)$$

$$\xi_B = N_p^2 N_{p'}^2$$

领头阶相对论

1

$\sigma_1 \cdot \sigma_2$

$\frac{i}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) \cdot (\mathbf{k} \times \mathbf{q})$

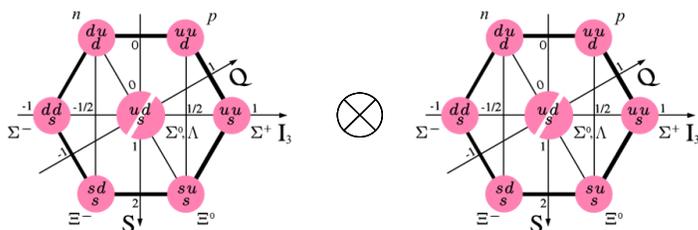
$(\sigma_1 \cdot \mathbf{q})(\sigma_2 \cdot \mathbf{q}), (\sigma_1 \cdot \mathbf{k})(\sigma_2 \cdot \mathbf{k})$

$\sigma_1 \cdot (\mathbf{q} \times \mathbf{k}) \sigma_2 \cdot (\mathbf{q} \times \mathbf{k})$

领头阶非相对论



● 接触项势场的SU(3)关系



$$8 \otimes 8 = 1 \oplus 27 \oplus 8_s \oplus 8_a \oplus 10 \oplus 10^*$$

味道对称

味道反对称

- 散射实验覆盖区域
- 格点QCD模拟覆盖区域
- “27”不可约表示部分

Channel	I	V(ξ)	
		ξ = ¹ S ₀ , ³ P ₀ , ³ P ₁	ξ = ¹ P ₁ , ³ S ₁ , ³ S ₁ - ³ D ₁ , ³ D ₁
S = 0	NN → NN	0	-
	NN → NN	1	V _ξ ²⁷
S = -1	ΛN → ΛN	1/2	1/10(9V _ξ ²⁷ + V _ξ ^{8_s})
	ΛN → ΣN	1/2	3/10(V _ξ ²⁷ - V _ξ ^{8_s})
	ΣN → ΣN	1/2	1/10(V _ξ ²⁷ + 9V _ξ ^{8_s})
	ΣN → ΣN	3/2	V _ξ ²⁷
S = -2	ΛΛ → ΛΛ	0	1/40(27V _ξ ²⁷ + 8V _ξ ^{8_s} + 5V _ξ ¹)
	ΛΛ → ΞN	0	1/40(-18V _ξ ²⁷ + 8V _ξ ^{8_s} + 10V _ξ ¹)
	ΛΛ → ΣΣ	0	√3/40(-3V _ξ ²⁷ + 8V _ξ ^{8_s} - 5V _ξ ¹)
	ΞN → ΞN	0	1/40(12V _ξ ²⁷ + 8V _ξ ^{8_s} + 20V _ξ ¹)
	ΞN → ΣΣ	0	√3/40(2V _ξ ²⁷ + 8V _ξ ^{8_s} - 10V _ξ ¹)
	ΣΣ → ΣΣ	0	1/40(V _ξ ²⁷ + 24V _ξ ^{8_s} + 15V _ξ ¹)
	ΞN → ΞN	1	1/5(2V _ξ ²⁷ + 3V _ξ ^{8_s})
	ΞN → ΣΛ	1	√6/5(-V _ξ ²⁷ + V _ξ ^{8_s})
	ΞN → ΣΣ	1	-
	ΣΛ → ΣΛ	1	1/5(3V _ξ ²⁷ + 2V _ξ ^{8_s})
	ΣΛ → ΣΣ	1	-
	ΣΣ → ΣΣ	1	-
S = -3	ΞΛ → ΞΛ	1/2	1/10(9V _ξ ²⁷ + V _ξ ^{8_s})
	ΞΛ → ΞΣ	1/2	3/10(V _ξ ²⁷ - V _ξ ^{8_s})
	ΞΣ → ΞΣ	1/2	1/10(V _ξ ²⁷ + 9V _ξ ^{8_s})
	ΞΣ → ΞΣ	3/2	V _ξ ²⁷
S = -4	ΞΞ → ΞΞ	0	-
	ΞΞ → ΞΞ	1	V _ξ ²⁷



协变手征有效场论

● 动量空间中的单赝标介子交换势场

$$V_{\text{OPME}} = -f_{B_1 B_3 \phi} f_{B_2 B_4 \phi} \frac{(\bar{u}_3 \gamma^\mu \gamma_5 q_\mu u_1) (\bar{u}_4 \gamma^\nu \gamma_5 q_\nu u_2)}{(\Delta E)^2 - q^2 - m_\phi^2 + i\epsilon} \mathcal{I}_{B_1 B_2 \rightarrow B_3 B_4}$$

延迟效应
同位旋因子

➤ 交换势SU(3) 系数

$$f_{NN\pi} = f, \quad f_{NN\eta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(4\alpha - 1)f, \quad f_{\Lambda NK} = -\frac{1}{\sqrt{3}}(1 + 2\alpha)f,$$

$$f_{\Lambda\Sigma\pi} = \frac{2}{\sqrt{3}}(1 - \alpha)f, \quad f_{\Lambda\Lambda\eta} = -\frac{2}{\sqrt{3}}(1 - \alpha)f, \quad f_{\Sigma NK} = (1 - 2\alpha)f,$$

$$f_{\Sigma\Sigma\pi} = 2\alpha f, \quad f_{\Sigma\Sigma\eta} = \frac{2}{\sqrt{3}}(1 - \alpha)f, \quad f_{\Xi\Lambda K} = \frac{1}{\sqrt{3}}(4\alpha - 1)f,$$

$$f_{\Xi\Xi\pi} = -(1 - 2\alpha)f, \quad f_{\Xi\Xi\eta} = -\frac{1}{\sqrt{3}}(1 + 2\alpha)f, \quad f_{\Xi\Sigma K} = -f.$$

$$\alpha = F/(F + D), \quad f = g_A/(2F_\pi)$$

轴矢量强度 $g_A = 1.26$; π 介子衰变常数 $f_\pi = 92.2 \text{ MeV}$; 比率 $\alpha = 0.4$

交换介子质量的不同导致SU(3)味道对称性破缺。



协变手征有效场论

● 散射方程（非微扰计算）

- 耦合道形式的Kadyshevsky方程（相对论Bethe-Salpeter方程的三维约化形式）

V. G. Kadyshevsky, Nucl. Phys. B 6 (1968) 125

$$T_{\rho\rho'}^{\nu\nu',J}(\mathbf{p}', \mathbf{p}; \sqrt{s}) = V_{\rho\rho'}^{\nu\nu',J}(\mathbf{p}', \mathbf{p}) + \sum_{\rho'', \nu''} \int_0^\infty \frac{dp'' p''^2}{(2\pi)^3} \frac{M_{B_{1,\nu''}} M_{B_{2,\nu''}} V_{\rho\rho''}^{\nu\nu'',J}(\mathbf{p}', \mathbf{p}'') T_{\rho''\rho'}^{\nu''\nu',J}(\mathbf{p}'', \mathbf{p}; \sqrt{s})}{E_{1,\nu''} E_{2,\nu''} (\sqrt{s} - E_{1,\nu''} - E_{2,\nu''} + i\epsilon)}$$

ρ : partial wave ν : particle channel \sqrt{s} : center-of-mass total energy



- 形状因子 *E. Epelbaum, W. Glöckle, and U.-G. Meißner, Nucl. Phys. A 747 (2005) 362*

$$f_{\Lambda_F}(\mathbf{p}, \mathbf{p}') = \exp \left[- \left(\frac{\mathbf{p}}{\Lambda_F} \right)^4 - \left(\frac{\mathbf{p}'}{\Lambda_F} \right)^4 \right] \quad \Lambda_F = 550-700 \text{ MeV}$$



S=-1系统的相互作用

● 拟合 36 个超子-核子散射数据

$\Lambda p \rightarrow \Lambda p$		$\Lambda p \rightarrow \Lambda p$		$\Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$	
p_{lab}^{Λ}	σ_{exp}	p_{lab}^{Λ}	σ_{exp}	$p_{lab}^{\Sigma^-}$	σ_{exp}
135 ± 15	209 ± 58	145 ± 25	180 ± 22	110 ± 5	174 ± 47
165 ± 15	177 ± 38	185 ± 15	130 ± 17	120 ± 5	178 ± 39
195 ± 15	153 ± 27	210 ± 10	118 ± 16	130 ± 5	140 ± 28
225 ± 15	111 ± 18	230 ± 10	101 ± 12	140 ± 5	164 ± 25
255 ± 15	87 ± 13	250 ± 10	83 ± 13	150 ± 5	147 ± 19
300 ± 30	46 ± 11	290 ± 30	57 ± 9	160 ± 5	124 ± 14

