



J/ψ-Nucleon Scattering Length

报告人:吴兵

合作者: 董相坤, 杜孟林, 郭奉坤, 邹冰松

单位: 中国科学院理论物理研究所





1. 背景介绍

[1] J. J. Aubert et al., Phys. Rev. Lett. 33 (1974) 1404-1406
[2] J. E. Augustin et al., Phys. Rev. Lett. 33 (1974) 1406-1408
[3] A. Sibirtsev, M.B. Voloshin, Phys. Rev. D 71 (2005) 076005



- 对于夸克模型来说, 1974年矢量粲偶素基态J/ψ的发现^[1,2]是至关重要的事件。
- J/ψ与核子之间的相互作用一直备受物理学家关注
 - 口 典型的OZI禁戒过程
 - 口 一般机制



图 1 J/ψ N通过胶子交换过程散射的价夸克的费曼图



图 2 J/ψ N通过粲强子对耦合道过程散射的价夸克的费曼图

耦合道机制(强子圈)规避OZI压低^[7]: $J/\psi N$ - $\Lambda_c \bar{D}^{(*)}/\Sigma_c^{(*)} \bar{D}^{(*)}$ - $J/\psi N$

胶子矩阵元 $\begin{cases} \langle J/\psi | GG | J/\psi \rangle & \mathbf{O} \mathbf{W} \mathbf{W} \mathbf{S}^{[\mathbf{3},\mathbf{4}]} \\ \\ \langle N | GG | N \rangle & \mathbf{K} \mathbf{F} \mathbf{G} \mathbf{G} \mathbf{W} \mathbf{F} \mathbf{G} \mathbf{G} \mathbf{G} \mathbf{G}^{[\mathbf{5},\mathbf{6}]} \end{cases}$

[4] Y.-H. Chen, FKG, B.-S. Zou et al., Phys. Rev. D 93 (2016) 034030[5] Y. Hatta et al., JHEP 12 (2018) 008

[6] Y.-B. Yang et al., Phys. Rev. D 104 (2021) 074507[7] H. Lipkin, B.-S. Zou, Phys. Rev. D 53 (1996) 6693-6696

● 现有的一些关于J/ψN散射长度的计算结果

[8] M.-L. Du, FKG et al., Eur. Phys. J. C 80 (2020) 11, 1053
[9] M.-L. Du, FKG et al., JHEP 08 (2021) 157

口 耦合道机制的贡献



口 胶子交换的贡献?



图 1 J/ψ N通过胶子交换过程散射的价夸克的费曼图



图 2 J/ψ N通过粲强子对耦合道过程散射的价夸克的费曼图

工作出发点:利用色散关系计算双胶子交换情况下的J/ψN的散射长度,进而对于胶子 交换和耦合道贡献进行一个比较,这对理解J/ψN相互作用的机制是至关重要的!



Ps: BS equation (近似+分波)

$$T_{l}(s) = V_{l}(s) + V_{l}(s)G(s)T_{l}(s) = [1 - V_{l}(s)G(s)]^{-1}V_{l}(s)$$

单道近似:

$$T_{J/\psi N \to J/\psi N,0}(s) = \frac{V_{J/\psi N \to J/\psi N,0}(s)}{1 - V_{J/\psi N \to J/\psi N,0}(s)G(s)}$$

$$V_{J/\psi N \to J/\psi N,0}(s) \in R$$

$$\prod_{Im[G(s)] = \rho_{J/\psi N}(s)\theta(\sqrt{s} - m_{J/\psi} - m_{N})} Im[T_{J/\psi N \to J/\psi N,0}(s)] = |T_{J/\psi N \to J/\psi N,0}(s)|^{2} \rho_{J/\psi N}(s)\theta(\sqrt{s} - m_{J/\psi} - m_{N})$$

2.2 J/ψ N的散射势的计算

[10] N. Brambilla et al., Phys. Rev. D 93 (2016) 054002
[11] X.-K. Dong, FKG, B.-S. Zou et al., Sci. Bull. 66 (2021) 2462-2470

● 对于软胶子交换的J/ψN散射,在距离比较远时,胶子交换会被强子化为交换π和更重的介子^[10,11]







● 交叉对称性关系(Crossing relation)^[12]



$$T_{cd;ab}^{(s)}(s,t) = \sum_{a',b',c',d'} d_{a'a}^{s_a}(\chi_a) d_{b'b}^{s_b}(\chi_b) d_{c'c}^{s_c}(\chi_c) d_{d'd}^{s_d}(\chi_d) T_{c'a';d'b'}^{(t)}(s,t)$$



● 幺正性关系与色散关系



● Muskhelishvili-Omnes表示 (包含LHC)

