

---

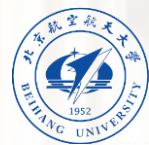
第一届超子物理研讨会  
(2024年4月14日, 南方核科学理论研究中心)

---

# 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



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

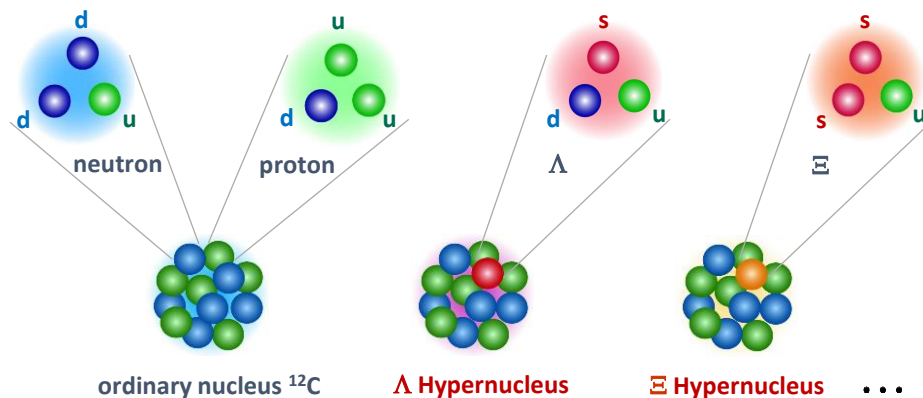
- 动量关联函数的分析方法
- 超子-核子、超子-超子动量关联函数
- $SU(3)$ 对称性及其破缺的检验

## 4. 总结与展望

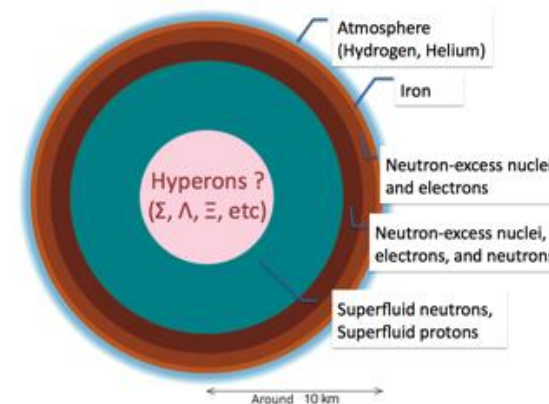
德才兼备

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  $\Lambda N$  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

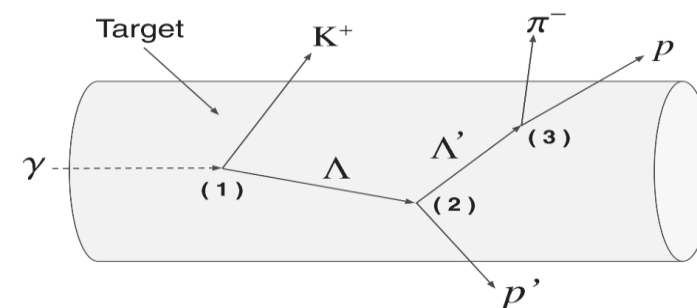
- $S=-1$  ( $\Lambda N, \Sigma N$ ) : 少量散射数据, 且精度有限

*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

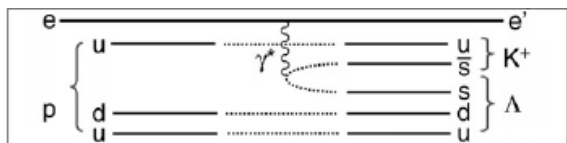
*Ahn J. K. et al., Phys. Lett. B 633 (2006) 214*

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



● 超核性质测量实验

$$^{12}\text{C}(e, e'K^+)_{\Lambda}^{12}\text{B}$$



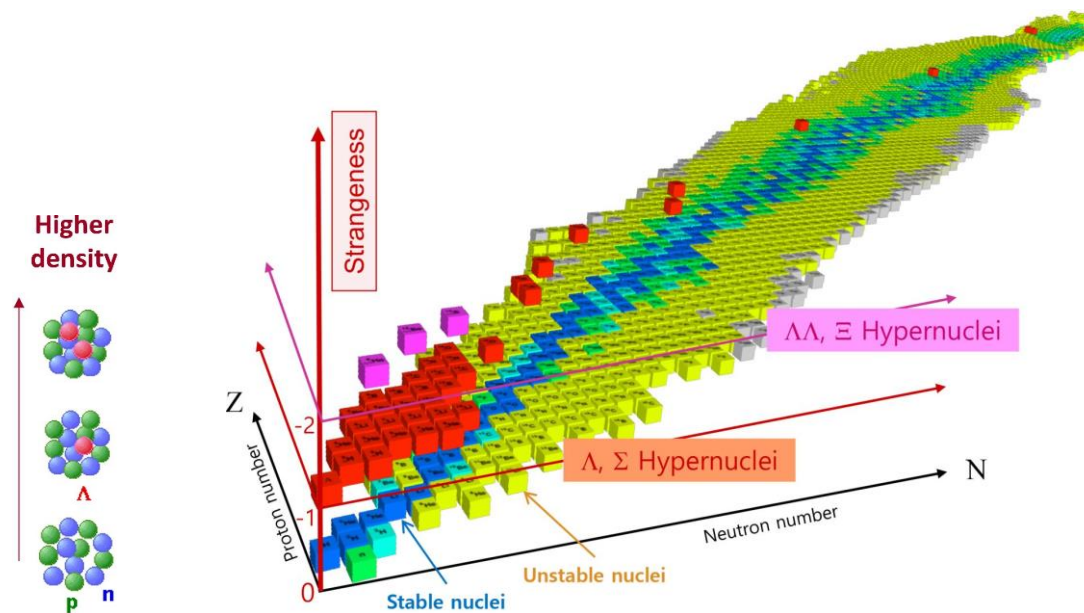
( $K^-, \pi$ ) KEK, BNL, CERN

( $\pi^+, K^+$ ) KEK, BNL

( $e, e'K^+$ ) JLab

( $\gamma, K^+$ ) JLab

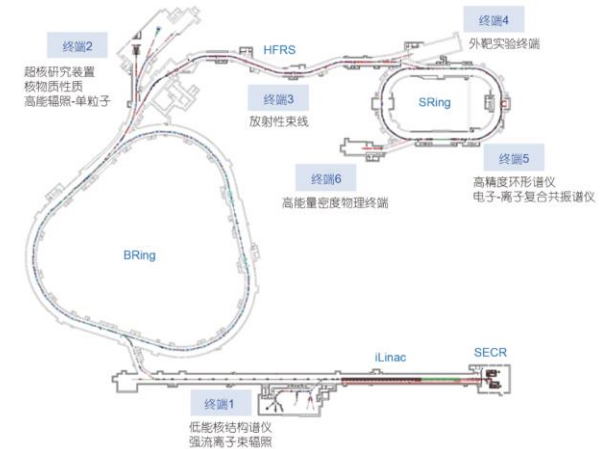
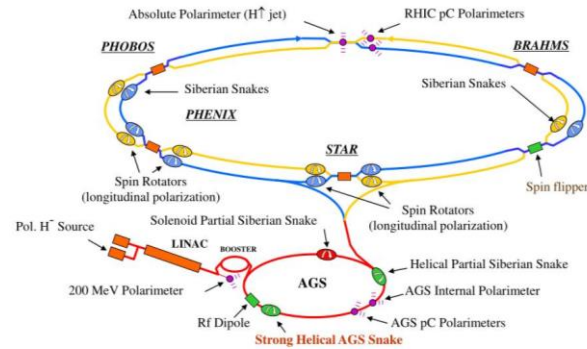
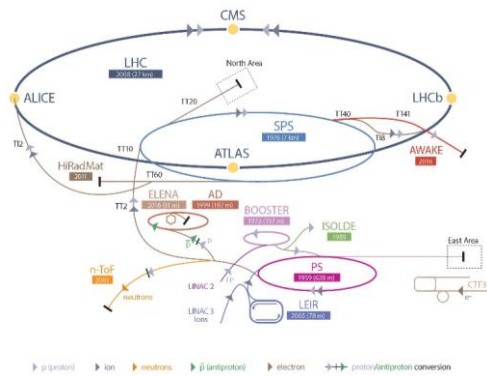
anti-hypernuclei HIC