$\Sigma^+ p \rightarrow \Sigma^+ p$		$\Sigma^- p \rightarrow \Sigma^- p$		$\Sigma^- p \rightarrow \Sigma^0 n$	
$p_{lab}^{\Sigma^+}$	σ_{exp}	$p_{lab}^{\Sigma^-}$	σ_{exp}	$p_{lab}^{\Sigma^-}$	σ_{exp}
145 ± 5	123 ± 62	135 ± 2.5	184 ± 52	110 ± 5	396 ± 91
155 ± 5	104 ± 30	142.5 ± 2.5	152 ± 38	120 ± 5	159 ± 43
165 ± 5	92 ± 18	147.5 ± 2.5	146 ± 30	130 ± 5	157 ± 34
175 ± 5	81 ± 12	152.5 ± 2.5	142 ± 25	140 ± 5	125 ± 25
		157.5 ± 2.5	164 ± 32	150 ± 5	111 ± 19
		162.5 ± 2.5	138 ± 19	160 ± 5	115 ± 16
		167.5 ± 2.5	113 ± 16		

$\Sigma^- p$ inelastic capture ratio at rest, $r_R = 0.468 \pm 0.010$

Lagrangian

symmetry

↓

Potential

LECs (unknown)

↓

Scattering Eq.

cut-off

Exp. data

$\sigma \dots$

↓

$\chi^2 = \sum_i \frac{[D_i(\text{Exp}) - D_i(\text{The})]^2}{\Delta_i^2}$

minimize

↑

Observable

$\delta, \sigma, a, r \dots$

● S=-1系统的低能量常数

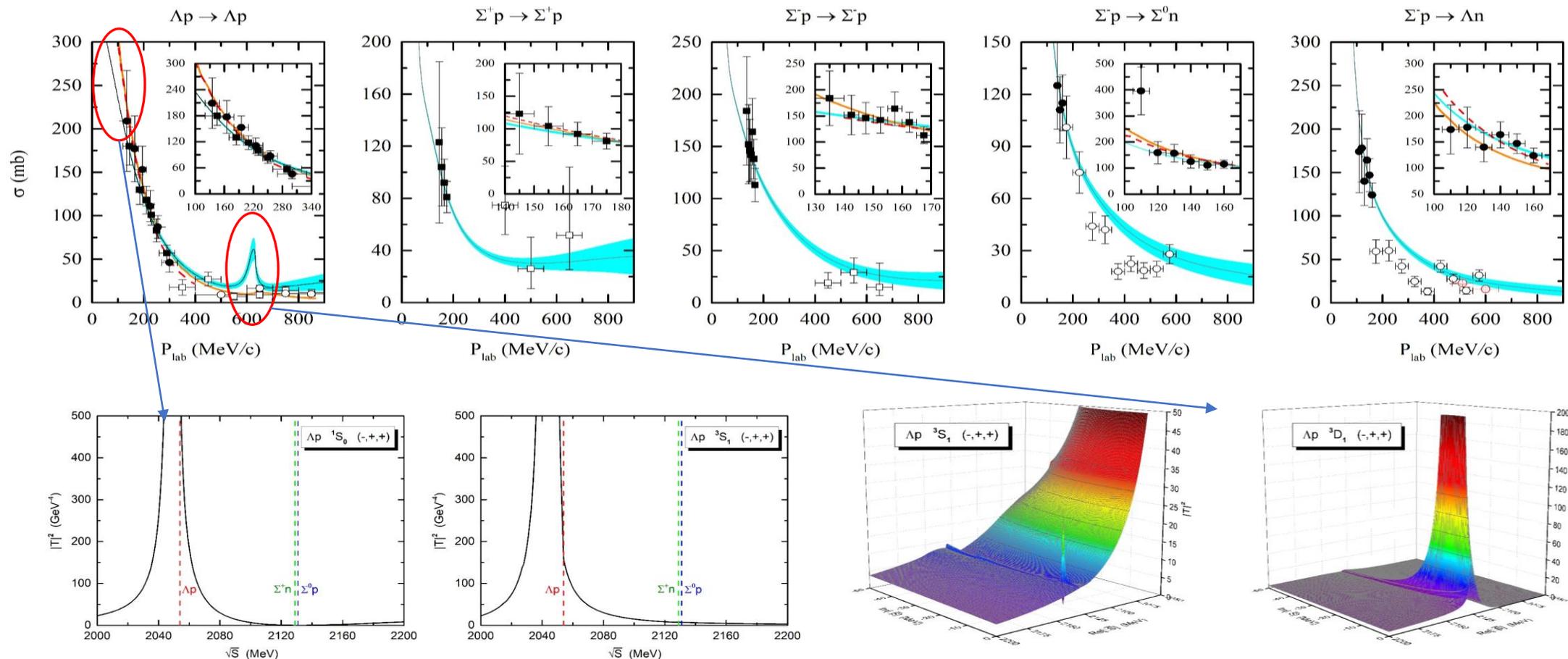
Z. W. Liu, J. Song, K. W. Li*, L. S. Geng*, *Physical Review C*, **103** (2021) 025201

Λ_F	$C_{1S0}^{\Lambda\Lambda}$	$C_{1S0}^{\Sigma\Sigma}$	$C_{3S1}^{\Lambda\Lambda}$	$C_{3S1}^{\Sigma\Sigma}$	$C_{3S1}^{\Lambda\Sigma}$	$\hat{C}_{1S0}^{\Lambda\Lambda}$	$\hat{C}_{1S0}^{\Sigma\Sigma}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Lambda\Lambda}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Sigma\Sigma}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Lambda\Sigma}$	$C_{3P0}^{\Lambda\Lambda}$	$C_{3P0}^{\Sigma\Sigma}$	$\chi^2/\text{d.o.f.}$
550	-0.0671	-0.0951	0.0244	0.0696	0.0528	3.0342	3.3680	1.0971	-0.2827	1.5582	-2.7564	-1.2394	<u>0.696</u>
600	-0.0553	-0.0801	0.0244	0.0839	0.0384	3.0928	3.4223	0.5519	-0.2351	1.2292	-2.7674	-1.3346	<u>0.677</u>
650	-0.0377	-0.0588	0.0255	0.0995	0.0254	3.1119	3.4313	0.1908	-0.2344	0.9751	-2.7698	-1.4623	<u>0.679</u>
700	-0.0126	-0.0296	0.0293	0.1163	0.0168	3.1250	3.4343	-0.0179	-0.2273	0.7962	-2.7703	-1.6516	<u>0.684</u>

S=-1系统的相互作用



J. Song, Z. W. Liu, K. W. Li, L. S. Geng*, Physical Review C, 105 (2022) 035203*



✓ 本工作构建的S=-1系统相互作用是可靠的，并且具有较好的外推性；在 Λp 阈下存在 1S_0 和 3S_1 的虚态；在 Λp 阈上存在 $^3S_1 - ^3D_1$ 共振态。

