

第五届强子与重味物理理论与实验联合研讨会

Production mechanisms of isoscalar pseudotensor mesons in pion and kaon induced reactions

卢东恩，燕山大学

指导教师：王利明老师

河北，石家庄

2026年3月30日

目 录

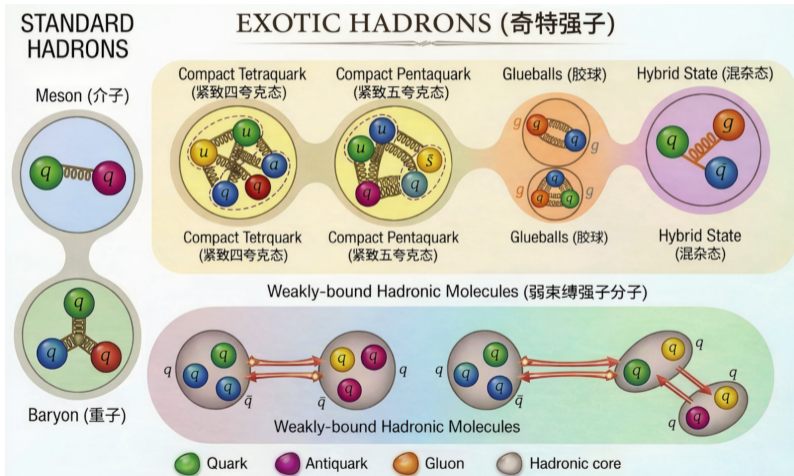
1. 研究背景
2. 赝张量介子在 π^-p/K^-p 的产生机制
3. 数值计算及其结果分析
4. 总结与展望

1

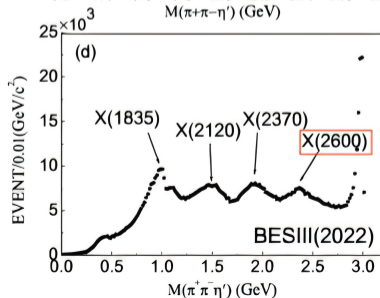
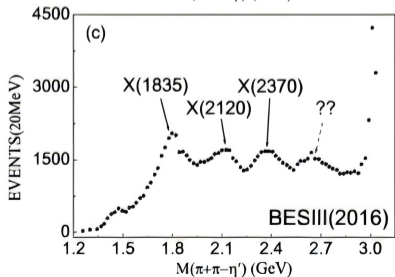
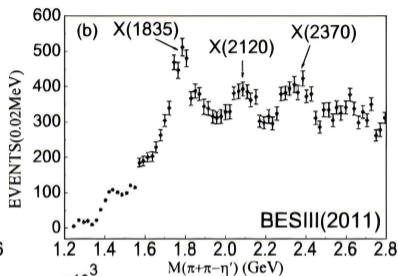
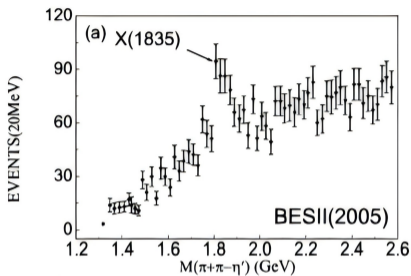
研究背景

强子物理

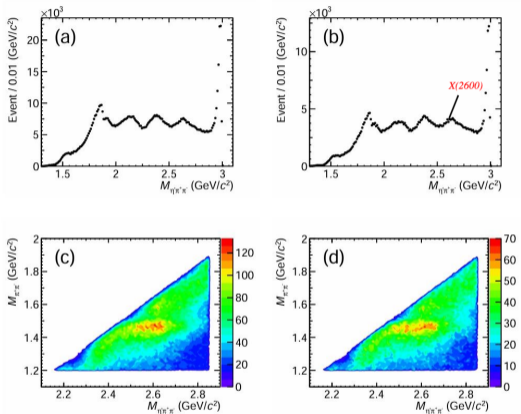
强子物理主要关注强子的谱学、结构、相互作用等问题。它是理解量子色动力学非微扰效应的理想平台，能有效促进对实验发现的**新强子态**性质与内部结构的理解。



精度前沿



X(2600) 共振态的发现



BESIII: $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-\eta'$ 过程

Phys. Rev. Lett. **129**, 042001 (2022)