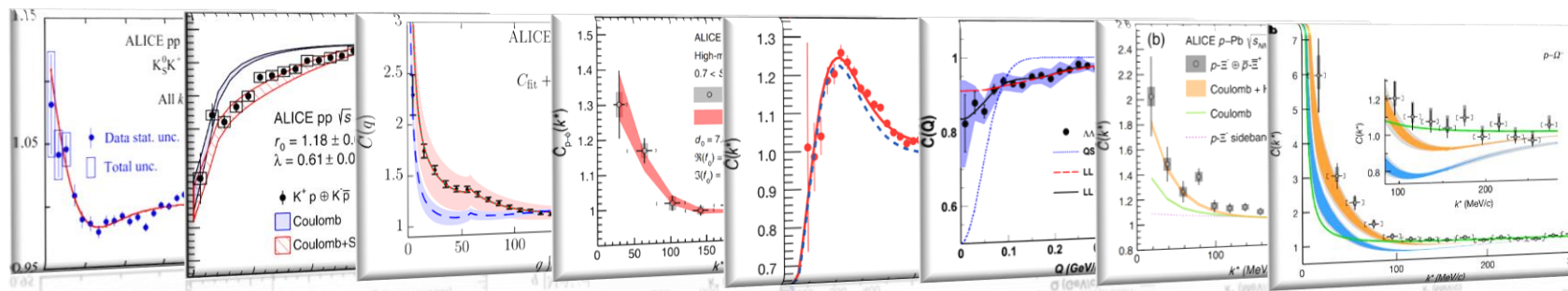
## 实验现状：两粒子动量关联函数



“十二五”国家重大科技基础设施



$K_S^0 K^\pm$      $K^\pm p$      $K^- p$      $\phi p$      $\bar{p} \bar{p}$      $\Lambda$      $\Xi^- p$      $\Omega^- p$      $K^- d$



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

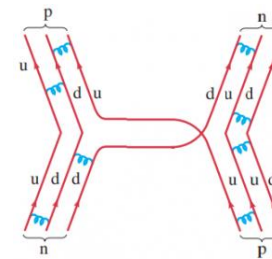
*Rijken T. A. et al., Phys. Rev. C, 59 (1999) 21*

*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*

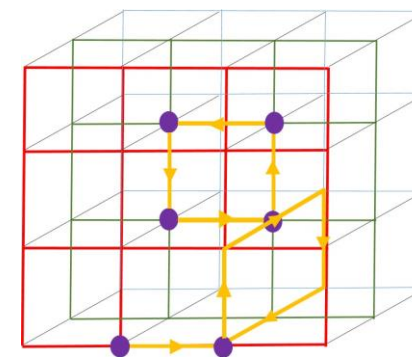
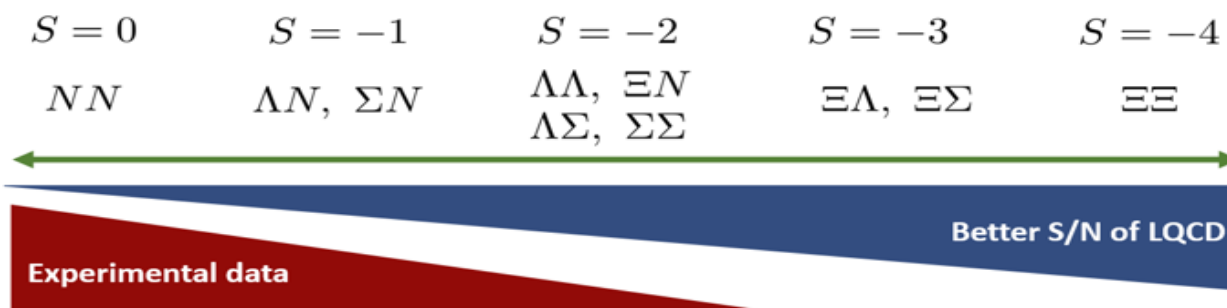
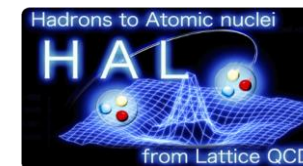
*Ping J. L. et al., Nucl. Phys. A, 657 (1999) 95*

*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

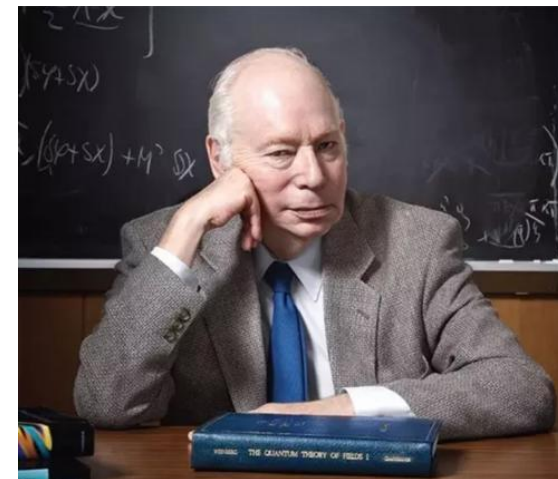
$$Q/\Lambda \ll 1$$

- 硬尺度  $\Lambda$

- 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 Weinberg<sup>1</sup>

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\*

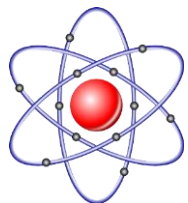
Theory Group, Department of Physics, University of Texas, Austin, TX 78712, USA

Received 2 April 1991





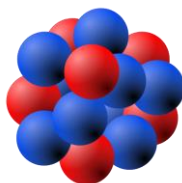
## ● 相对论效应 (动力学 + 运动学) 的重要性和迫切性



原子系统  
 $\sim 10^{-8}\text{cm}$

- ✓ 液态的水银
- ✓ 黄色的金子

...

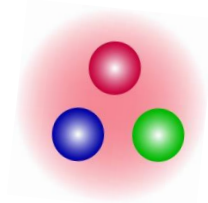


原子核系统  
 $\sim 10^{-12}\text{cm}$

- ✓ 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

...

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



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

...

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



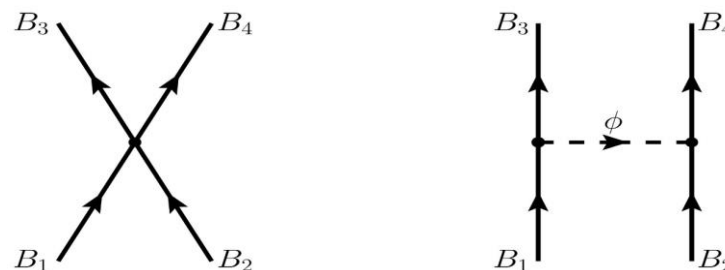
## 协变手征有效场论

## ● 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

$\sigma_1 \cdot \sigma_2$

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

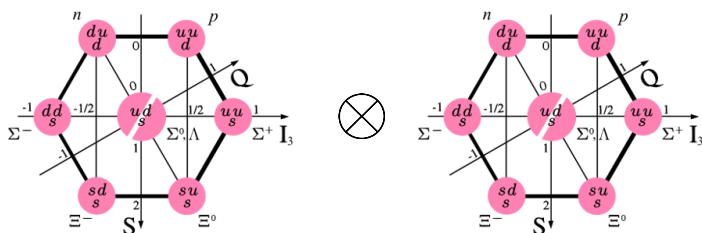
$(\sigma_1 \cdot \mathbf{q})(\sigma_2 \cdot \mathbf{q}), (\sigma_1 \cdot \mathbf{k})(\sigma_2 \cdot \mathbf{k})$