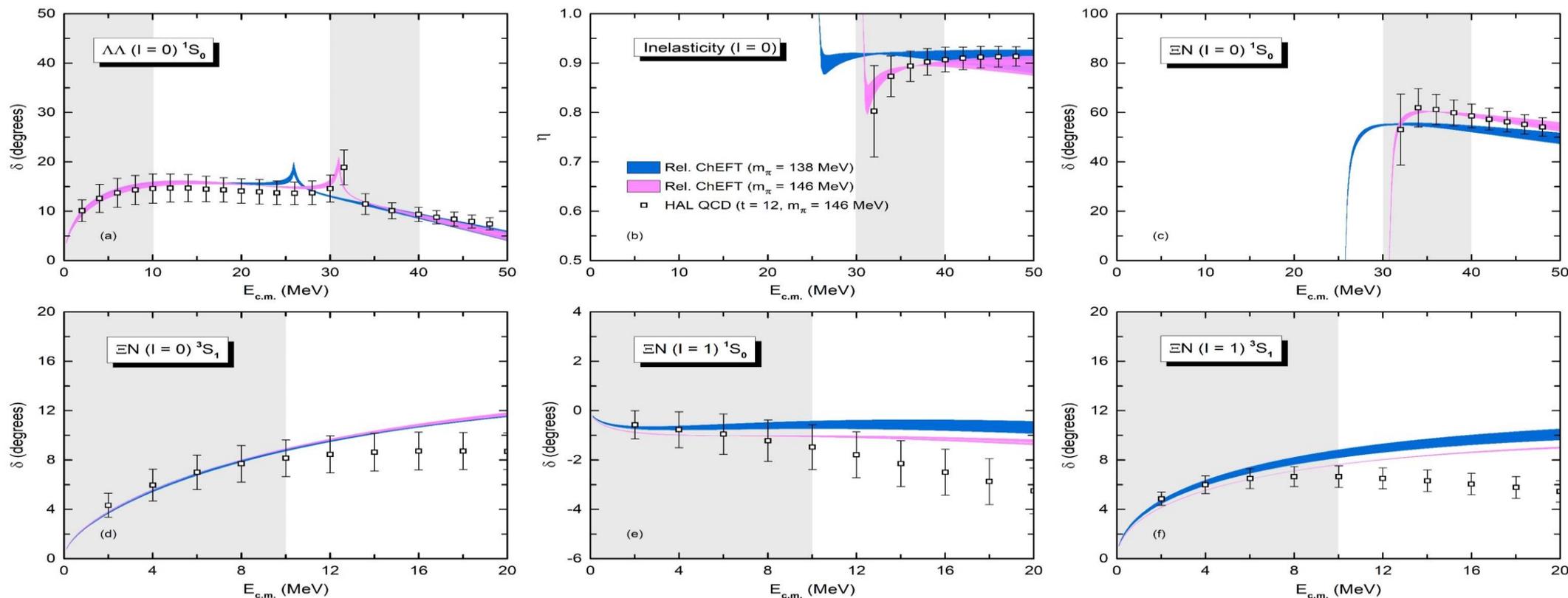
S=-2系统的相互作用



● 拟合最新格点QCD模拟结果



HAL QCD Collaboration, Nucl. Phys. A 998 (2020) 121737



Λ_F	$C_{1S0}^{\Lambda\Lambda}$	$C_{1S0}^{\Sigma\Sigma}$	$C_{3S1}^{\Lambda\Lambda}$	$C_{3S1}^{\Sigma\Sigma}$	$C_{3S1}^{\Lambda\Sigma}$	$C_{1S0}^{4\Lambda}$	$\hat{C}_{1S0}^{\Lambda\Lambda}$	$\hat{C}_{1S0}^{\Sigma\Sigma}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Lambda\Lambda}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Sigma\Sigma}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Lambda\Sigma}$	$\hat{C}_{1S0}^{4\Lambda}$
550	-0.0274	-0.0412	-0.0078	0.0255	0.0024	-0.0242	2.3493	2.5353	1.3695	1.0552	-0.0423	1.9485
600	-0.0175	-0.0300	-0.0076	0.0472	0.0026	-0.0176	2.0832	2.2246	1.0521	1.1759	0.0793	1.8207
650	-0.0049	-0.0169	-0.0070	0.0720	0.0026	-0.0075	1.9847	2.0755	0.8493	1.1768	0.0793	1.8207
700	0.0089	-0.0053	-0.0064	0.1049	0.0026	0.0066	1.8566	1.8869	0.7072	1.1768	0.0793	1.8206

$\chi^2/\text{d.o.f.}$

0.366

0.333

0.324

0.333

S=-3系统的相互作用

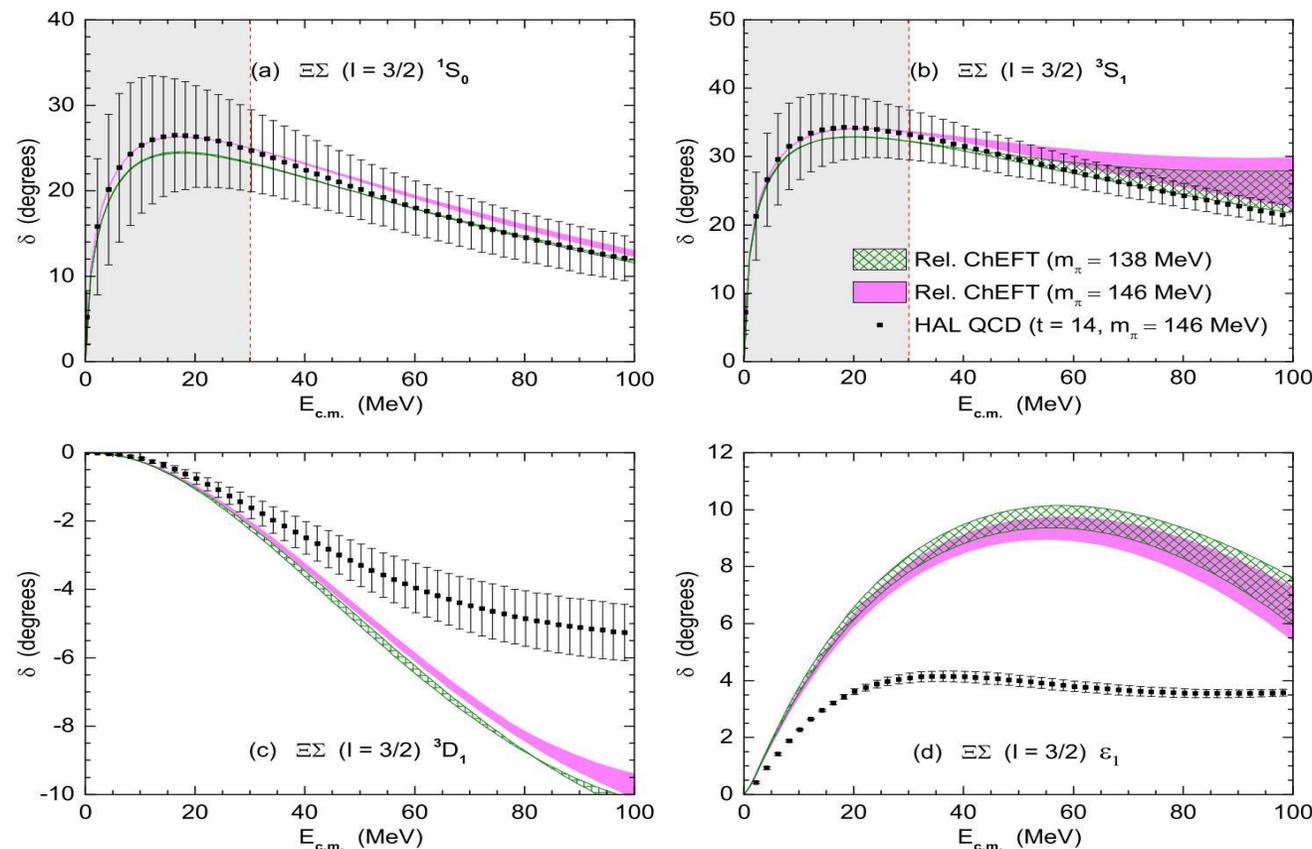


拟合格点QCD模拟结果

HAL QCD Collaboration, EPJ Web Conf. 175 (2018) 05013

$$V_{CT, I=3/2}^{\Xi\Sigma \rightarrow \Xi\Sigma}(^1S_0) = \xi_B \left[C_{1S0}^{\Sigma\Sigma} (1 + R_p^2 R_{p'}^2) + \hat{C}_{1S0}^{\Sigma\Sigma} (R_p^2 + R_{p'}^2) \right]$$

$$V_{CT, I=3/2}^{\Xi\Sigma \rightarrow \Xi\Sigma}(^3S_1) = \xi_B \left[\frac{1}{9} (C_{3S1}^{\Lambda\Lambda} + C_{3S1}^{\Lambda\Sigma}) (9 + R_p^2 R_{p'}^2) + \frac{1}{3} (\hat{C}_{3S1}^{\Lambda\Lambda} + \hat{C}_{3S1}^{\Lambda\Sigma}) (R_p^2 + R_{p'}^2) \right]$$



Λ_F	LECs ($S = -3$)				$\chi^2/\text{d.o.f.}$
	$C_{1S0}^{\Sigma\Sigma}$	$C_{3S1}^{\Lambda\Lambda} + C_{3S1}^{\Lambda\Sigma}$	$\hat{C}_{1S0}^{\Sigma\Sigma}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Lambda\Lambda} + \hat{C}_{3S1}^{\Lambda\Sigma}$	
550	-0.0349	-0.0315	-0.0875	-0.8322	0.002
600	-0.0348	-0.0294	-0.0677	-0.8514	0.003
650	-0.0347	-0.0278	-0.0555	-0.8855	0.003
700	-0.0347	-0.0267	-0.0474	-0.9126	0.004