口 单道情况:

$$T_{\mathbb{B}\bar{\mathbb{B}}\to\pi\pi,0}(s) = R_{\mathbb{B},0}(s) + L_{\mathbb{B},0}(s)$$
$$\operatorname{disc}[T_{\mathbb{B}\bar{\mathbb{B}}\to\pi\pi,0}(s)] = 2iT_{\mathbb{B}\bar{\mathbb{B}}\to\pi\pi,0}(s)\rho_{\pi}(s)T_{\pi\pi\to\pi\pi}^{*}(s)$$
$$T_{\pi\pi\to\pi\pi,0}(s) = e^{i\delta_{0}(s)}\sin\delta_{0}(s)/\rho_{\pi}(s)$$

$$\Omega_L(s) \equiv \exp\left[\frac{s}{\pi} \int_{s_{\rm th}}^{\infty} dz \frac{\delta_L(z)}{z(z-s)}\right]$$

$$R_{\mathbb{B},0}(s) = \Omega_0(s) \left(P_{n-1}(s) + \frac{s^n}{\pi} \int_{4m_\pi^2}^{+\infty} \mathrm{d}z \frac{L_{\mathbb{B},0}(z) \sin \delta_0(z)}{(z-s)z^n |\Omega_0(z)|} \right)$$
$$T_{\mathbb{B}\bar{\mathbb{B}} \to \pi\pi,0}(s) = L_{\mathbb{B},0}(s) + \Omega_0(s) \left(\frac{P_{n-1}(s)}{\pi} + \frac{s^n}{\pi} \int_{4m_\pi^2}^{+\infty} \mathrm{d}z \frac{L_{\mathbb{B},0}(z) \sin \delta_0(z)}{(z-s)z^n |\Omega_0(z)|} \right)$$



_

匹配到树图阶手征振幅: $L_{\mathbb{B},0}(s) \sim \hat{A}_0^{\mathbb{B}}(s) \qquad P_{n-1}(s) \sim A_0^{\mathbb{B}}(s)$

	E 3	*		, ,		. ,					
	LHC	RHC	Total	[33]	[18]	[34]	[37]	[36]	[24]	[23]	m _o
$g_{\Sigma\Sigma\sigma}$	$1.8^{+0.5}_{-0.5}$	$3.5^{+2.0+0.8}_{-1.8-0.9}$	$3.5^{+1.8+0.4}_{-1.3-0.4}$			10.85(8.92)	4.65	••••			519^{+50}_{-48}
$g_{\Xi\Xi\sigma}$	$0.2^{+0.1}_{-0.1}$	$2.6^{+1.5+0.5}_{-1.4-0.6}$	$2.5^{+1.5+0.5}_{-1.3-0.6}$	•:••				•••	3.4	•••	614_{-81}^{+56}
$g_{\Lambda\Lambda\sigma}$	$1.2^{+0.4}_{-0.3}$	$6.7^{+1.0+1.4}_{-1.1-1.7}$	$6.8^{+1.0+1.1}_{-1.0-1.4}$	• • •		8.18(6.54)	4.37	•••		6.59	596^{+41}_{-51}
9NNo	$2.9^{+0.9}_{-0.8}$	$8.8^{+1.4+1.9}_{-1.4-2.3}$	$8.7^{+1.3+1.1}_{-1.3-1.4}$	12.78	8.46	8.46	8.58	13.85	10.2	9.86	558^{+33}_{-42}
$g_{NN\sigma}^{{ m SU}(2)}$	$2.7^{+0.8}_{-0.8}$	$12.5^{+0.2+2.6}_{-0.2-3.2}$	$12.2^{+0.2+1.9}_{-0.2-2.3}$								586 ⁺³⁸ ₋₄₈

[13] B. Wu, X.-H. Cao, X.-K. Dong, FKG, Phys. Rev. D 109 (2024) 034026



FIG. 2. The tree-level Feynman diagrams for the process of $N\bar{N} \to \pi\pi$ and $N\bar{N} \to K\bar{K}$.

口 对于 $J/\psi J/\psi \to \pi\pi/K\bar{K}$ 过程

[11] X.-K. Dong, FKG, B.-S. Zou et al., Sci. Bull. 66 (2021) 2462-2470

$$\operatorname{disc}\left(\bigcup_{J/\psi}^{J/\psi}, \bigcup_{N,0}^{\overline{N}}\right) \left(\bigcup_{J/\psi}^{J/\psi}, \bigcup_{\pi,0}^{\pi}\right) \left(\bigcup_{\pi}^{\pi}, \bigcup_{N,0}^{\pi}\right)^{*} \left(\bigcup_{\pi}^{\overline{N}}, \bigcup_{N,0}^{\pi}\right)^{*} \left(\bigcup_{J/\psi}^{J/\psi}, \bigcup_{\overline{K},0}^{\overline{K}}\right) \left(\bigcup_{\overline{K}}^{\overline{N}}, \bigcup_{N,0}^{\overline{N}}\right)^{*} \left(\bigcup_{N,0}^{\overline{N}}, \bigcup_{N,0}^{\overline{N}}\right)^{*} \left($$