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

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 = <sup>1</sup> S <sub>0</sub> , <sup>3</sup> P <sub>0</sub> , <sup>3</sup> P <sub>1</sub>	ξ = <sup>1</sup> P <sub>1</sub> , <sup>3</sup> S <sub>1</sub> , <sup>3</sup> S <sub>1</sub> - <sup>3</sup> D <sub>1</sub> , <sup>3</sup> D <sub>1</sub>
S = 0	NN → NN	0	-
	NN → NN	1	V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup>
S = -1	ΛN → ΛN	1/2	1/10(9V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> + V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> )
	ΛN → ΣN	1/2	3/10(V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> - V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> )
	ΣN → ΣN	1/2	1/10(V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> + 9V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> )
	ΣN → ΣN	3/2	V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup>
S = -2	ΛΛ → ΛΛ	0	1/40(27V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> + 8V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> + 5V <sub>ξ</sub> <sup>1</sup> )
	ΛΛ → ΞN	0	1/40(-18V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> + 8V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> + 10V <sub>ξ</sub> <sup>1</sup> )
	ΛΛ → ΣΣ	0	√3/40(-3V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> + 8V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> - 5V <sub>ξ</sub> <sup>1</sup> )
	ΞN → ΞN	0	1/40(12V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> + 8V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> + 20V <sub>ξ</sub> <sup>1</sup> )
	ΞN → ΣΣ	0	√3/40(2V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> + 8V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> - 10V <sub>ξ</sub> <sup>1</sup> )
	ΣΣ → ΣΣ	0	1/40(V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> + 24V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> + 15V <sub>ξ</sub> <sup>1</sup> )
	ΞN → ΞN	1	1/5(2V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> + 3V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> )
	ΞN → ΣΛ	1	√6/5(-V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> + V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> )
	ΞN → ΣΣ	1	-
	ΣΛ → ΣΛ	1	1/5(3V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> + 2V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> )
	ΣΛ → ΣΣ	1	-
	ΣΣ → ΣΣ	1	-
S = -3	ΞΛ → ΞΛ	1/2	1/10(9V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> + V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> )
	ΞΛ → ΞΣ	1/2	3/10(V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> - V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> )
	ΞΣ → ΞΣ	1/2	1/10(V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup> + 9V <sub>ξ</sub> <sup>8<sub>s</sub></sup> )
	ΞΣ → ΞΣ	3/2	V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup>
S = -4	ΞΞ → ΞΞ	0	-
	ΞΞ → ΞΞ	1	V <sub>ξ</sub> <sup>27</sup>



## 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  $g_A = 1.26$ ;  $\pi$ 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*

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

$\rho$ : partial wave       $\nu$ : 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

$\Lambda p \rightarrow \Lambda p$		$\Lambda p \rightarrow \Lambda p$		$\Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$	
$p_{lab}^{\Lambda}$	$\sigma_{exp}$	$p_{lab}^{\Lambda}$	$\sigma_{exp}$	$p_{lab}^{\Sigma^-}$	$\sigma_{exp}$
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

$\Sigma^+ p \rightarrow \Sigma^+ p$		$\Sigma^- p \rightarrow \Sigma^- p$		$\Sigma^- p \rightarrow \Sigma^0 n$	
$p_{lab}^{\Sigma^+}$	$\sigma_{exp}$	$p_{lab}^{\Sigma^-}$	$\sigma_{exp}$	$p_{lab}^{\Sigma^-}$	$\sigma_{exp}$
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

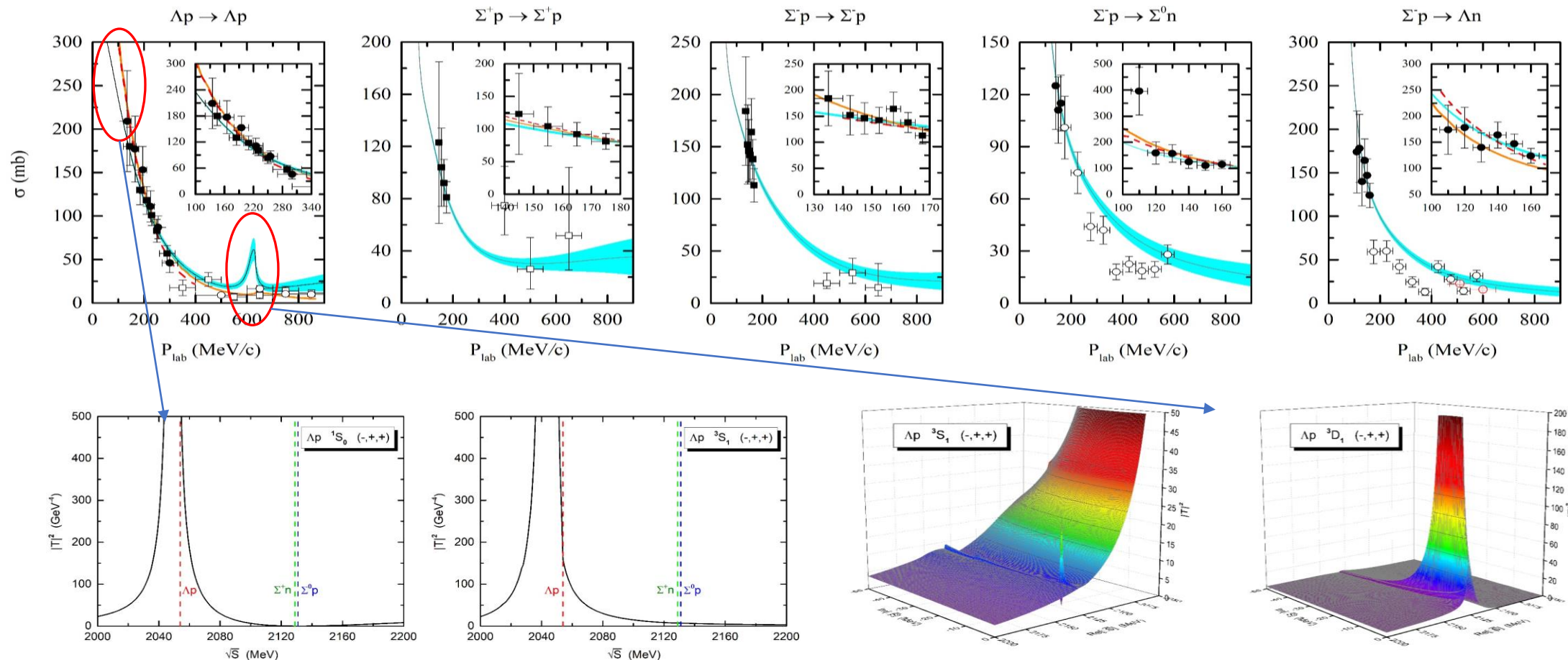
$\Lambda_F$	$C_{1S0}^{\Lambda\Lambda}$	$C_{1S0}^{\Sigma\Sigma}$	$C_{3S1}^{\Lambda\Lambda}$	$C_{3S1}^{\Sigma\Sigma}$	$C_{3S1}^{\Lambda\Sigma}$	$\hat{C}_{1S0}^{\Lambda\Lambda}$	$\hat{C}_{1S0}^{\Sigma\Sigma}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Lambda\Lambda}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Sigma\Sigma}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Lambda\Sigma}$	$C_{3P0}^{\Lambda\Lambda}$	$C_{3P0}^{\Sigma\Sigma}$	$\chi^2/\text{d.o.f.}$
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 $\Lambda p$ 阈下存在  $^1S_0$  和  $^3S_1$  的虚态；在 $\Lambda p$ 阈上存在  $^3S_1 - ^3D_1$  共振态。