- ✓ 协变手征有效场论可以非常好地描述格点QCD模拟的S-分波相移；
- ✓ 预测的D-分波相移以及混合角与格点QCD模拟结果定性一致；
- ✓ 外推至物理质量区的结果接近非物理质量区的结果。

Z. W. Liu, J. Song, K. W. Li*, L. S. Geng*,
Physical Review C, 103 (2021) 025201

S=-4系统的相互作用

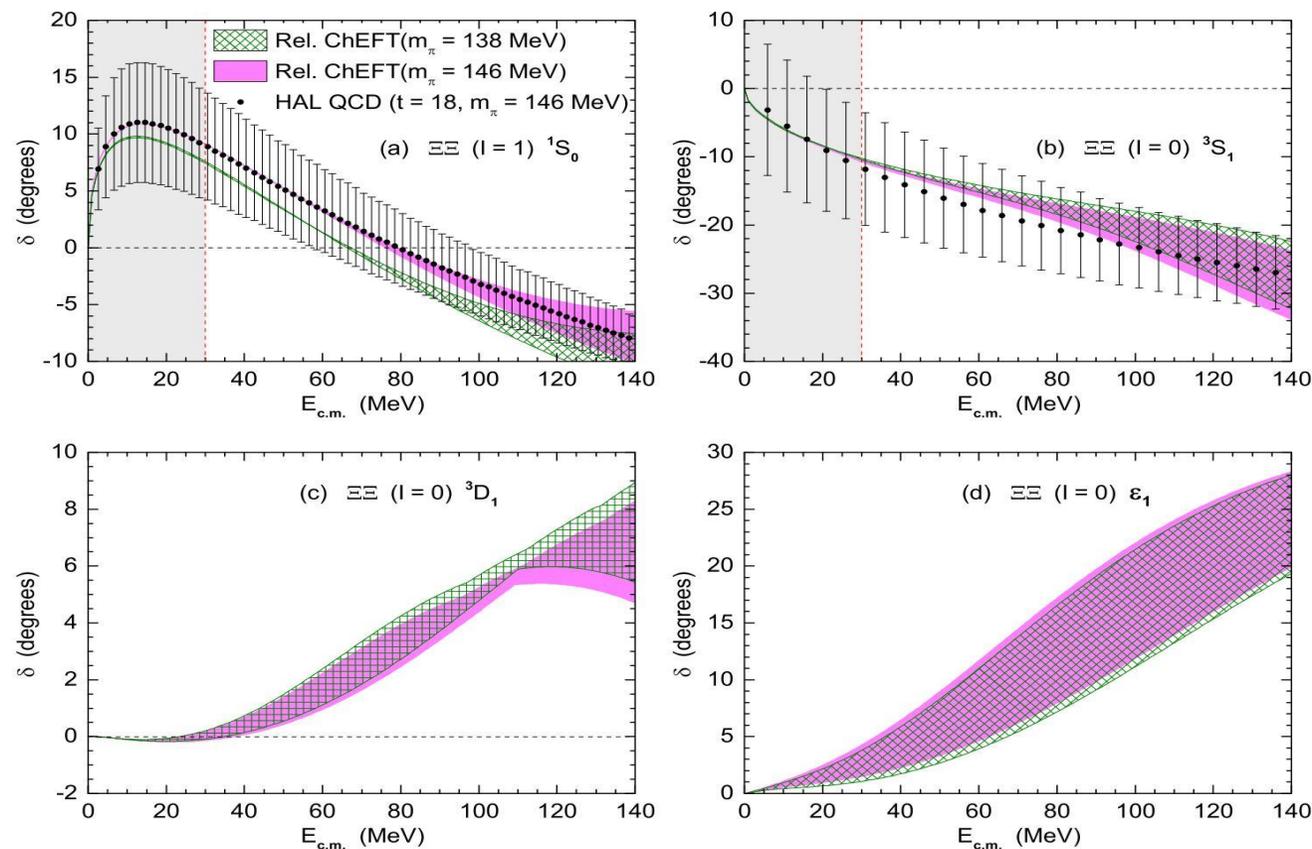


拟合格点QCD模拟结果

HAL QCD Collaboration, EPJ Web Conf. 175 (2018) 05009

$$V_{CT, I=1}^{\Xi\Xi \rightarrow \Xi\Xi}({}^1S_0) = \xi_B \left[C_{1S0}^{\Sigma\Sigma} (1 + R_p^2 R_{p'}^2) + \hat{C}_{1S0}^{\Sigma\Sigma} (R_p^2 + R_{p'}^2) \right]$$

$$V_{CT, I=0}^{\Xi\Xi \rightarrow \Xi\Xi}({}^3S_1) = \xi_B \left[\frac{1}{9} C_{3S1}^{\Sigma\Sigma} (9 + R_p^2 R_{p'}^2) + \frac{1}{3} \hat{C}_{3S1}^{\Sigma\Sigma} (R_p^2 + R_{p'}^2) \right]$$

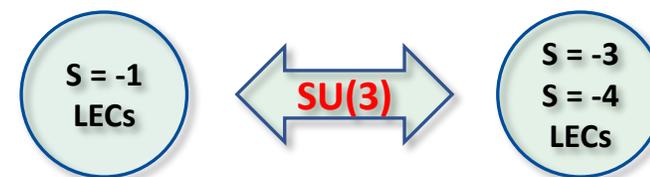
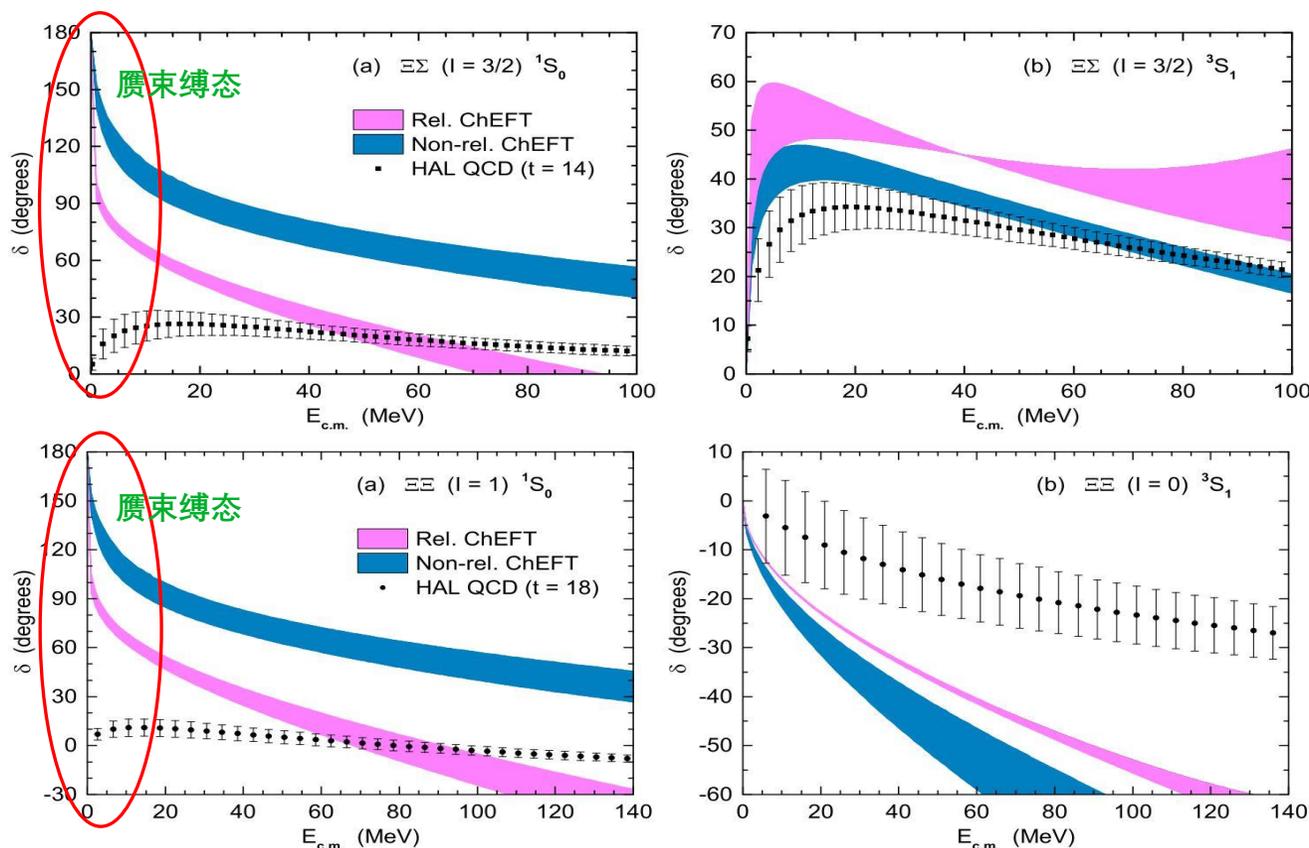