- BESIII 合作组在 $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-\eta'$ 衰变中观测到 X(2600) 共振态
- 基于约 10×10^9 个 J/ψ 事件
- 显著性超 20σ
- 测得质量: $2618.3 \pm 2.0^{+16.3}_{-1.4} \text{ MeV}/c^2$
- 宽度: $195 \pm 5^{+26}_{-17} \text{ MeV}$
- 自旋宇称 J^{PC} 可能为 0^{-+} (赝标量) 或 2^{-+} (赝张量)

X(2600)-奇特态研究

- X(2600) 可能为 2^{-+} 的 triguon glueball; *Zhang, S. Q., Wan, B. D., Tang, L., et al. Phys.Rev.D 106 (2022)*
- X(2600) 可能为 2^{-+} 的 $us\bar{u}\bar{s}$ tetraquark; *Wang, Q. N., Lian, D. K., Chen, W., et al. Phys.Rev.D 112 (2025)*

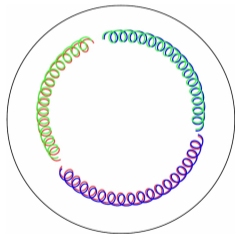


FIG: triguon glueball

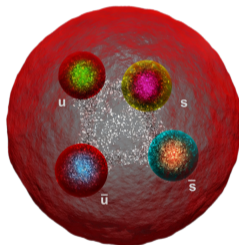
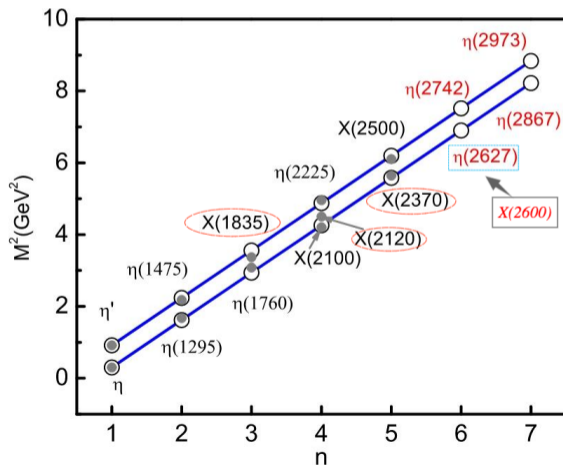


FIG: tetraquark

- X(2600) 是胶球还是介子态, 可能依赖 $f_0(1500)$ 和 $f_2'(1525)$ 的内部结构; *Chen, H. X., Chen, W., Liu, X., et al. Rept.Prog.Phys. 86 (2023)*

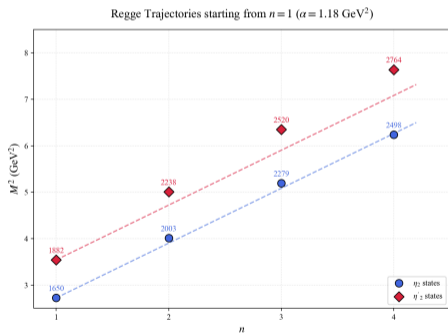
X(2600)-赝标量介子研究

- X(2600) 可能是赝标量态 ($\eta(6S)$), X(1835)、X(2120)、X(2370) 曾被归为 0^{-+} 赝标量态的理论预测; Wang, L. M., Zhou, Q. S., Pang, C. Q., et al. Phys.Rev.D 102 (2020)



X(2600)-赙张量介子研究

- 排除 $X(2600)$ 作为同位旋标量的赙张量态 ($\eta'_2(4D)$) 的可能性并预测存在四种未观测的同位旋标量赙张量介子径向激发态。Wang, L. M., Tian, W. X., Li, T. Y., et al. *Phys.Rev.D* 110 (2024)



理论预测的 η_2 家族质量谱 (单位: MeV)

η_2 态		η'_2 态	
态	质量	态	质量
$\eta_2(1D)$	1650	$\eta'_2(1D)$	1882
$\eta_2(2D)$	2003	$\eta'_2(2D)$	2238
$\eta_2(3D)$	2279	$\eta'_2(3D)$	2520
$\eta_2(4D)$	2498	$\eta'_2(4D)$	2764