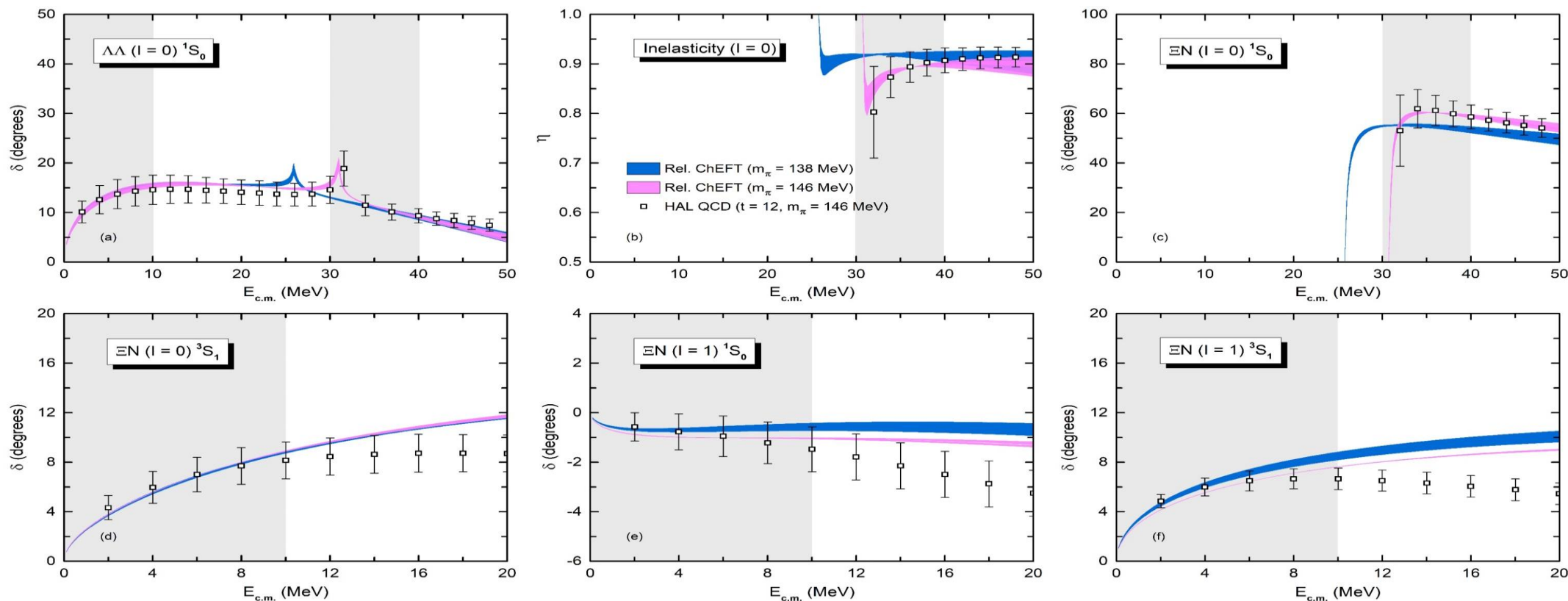
# S=-2系统的相互作用



● 拟合最新格点QCD模拟结果



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



$\Lambda_F$	$C_{1S0}^{\Lambda\Lambda}$	$C_{1S0}^{\Sigma\Sigma}$	$C_{3S1}^{\Lambda\Lambda}$	$C_{3S1}^{\Sigma\Sigma}$	$C_{3S1}^{\Lambda\Sigma}$	$C_{1S0}^{4\Lambda}$	$\hat{C}_{1S0}^{\Lambda\Lambda}$	$\hat{C}_{1S0}^{\Sigma\Sigma}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Lambda\Lambda}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Sigma\Sigma}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Lambda\Sigma}$	$\hat{C}_{1S0}^{4\Lambda}$
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

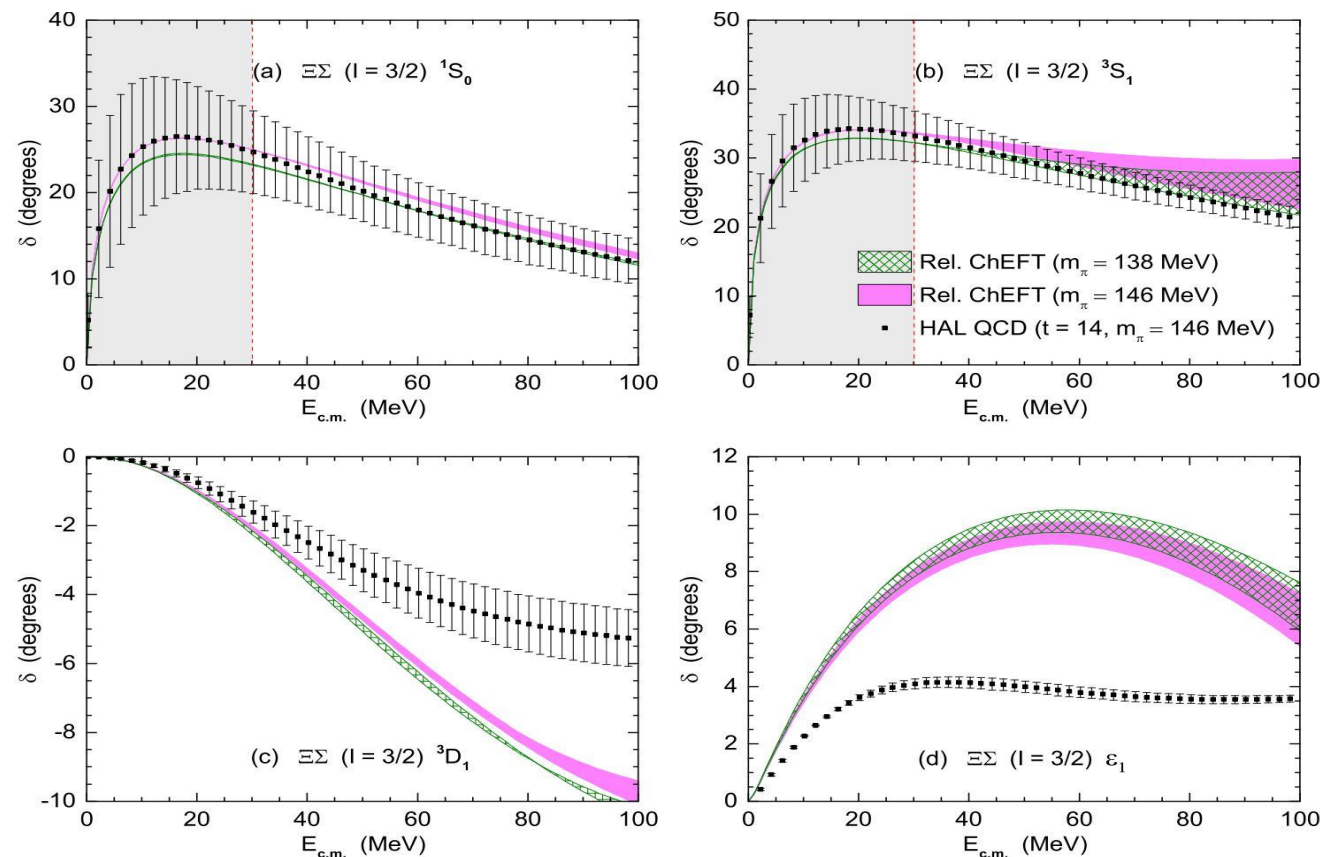


## 拟合格点QCD模拟结果

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

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

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



$\Lambda_F$	LECs ( $S = -3$ )				$\chi^2/\text{d.o.f.}$
	$C_{1S_0}^{\Sigma\Sigma}$	$C_{3S_1}^{\Lambda\Lambda} + C_{3S_1}^{\Lambda\Sigma}$	$\hat{C}_{1S_0}^{\Sigma\Sigma}$	$\hat{C}_{3S_1}^{\Lambda\Lambda} + \hat{C}_{3S_1}^{\Lambda\Sigma}$	
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