$$T_{J/\psi J/\psi \to |i\rangle,0}(s) = \Omega_{0,i1}(s)\mathcal{M}(s, M_{\pi}) + \Omega_{0,i2}(s)\frac{2}{\sqrt{3}}\mathcal{M}(s, M_K)$$
$$\mathcal{M}(s, M_p) = -\frac{2}{F_{\pi}^2}\sqrt{\frac{3}{2}}\left\{c_1^{(21)}(s - 2m_p^2) + \frac{c_2^{(21)}}{2}\left[s + \frac{s(s - 4M_{J/\psi}^2)}{4M_{J/\psi}^2}\left(1 - \frac{s - 4M_p^2}{3s}\right)\right]\right\}$$

$$c_1^{(21)} = 0.229 \pm 0.002, \quad c_2^{(21)} = -0.061 \pm 0.003.$$



Fig. 3. (Color online) The fit to the BESII data on the $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ transition [62] provided by Eq. (13) with $\chi^2/d.o.f. = 1.10$.







- 3. 数值结果与色极化率修正
 - 数值结果



图 3 S波的J/ψ N的散射长度对截断参数和色散积分上限的依赖性



软胶子交换的J/ψ N之间的散射长度约为:

$$a_0^{J/\psi N} = -0.43 \dots - 0.27 \text{ fm}$$

J/Ψ N之间是互相吸引的
 國值处的强度与ππ同位旋为0的S波相互作用强度相当^[16,17]

 $a_{00}^{\pi\pi} = -0.2210 \pm 0.0047$ (统计误差) ± 0.0015 (系统误差) fm

[16] J.R. Batley et al., Phys. Lett. B 633 (2006) 173-182[17] B. Bloch-Devaux, PoS KAON09 (2009) 033





● 色极化率修正



[3] A. Sibirtsev, M.B. Voloshin, Phys. Rev. D 71 (2005) 076005 \Box 两个重夸克偶素A和B之间通过双 π 跃迁的振幅正比于色极化率,即 $\mathcal{M}(A \to B\pi\pi) = \alpha_{AB} (\pi\pi \vec{E^a} \cdot \vec{E^a} | 0)$ $\alpha_{\psi(2S)J/\psi}$ 口 之前计算中 $J/\psi \pi \pi/K \bar{K}$ 顶点的振幅都是从 $\alpha_{\psi(2S)J/\psi}$ 出发得到的 $a_0^{J/\psi N} = -0.43 \dots - 0.27$ fm 口 色极化率修正后的散射长度为: $a^{J/\psi N} = \alpha_{J/\psi} \cdot A(m_{J/\psi})$, $a^{\psi(2S)N} = \alpha_{\psi(2S)} \cdot A(m_{\psi(2S)})$. 口 色极化率满足的Schwarz不等式: $\alpha_{\psi(2S)}\alpha_{J/\psi} \ge |\alpha_{\psi(2S)J/\psi}|^2$ 口 保持之前相同的计算,并将 $m_{J/\psi}$ 替换成 $m_{\psi(2S)}$,可得: $a_0^{\psi(2S)N} = -0.37 \dots - 0.23$ fm $\alpha_{\psi(2S)J/\psi}$ 口借助Schwarz不等式,可得: $a^{J/\psi N} \cdot a_0^{\psi(2S)N} \ge a^{J/\psi N} \cdot a_0^{\psi(2S)N}$

数值结果为: $a^{J/\psi N} a^{\psi(2S)N} \ge 0.06 \text{ fm}^2$

4. 总结

• 基于色散关系和手征振幅我们估算了J/ ψ N通过胶子交换 (交换相互关联的 $\pi\pi$ - $K\overline{K}$) 的散射长度:



$$a_0^{J/\psi N} = -0.43 \dots - 0.27 \text{ fm}$$

同样的过程估算出ψ(2S)N通过胶子交换的散射长度:

$$a_0^{\psi(2S)N} = -0.37 \dots - 0.23 \text{ fm}$$

色极化率修正后的结果为:

$$a^{J/\psi N} a^{\psi(2S)N} \ge 0.06 \text{ fm}^2$$

考虑到J/ψN通过粲强子对 Λ_c D̄^(*) 和 Σ_c^(*) D̄^(*) 耦合道机制估算的散射长度小于10 am, 比上面的胶
 子交换的结果至少小一个数量级。我们因此可以给出结论: 胶子交换的贡献定性上显著大于来自粲
 强子对耦合道的贡献。也就是说J/ψN低能相互作用中, 软胶子交换的贡献是主导的。



Thank you for your attention!