Λ_F	LECs ($S = -4$)				$\chi^2/\text{d.o.f.}$
	$C_{1S0}^{\Sigma\Sigma}$	$C_{3S1}^{\Sigma\Sigma}$	$\hat{C}_{1S0}^{\Sigma\Sigma}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Sigma\Sigma}$	
550	-0.0221	0.0195	-0.0356	1.3522	<u>0.003</u>
600	-0.0221	0.0193	-0.0267	1.1246	<u>0.003</u>
650	-0.0220	0.0193	-0.0197	0.9594	<u>0.004</u>
700	-0.0218	0.0191	-0.0140	0.8279	<u>0.004</u>

- ✓ 协变手征有效场论可以非常好地描述格点QCD模拟的S-分波相移;
- ✓ 预测的D-分波相移和混合角有待格点QCD模拟的进一步验证;
- ✓ 外推至物理质量区的结果接近非物理质量区的结果。

Z. W. Liu, J. Song, K. W. Li*, L. S. Geng*,
Physical Review C, 103 (2021) 025201

● SU(3)味道对称性破缺



$$-\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{2\mu_{B_1 B_2}}{\hbar^2} V_{B_1 B_2} u = k^2 u$$

$$V_{\Xi\Xi}^{1S0} = V_{\Xi\Sigma}^{1S0} = V_{\Sigma\Sigma}^{1S0} = V_{\Sigma N}^{1S0} = V_{NN}^{1S0}$$

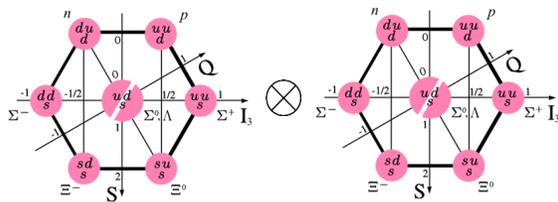
$$\frac{\mu_{\Xi\Xi}}{\mu_{NN}} \simeq 140\%, \quad \frac{\mu_{\Xi\Sigma}}{\mu_{NN}} \simeq 133\%$$

✓ 不同奇异数系统之间可能存在显著的SU(3)味道对称性破缺。

相互作用随奇异数的演化

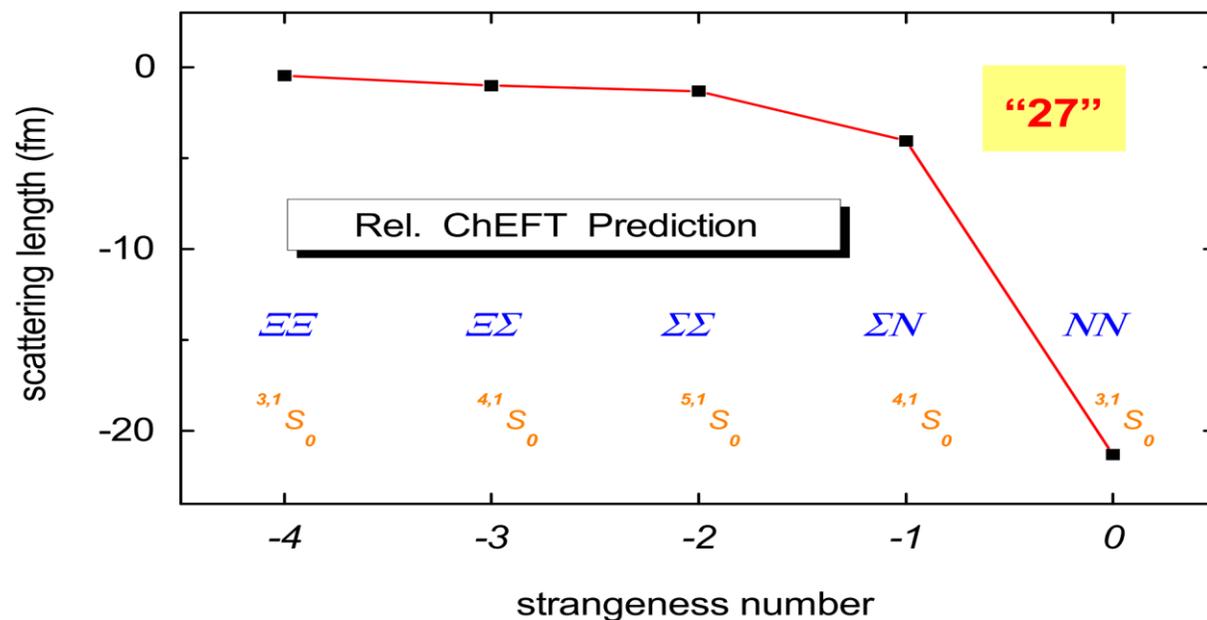


● 双重子系统中“27”不可约表示部分的散射长度



$$8 \otimes 8 = \boxed{1} \oplus 8_a \oplus 8_s \oplus 10 \oplus \boxed{10^*} \oplus \boxed{27}$$

H-双重子
NN (3S1)
NN (1S0); ΣN (1S0)
ΣΣ (1S0); ΞΣ (1S0)
ΞΞ (1S0)



SU(6)夸克集团、Nijmegen介子交换模型预言结果

Channel	a_s		
	fss2	NSC97a	NSC97f
NN	-23.76	-15.84	-14.49
ΣN	-2.51	-6.06	-6.16
ΣΣ	-85.30	10.19	6.98
ΞΣ	-4.63	4.13	2.32
ΞΞ	-1.43	17.55	2.38

✓ 在奇异数 $S = 0$ 到 $S = -2$ 区间内散射长度随 S 的减小而快速地增大，随后在 $S = -2$ 到 $S = -4$ 区间内缓慢地增大。



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

目录

1. 研究背景

- 研究意义
- 实验现状
- 理论现状

2. 重子-重子相互作用

- 协变手征有效场论
- 超子-核子、超子-超子相互作用
- 相互作用随奇异数的演化

3. 重子-重子动量关联函数

- 动量关联函数的分析方法
- 超子-核子、超子-超子动量关联函数
- SU(3)对称性及其破缺的检验

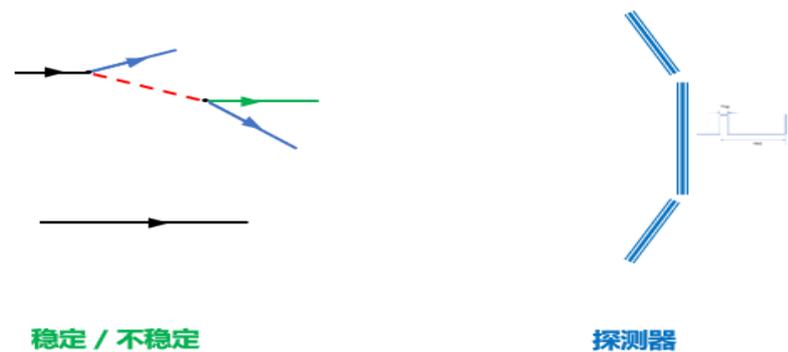
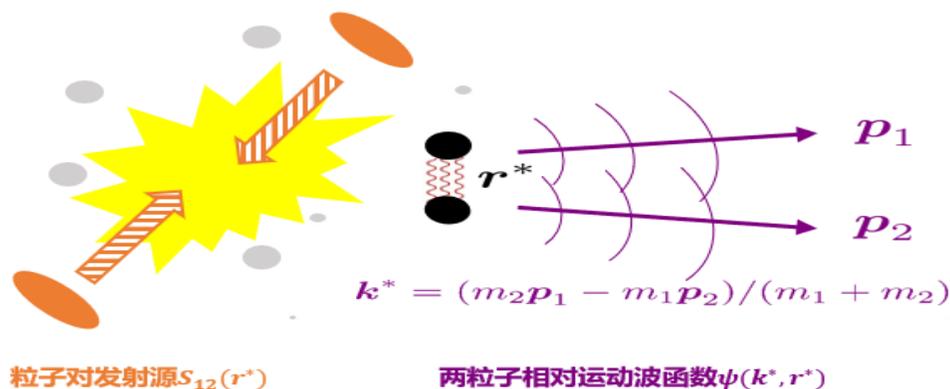
4. 总结与展望