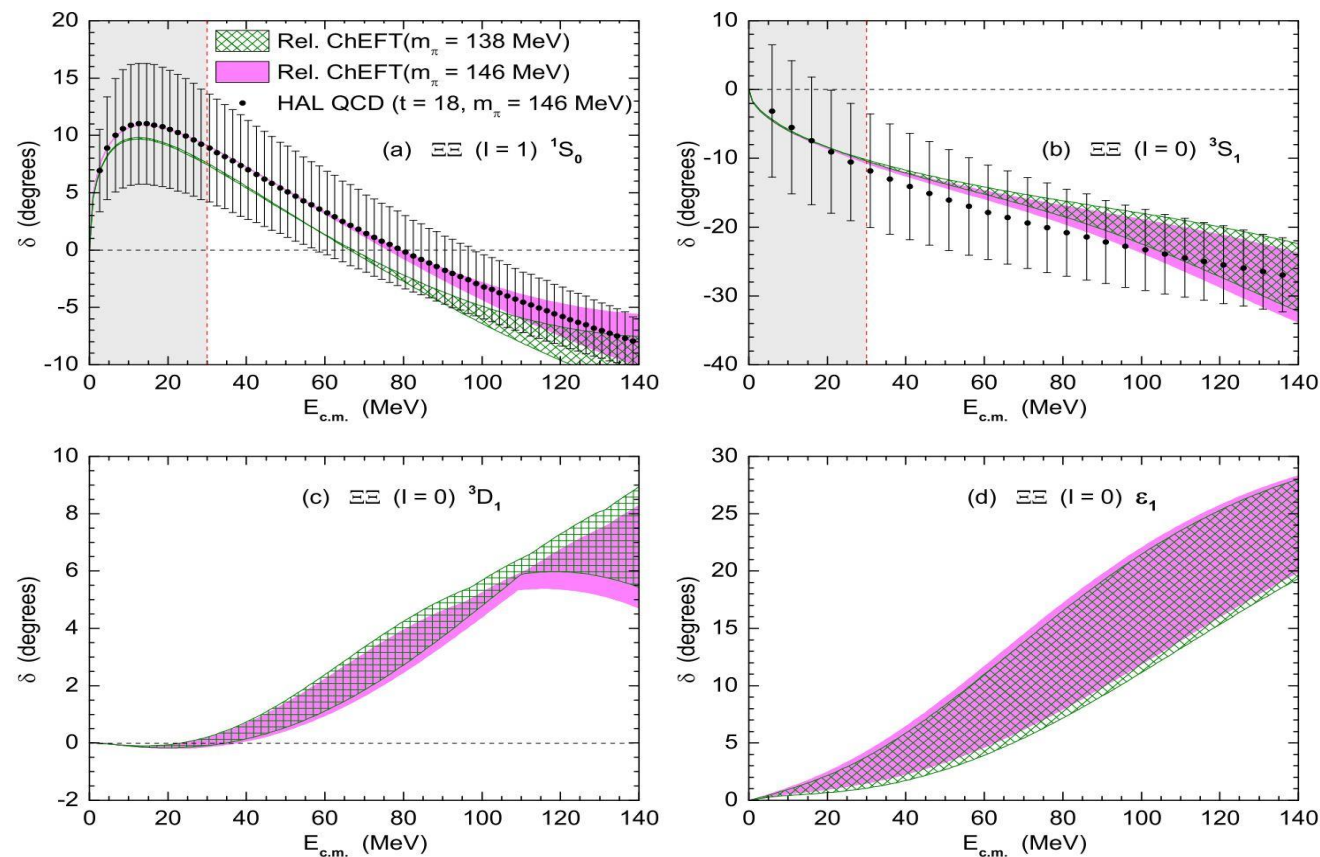


## 拟合格点QCD模拟结果

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

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

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

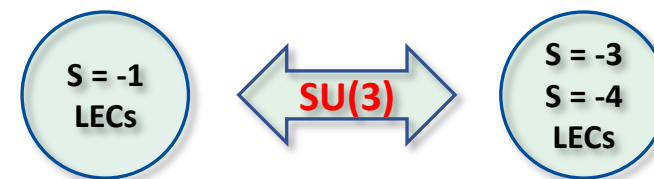
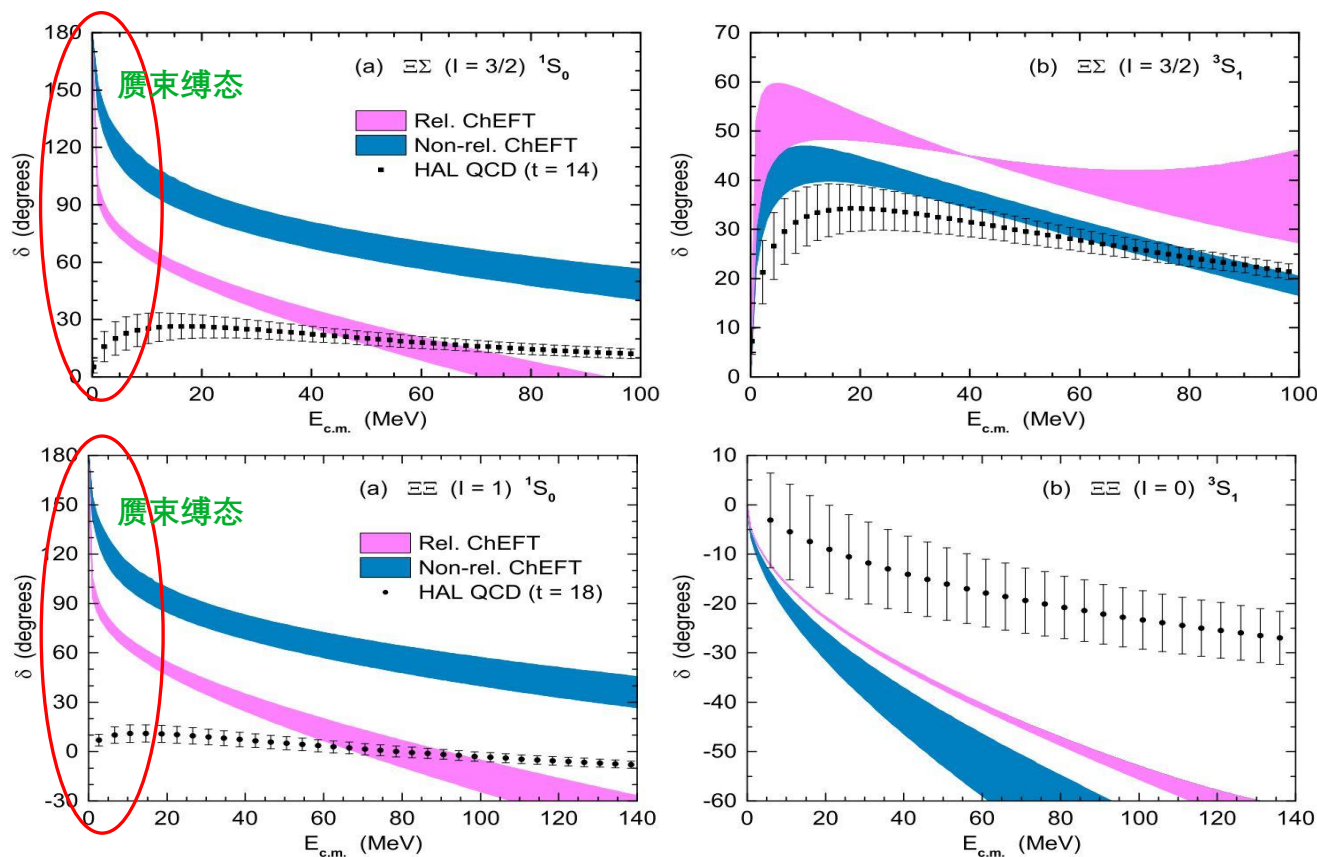


$\Lambda_F$	LECs ( $S = -4$ )				$\chi^2/\text{d.o.f.}$
	$C_{1S0}^{\Sigma\Sigma}$	$C_{3S1}^{\Sigma\Sigma}$	$\hat{C}_{1S0}^{\Sigma\Sigma}$	$\hat{C}_{3S1}^{\Sigma\Sigma}$	
550	-0.0221	0.0195	-0.0356	1.3522	<u>0.003</u>
600	-0.0221	0.0193	-0.0267	1.1246	<u>0.003</u>
650	-0.0220	0.0193	-0.0197	0.9594	<u>0.004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



$$-\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{2\mu_{B_1B_2}}{\hbar^2} V_{B_1B_2} u = k^2 u$$

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

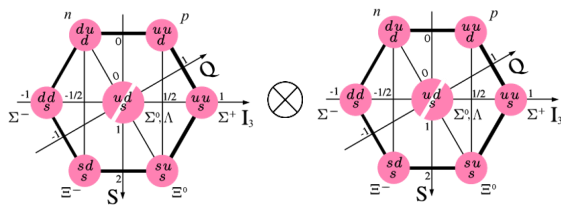
$$\frac{\mu_{\Xi\Xi}}{\mu_{NN}} \simeq 140\%, \quad \frac{\mu_{\Xi\Sigma}}{\mu_{NN}} \simeq 133\%$$

✓ 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



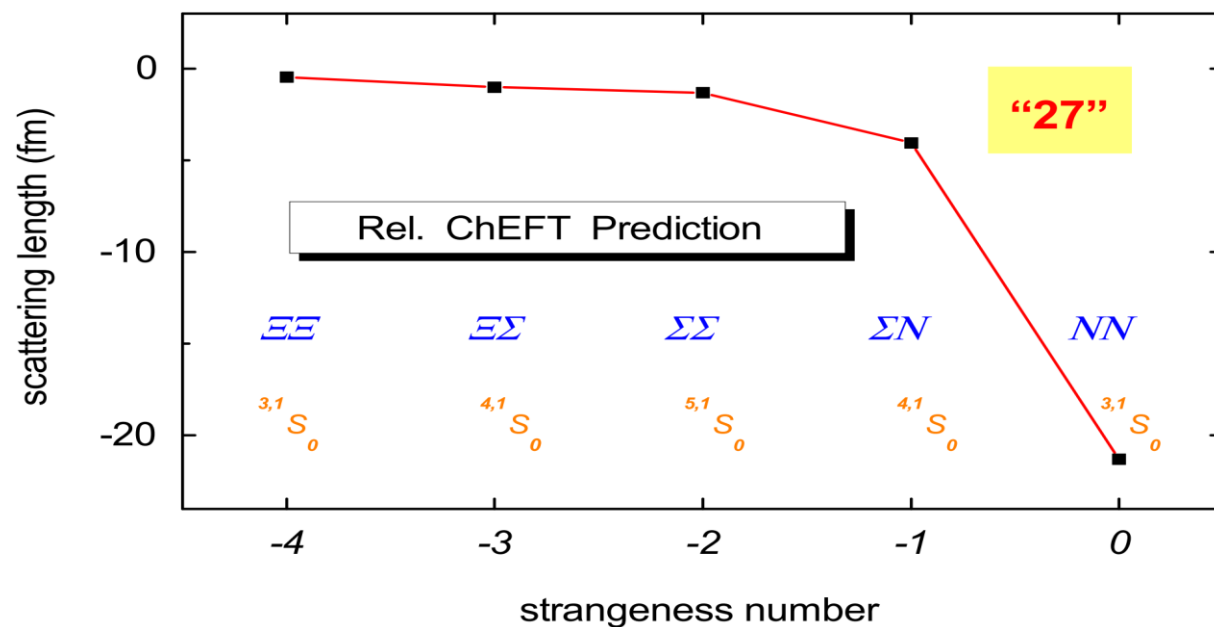
## ● 双重子系统中“27”不可约表示部分的散射长度



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

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

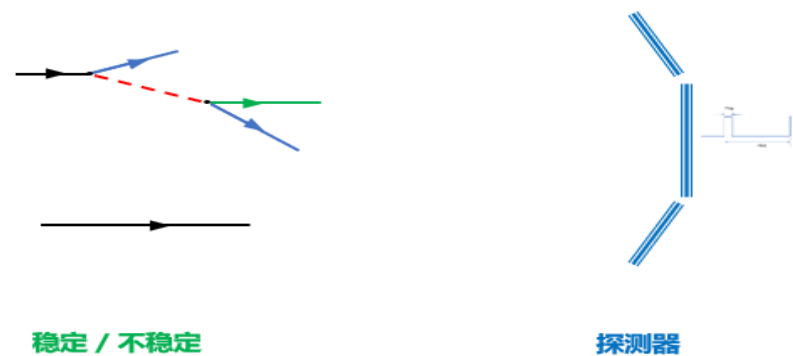
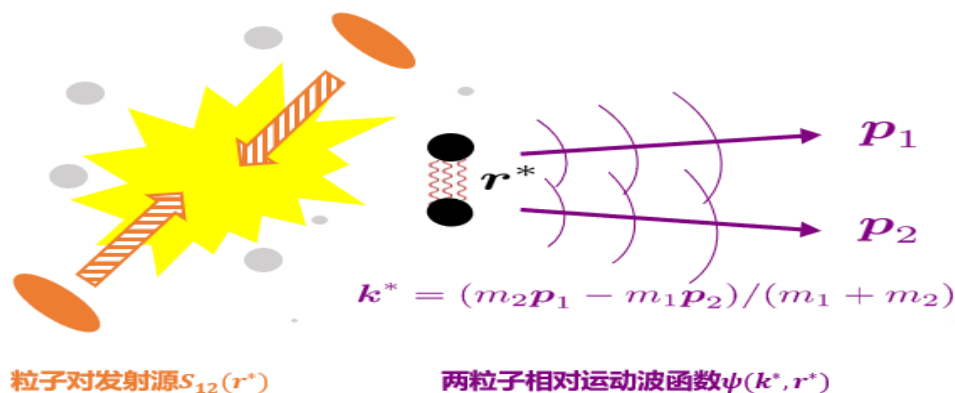
## 4. 总结与展望