德才兼备

知行合一

动量关联函数——动量空间中两粒子的强度干涉

$$C(p_1, p_2) = \frac{P(p_1, p_2)}{P(p_1) \cdot P(p_2)}$$



理论描述

Koonin-Pratt 公式

$$C(k) = \int S_{12}(r) |\psi(k, r)|^2 d\mathbf{r} = \xi(k) \frac{N_{\text{same}}(k)}{N_{\text{mixed}}(k)}$$

发射源空间结构

末态相互作用 (强+电磁)

量子统计效应

耦合道效应

实验测量

混合事件技术

>1 存在吸引相互作用

=1 不存在相互作用

<1 存在排斥相互作用

来自同一事件或混合事件构成的粒子对样本数

实验效应 (动量分辨率、探测效率等) 的修正

动量关联函数的分析方法



- Koonin-Pratt 公式

$$C(k) = \int S_{12}(r) |\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{k})|^2 d\mathbf{r}$$

- 两体相对运动波函数 (仅考虑S-波相互作用修正)

$$\Psi(\mathbf{r}, \mathbf{k}) = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} - j_0(kr) + \psi_0(r, k), \quad \psi_0(r, k) \xrightarrow{r \rightarrow \infty} \frac{1}{2ikr} [e^{ikr} - e^{-2i\delta} e^{-ikr}]$$

- 非全同中性费米子系统的动量关联函数

$$C(k) \simeq 1 + \int_0^\infty 4\pi r^2 dr S_{12}(r) [|\psi_0(r, k)|^2 - |j_0(kr)|^2]$$

S. E. Koonin, Phys. Lett. B 70 (1) (1977) 43
A. Ohnishi, Nucl. Phys. A 954 (2016) 294

- 两体散射波函数

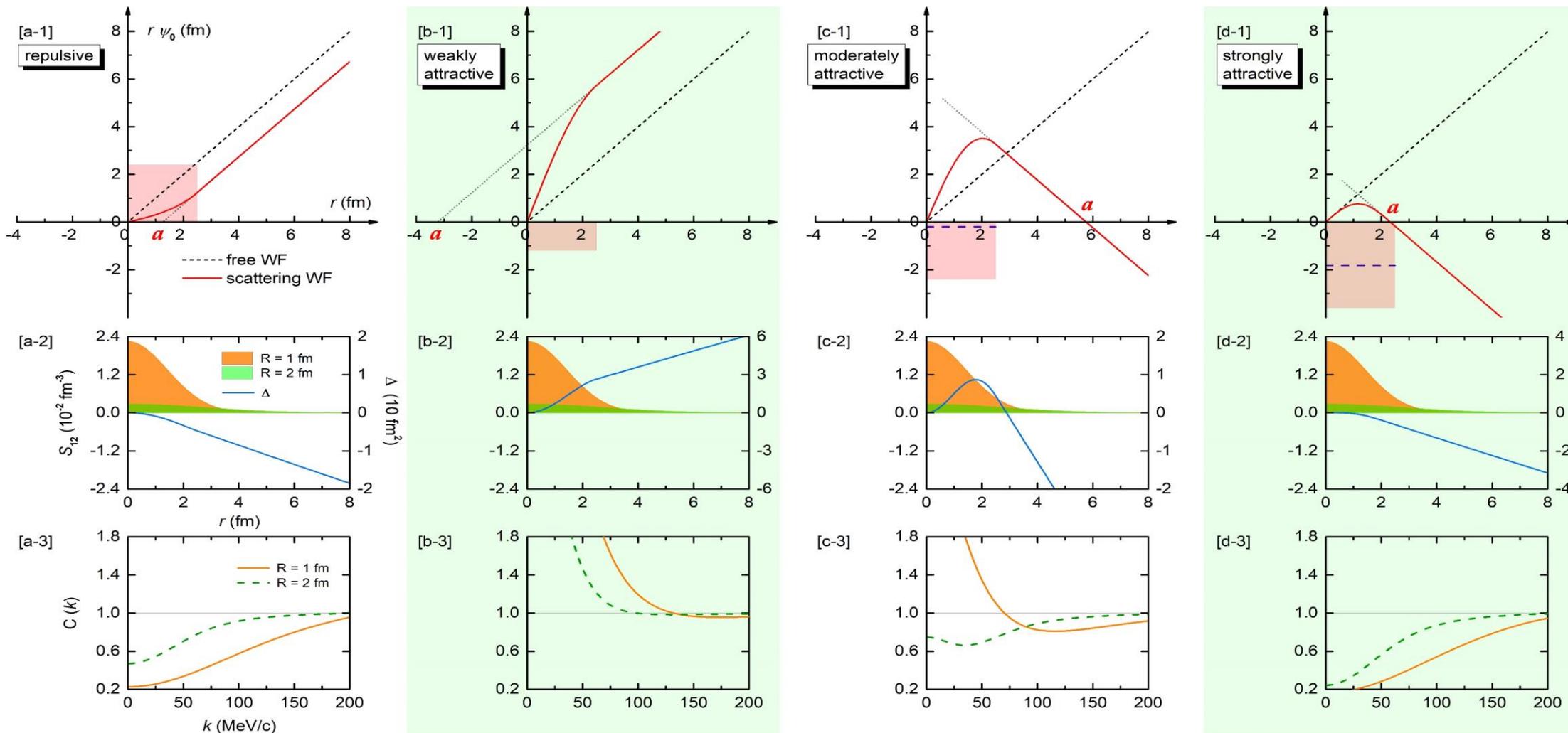
- 坐标空间：求解Schrödinger方程

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 \psi + V\psi = E\psi$$

- 动量空间：求解Lippmann-Schwinger方程获得反应振幅T-矩阵，再由 $|\psi\rangle = |\phi\rangle + G_0 T |\phi\rangle$ 计算波函数

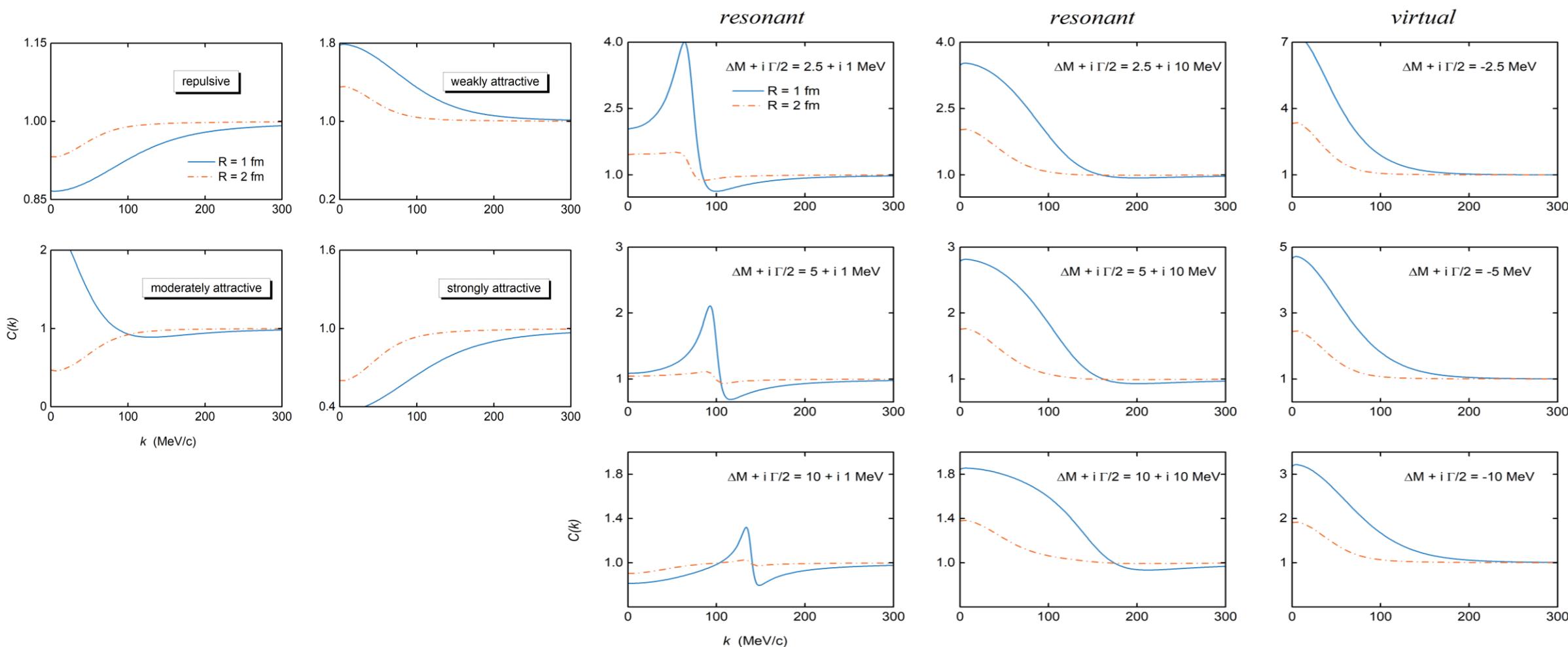
$$\psi_{\beta\alpha;l}(r) = \delta_{\beta\alpha} j_l(k_\alpha r) + \frac{1}{\pi} \int dq q^2 \frac{1}{\sqrt{s} - E_{\beta,1}(q) - E_{\beta,2}(q) + i\varepsilon} \cdot T_{\beta\alpha;l}(q, k_\alpha; \sqrt{s}) \cdot j_l(qr)$$