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

实验测量

混合事件技术

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

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

> 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

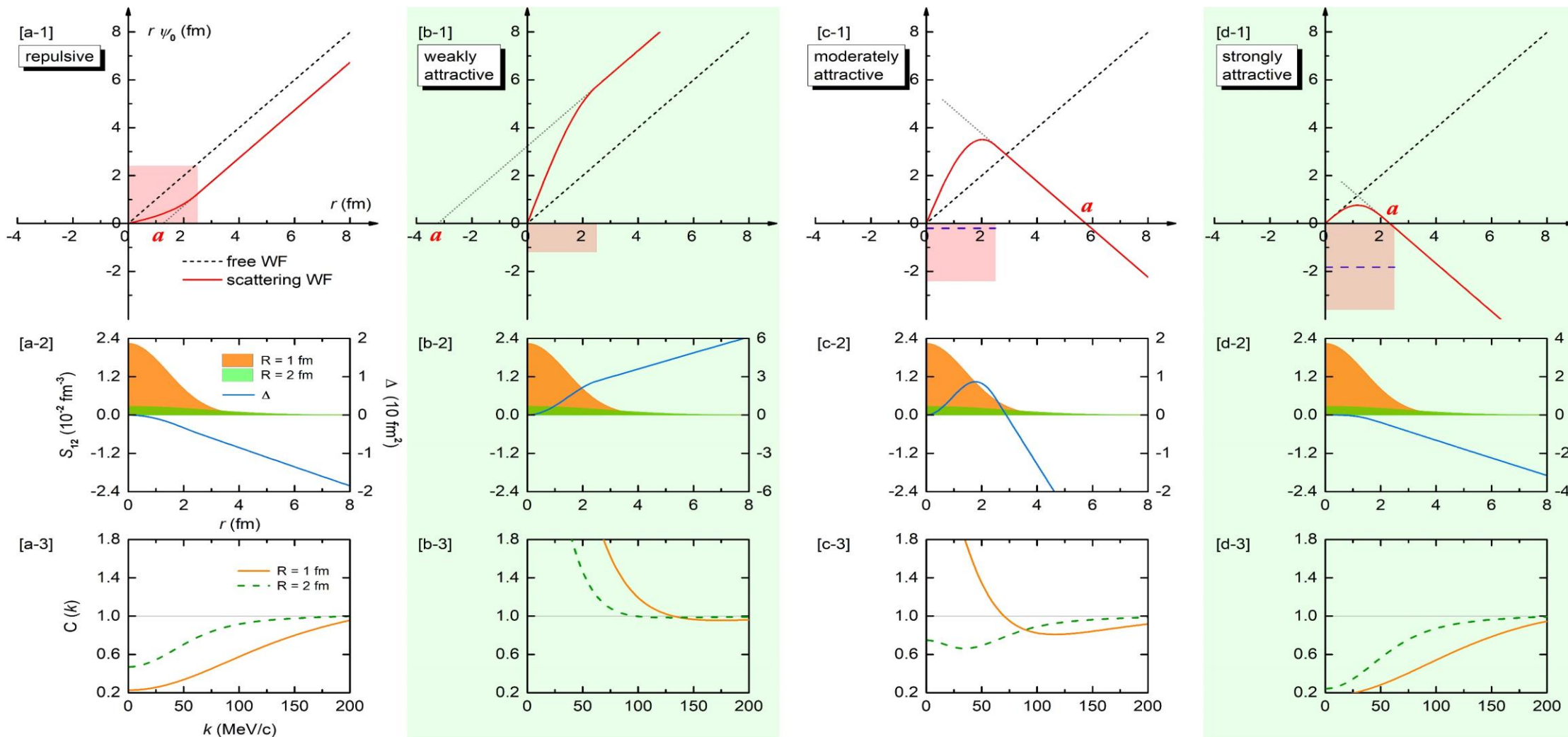
- 坐标空间：求解Schrödinger方程

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

- 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

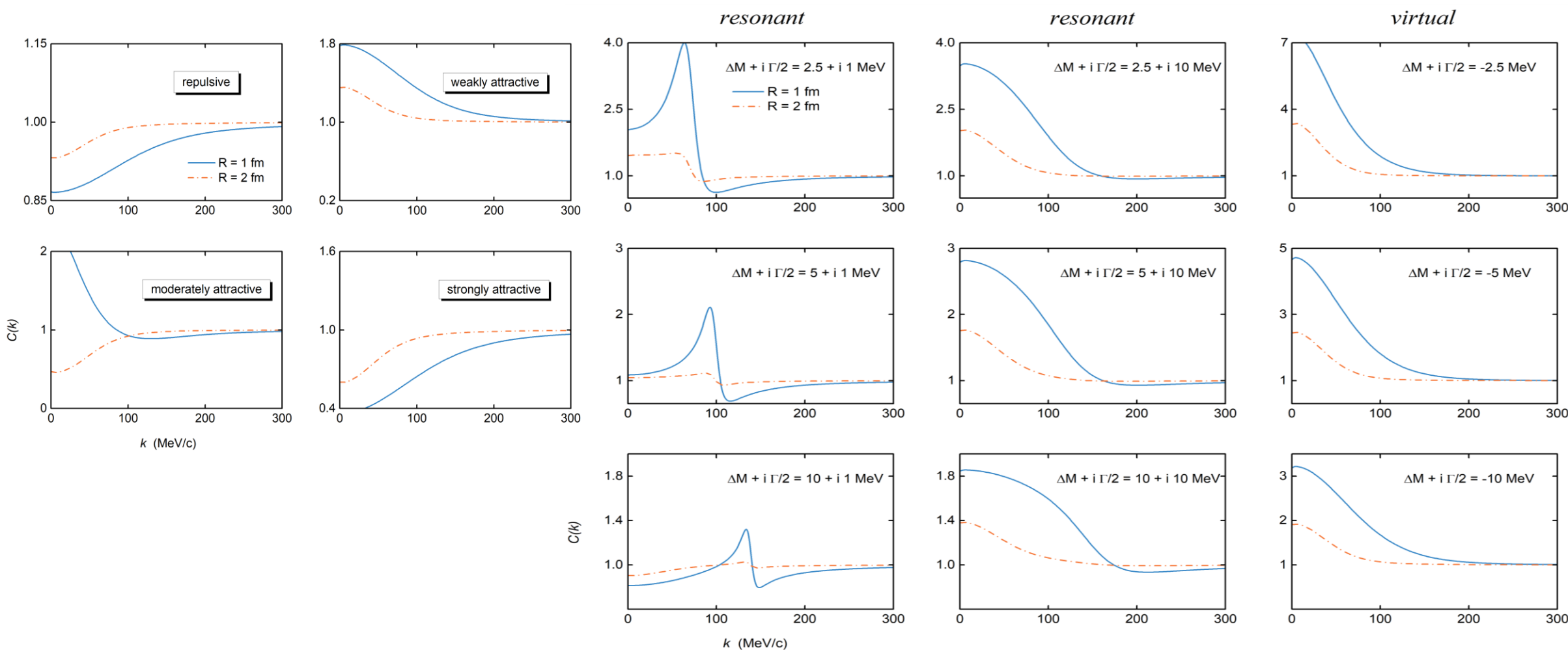
$$\psi_{\beta\alpha;l}(r) = \delta_{\beta\alpha} j_l(k_\alpha r) + \frac{1}{\pi} \int dq q^2 \frac{1}{\sqrt{s} - E_{\beta,1}(q) - E_{\beta,2}(q) + i\epsilon} \cdot T_{\beta\alpha;l}(q, k_\alpha; \sqrt{s}) \cdot j_l(qr)$$

● 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

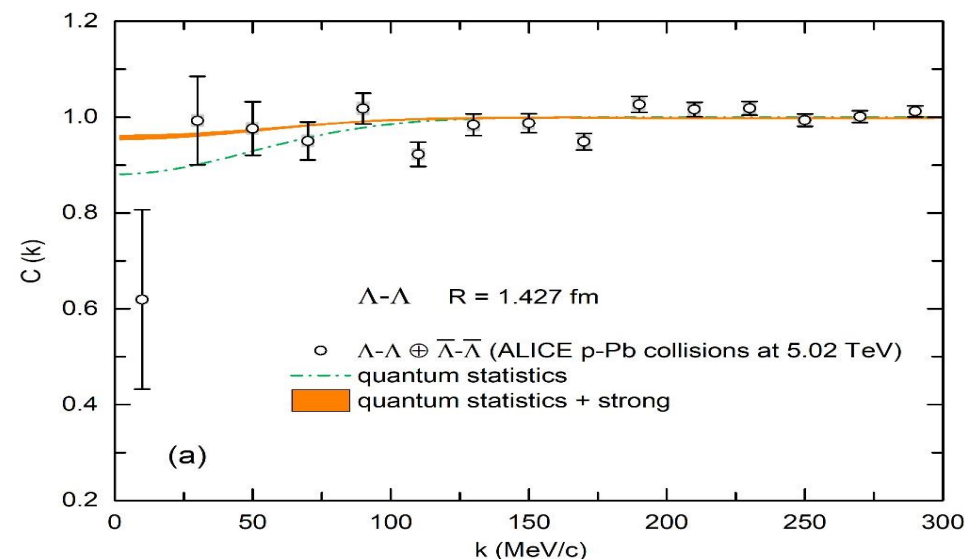
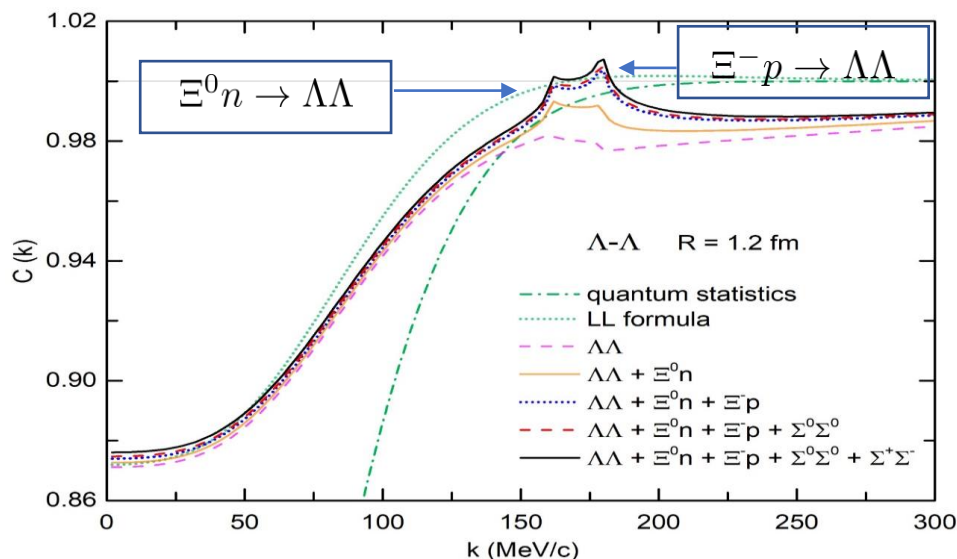


● 全同中性费米子系统 —  $\Lambda\Lambda$  的动量关联函数

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。

# $\Xi^-p$ 动量关联函数



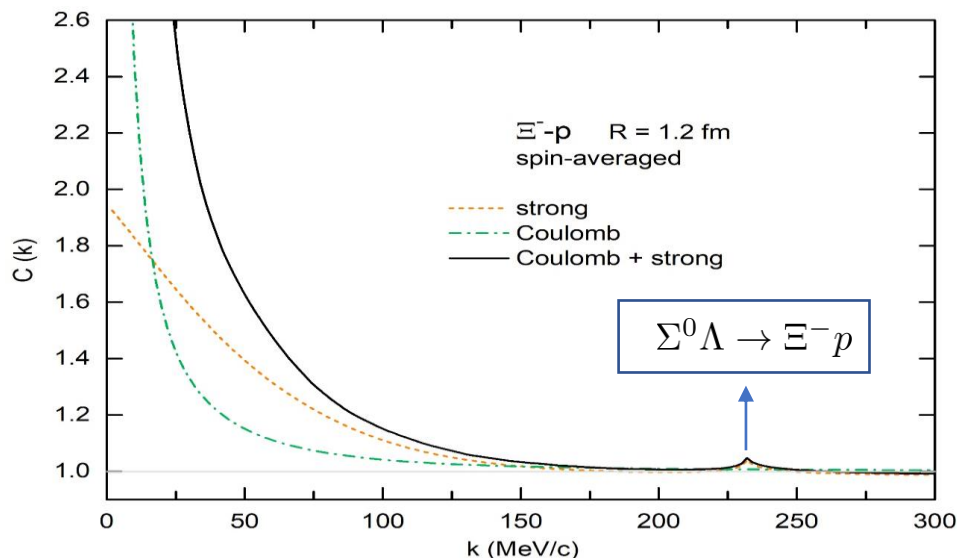
## ● 非全同带电费米子系统 — $\Xi^-p$ 的动量关联函数

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

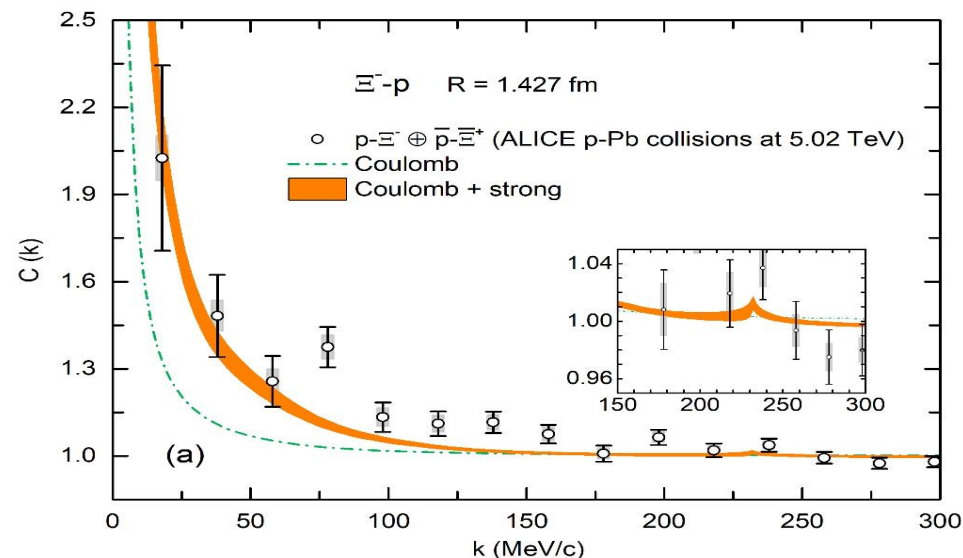
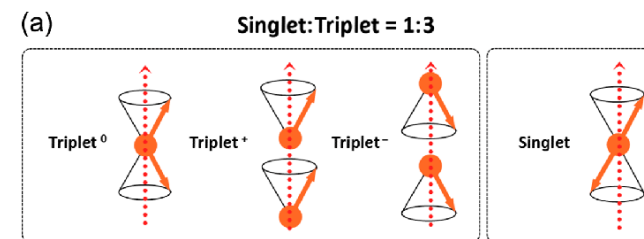
$$\phi^C(\mathbf{r}, \mathbf{k}) = \Gamma(1 + i\eta) e^{-\pi\eta/2} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} {}_1F_1(-i\eta; 1; ikr - i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r})$$

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



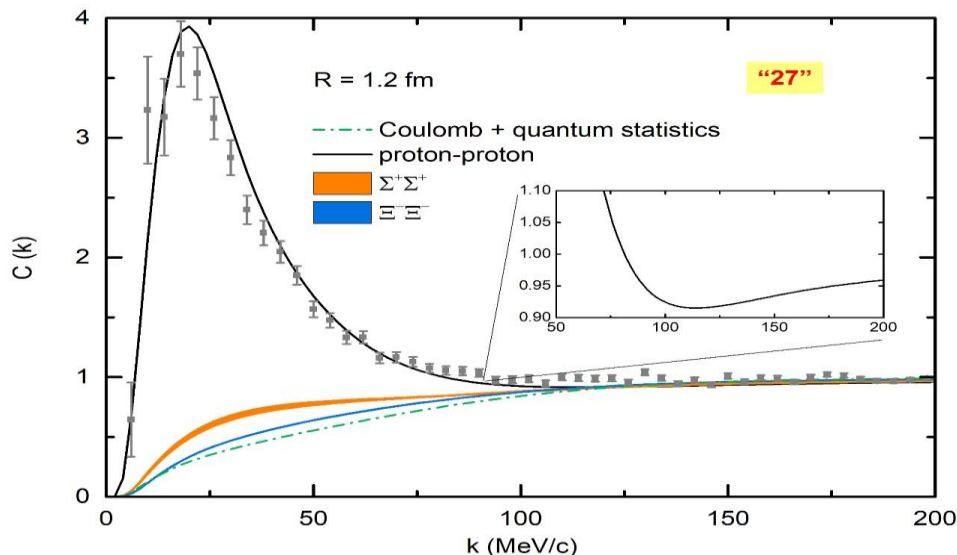
✓ 协变手征 $\Xi N$ 相互作用是可靠的； $\Xi N - \Sigma\Lambda$ 之间的耦合强度有待实验进一步的检验。

## SU(3)对称性及其破缺的检验

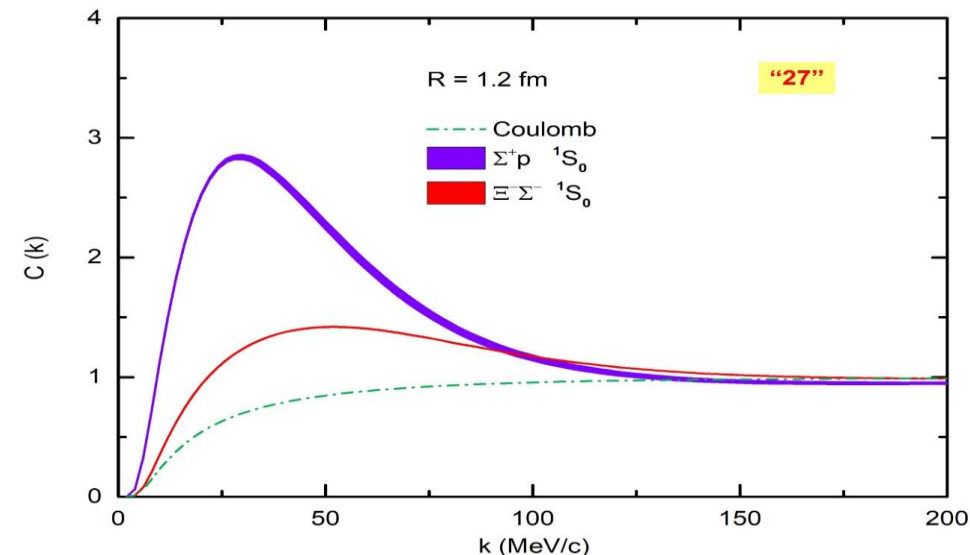


- $pp, \Sigma^+ p, \Sigma^+ \Sigma^+, \Xi^- \Sigma^-, \Xi^- \Xi^-$  五组粒子对动量关联函数

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 $\Lambda p$ 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 $\Xi^-p$ 动量关联函数；  
通过对比实验结果，验证了 $\Lambda\Lambda$ 和 $\Xi^-p$ 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 $pp$ 、 $\Sigma^+p$ 、 $\Sigma^+\Sigma^+$ 、 $\Xi^-\Sigma^-$ 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！