● 基于坐标空间的方势阱/垒模型：两粒子动量关联函数的一般性特征





● 基于动量空间的参数化势模型：两粒子动量关联函数的一般性特征



$\Lambda\Lambda$ 动量关联函数

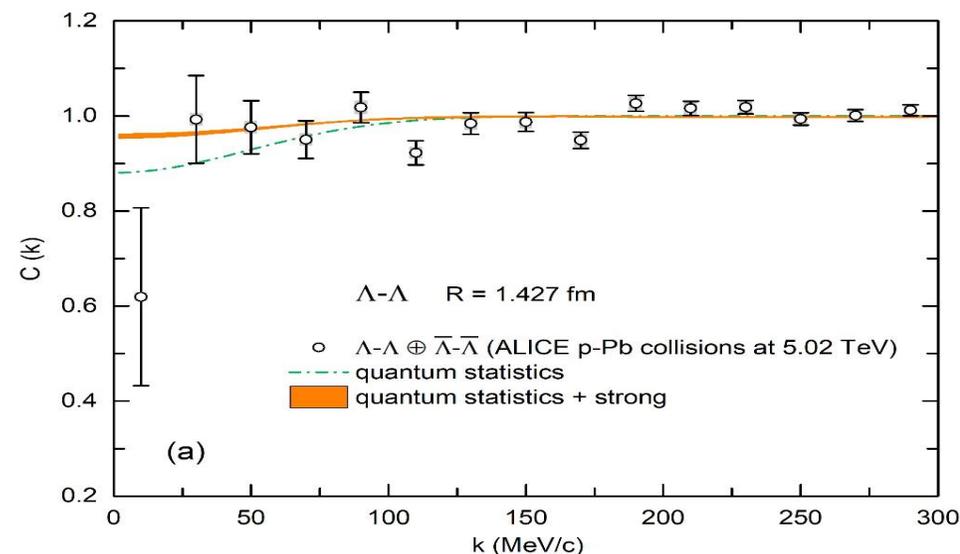
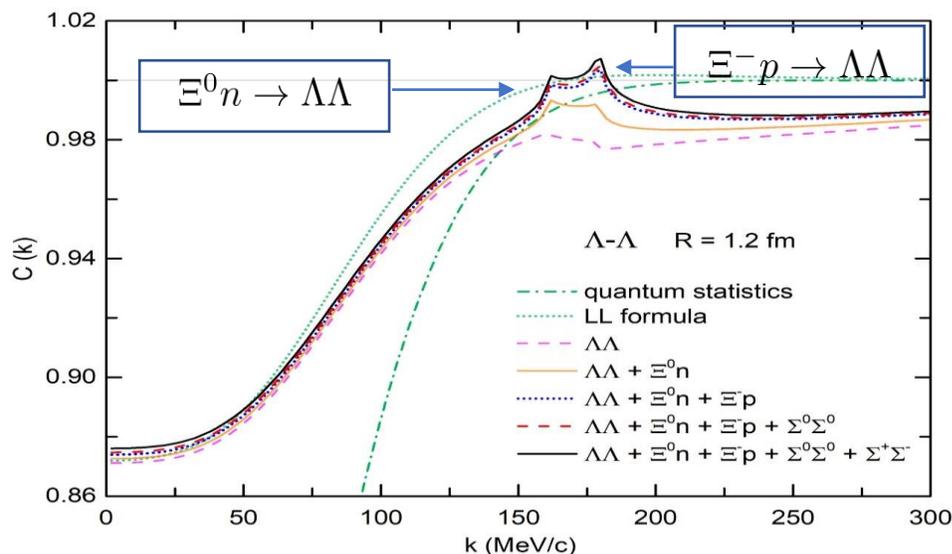


● 全同中性费米子系统 — $\Lambda\Lambda$ 的动量关联函数

Z. W. Liu, K. W. Li*, L. S. Geng*, Chinese Physics C 47 (2023) 024108

$$\Psi_{S,E}^{(-)}(\mathbf{r}, \mathbf{k}) = \frac{\Psi_S^{(-)}(\mathbf{r}, \mathbf{k}) + \Psi_S^{(-)}(-\mathbf{r}, \mathbf{k})}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} [\cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) - j_0(kr) + \psi_0(r, k)],$$

$$\Psi_{S,O}^{(-)}(\mathbf{r}, \mathbf{k}) = \frac{\Psi_S^{(-)}(\mathbf{r}, \mathbf{k}) - \Psi_S^{(-)}(-\mathbf{r}, \mathbf{k})}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}i \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}).$$



✓ 协变手征 $\Lambda\Lambda$ 相互作用是可靠的，实验测量精度有待进一步的提高。

Ξ^-p 动量关联函数



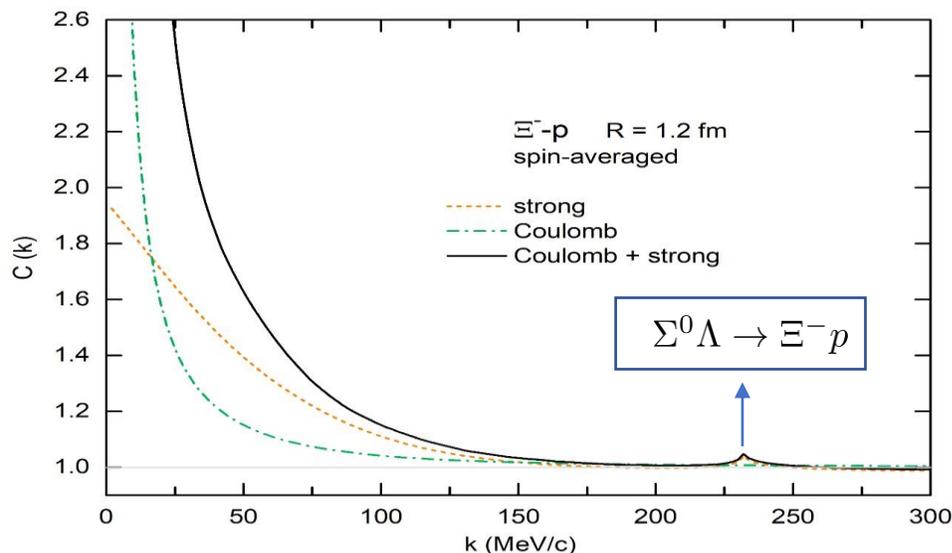
● 非全同带电费米子系统 — Ξ^-p 的动量关联函数

$$\Psi_{SC}^{(-)}(\mathbf{r}, \mathbf{k}) = \phi^C(\mathbf{r}, \mathbf{k}) - \phi_0^C(kr) + \psi^{SC}(\mathbf{r}, \mathbf{k}),$$

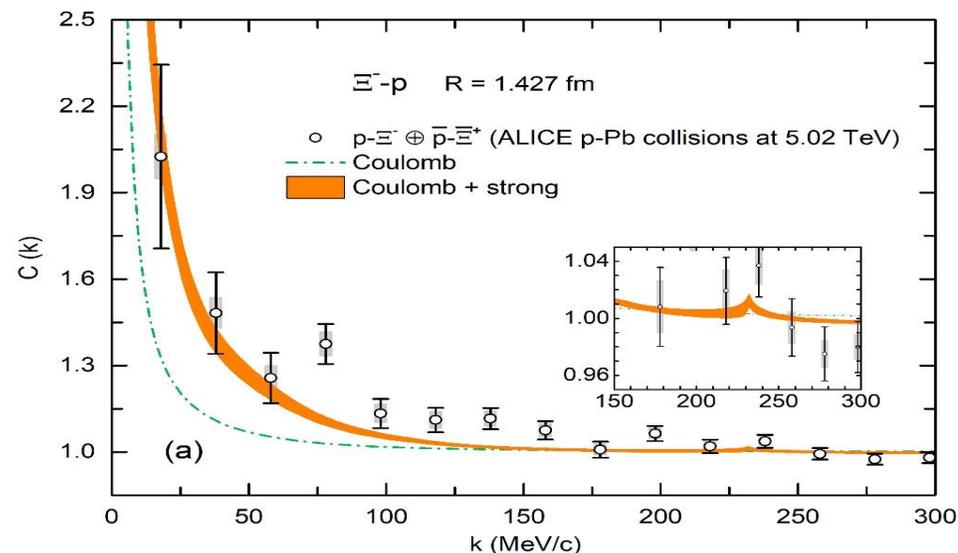
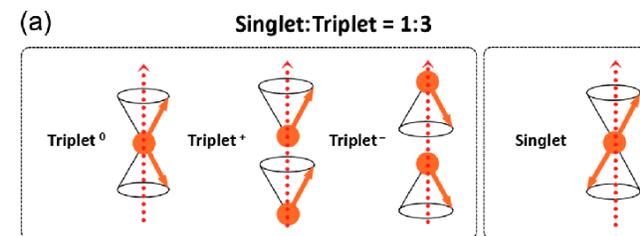
$$\phi^C(\mathbf{r}, \mathbf{k}) = \Gamma(1 + i\eta) e^{-\pi\eta/2} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} {}_1F_1(-i\eta; 1; ikr - i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r})$$

索墨菲尔德参数

库默尔合流超几何函数



库仑相互作用：Vincent-Phatak 方法



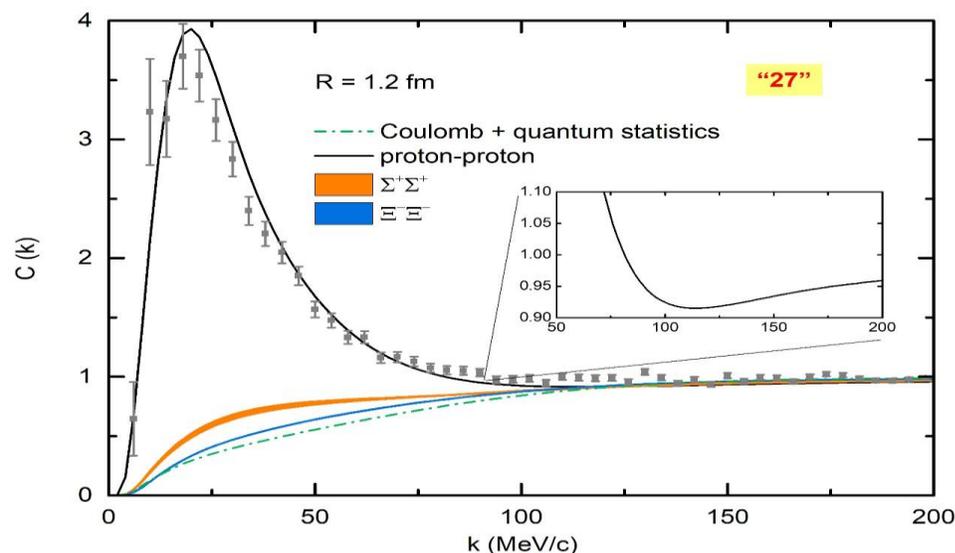
✓ 协变手征 ΞN 相互作用是可靠的； $\Xi N - \Sigma\Lambda$ 之间的耦合强度有待实验进一步的检验。

SU(3)对称性及其破缺的检验

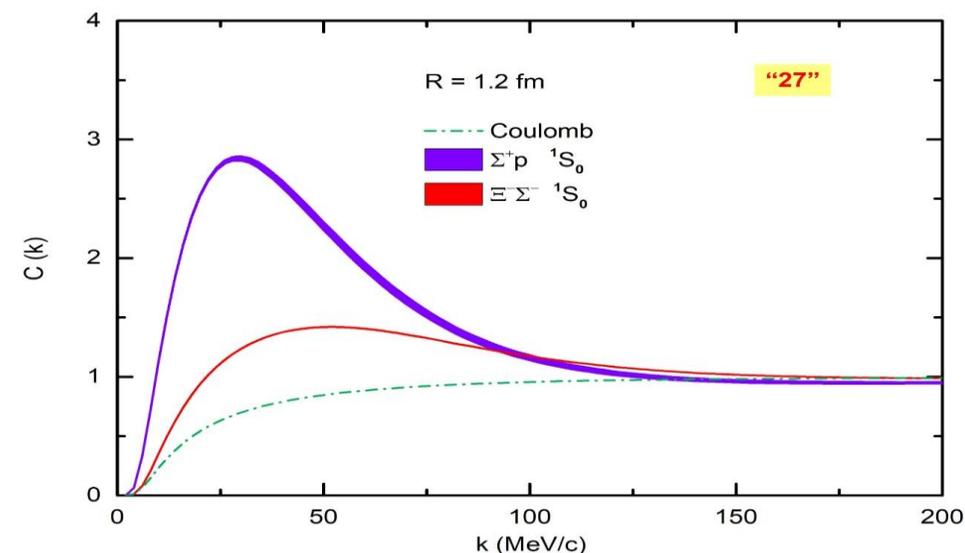


- $pp, \Sigma^+ p, \Sigma^+ \Sigma^+, \Xi^- \Sigma^-, \Xi^- \Xi^-$ 五组粒子对动量关联函数

无耦合道效应
库仑排斥相互作用
自旋单态 (全同费米子)



无耦合道效应
库仑排斥相互作用
自旋统计平均 (非全同费米子)



✓ 测量上述动量关联函数有望精确检验强作用中的SU(3)味道对称性及其破缺程度。



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

目录

1. 研究背景

- 研究意义
- 实验现状
- 理论现状

2. 重子-重子相互作用

- 协变手征有效场论
- 超子-核子、超子-超子相互作用
- 相互作用随奇异数的演化

3. 重子-重子动量关联函数

- 动量关联函数的分析方法
- 超子-核子、超子-超子动量关联函数
- $SU(3)$ 对称性及其破缺的检验

4. 总结与展望

德才兼备

知行合一



- 论文工作基于**协变手征有效场论**的框架，系统地构建了**八重态重子-重子相互作用**
 - ✓ 拟合散射数据确定了 $S=-1$ 系统的相互作用，发现在 Λp 道中可能存在共振态和虚态；
 - ✓ 拟合LQCD模拟数据确定了 $S=-2$ 系统的相互作用，预言了 $\Sigma\Sigma(I=2)$ 吸引相互作用，排除了束缚态；
 - ✓ 拟合LQCD模拟数据确定了 $S=-3$ 和 $S=-4$ 系统的相互作用，揭示了SU(3)味道对称性破缺；
 - ✓ 研究了八重态重子-重子相互作用随奇异数的演化规律。
- 论文工作结合**两粒子动量关联函数**测量，验证了**八重态重子-重子相互作用的可靠性**
 - ✓ 在完整耦合道框架下，分别计算了包含量子统计效应和库仑相互作用的 $\Lambda\Lambda$ 和 Ξ^-p 动量关联函数；
通过对比实验结果，验证了 $\Lambda\Lambda$ 和 Ξ^-p 协变手征相互作用的可靠性，同时排除了深束缚态的可能性；
 - ✓ 预言了 $\Sigma^+\Lambda$ 、 $\Sigma^+\Sigma^-$ 和 $\Sigma^+\Sigma^+$ 动量关联函数，为未来实验提供了理论参考；
 - ✓ 提出通过研究 pp 、 Σ^+p 、 $\Sigma^+\Sigma^+$ 、 $\Xi^-\Sigma^-$ 以及 $\Xi^-\Xi^-$ 动量关联函数来精确检验SU(3)味道对称性及其破缺。

- 结合新近实验约束，将目前的领头阶相互作用扩展至次领头阶乃至次次领头阶
- 结合Dirac-Brueckner-Hartree-Fock方法，利用目前的领头阶相互作用开展含超子核物质的第一性原理计算
- 利用Femtосcopy动量关联函数方法研究奇特强子态性质

敬请各位老师批评指正

谢谢！