理论空白：四种高激发态的产生机制与实验观测路径未知

已知 η_2 态的实验研究现状

- PDG 列出的已知 η_2 态: $\eta_2(1645)$ 、 $\eta_2(1870)$ 、 $\eta_2(2030)$ 、 $\eta_2(2250)$, 多在 $p\bar{p}$ 湮灭过程中被发现。

$\eta_2(1645)$ $I^G(J^{PC}) = 0^+(2^{-+})$

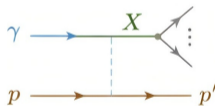
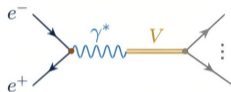
$\eta_2(1645)$ MASS 1617 ± 5 MeV

VALUE (MeV)	DOCUMENT ID	TECN	CHG	COMMENT
1617 ± 5	OUR AVERAGE			
1613 ± 8	BARBERS 2008	CL		450 $p\bar{p} \rightarrow p\eta\eta^{\prime}\pi^{\pm}\pi^{\pm}$
1617 ± 8	BARBERS 2000C	CL		450 $p\bar{p} \rightarrow p\eta^{\prime}\pi^{\pm}\pi^{\pm}$
1620 ± 20	BARBERS 1997B	CL	OMEG	450 $p\bar{p} \rightarrow p\eta^{\prime}(\pi^{\pm}\pi^{\mp})$
1645 ± 14 ± 15	ADOMIT 1996	CL	CBAR	0 1.94 $\bar{p}p \rightarrow \eta_2^{\pm}\pi^{\pm}$
• • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • •				
1646 ± 6 ± 20	ANISOVICH 2000E	CL	SPEC	0.8 - 1.84 $\bar{p}p \rightarrow \eta_2^{\pm}\pi^{\pm}$

$\eta_2(1870)$ $I^G(J^{PC}) = 0^+(2^{-+})$

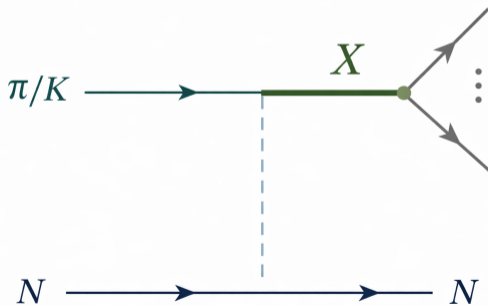
$\eta_2(1870)$ MASS 1842 ± 8 MeV

VALUE (MeV)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
1842 ± 8		OUR AVERAGE		
1836 ± 12		BARBERS 2008	CL	450 $p\bar{p} \rightarrow p\eta\eta^{\prime}\pi^{\pm}\pi^{\pm}$
1844 ± 15		BARBERS 2000C	CL	450 $p\bar{p} \rightarrow p\eta^{\prime}\pi^{\pm}\pi^{\pm}$
1840 ± 26		BARBERS 1997B	CL	OMEG 450 $p\bar{p} \rightarrow p\eta^{\prime}(\pi^{\pm}\pi^{\mp})$
1876 ± 20 ± 35		ADOMIT 1996	CL	CBAR 1.94 $\bar{p}p \rightarrow \eta_2^{\pm}\pi^{\pm}$
1881 ± 32 ± 40	26	KARCH 1992	CL	CBAL $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta_2^{\pm}\pi^{\pm}$
• • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • •				
1860 ± 5 ± 15		ANISOVICH 2000E	CL	SPEC 0.8 - 1.84 $\bar{p}p \rightarrow \eta_2^{\pm}\pi^{\pm}$
1840 ± 15		BAI 1999	CL	BES $J/\psi \rightarrow \eta\eta^{\prime}\pi^{\pm}\pi^{\pm}$



其他赝张量介子的实验发现

- $\pi_2(1670)$ 、 $\pi_2(1880)$ 、 $\pi_2(2005)$ 以及 $\pi_2(2100)$ 在 π^-p 反应中被发现；
- $K_2(1580)$ 、 $K_2(1770)$ 、 $K_2(1820)$ 以及 $K_2(2250)$ 在 K^-p 反应中被发现；
- π -质子和 K -质子散射是发现和研究强子共振态的重要反应机制之一。因此可以预期，目标态 η_2 也可能通过类似的反应过程产生，例如在 πN 或 $K N$ 散射中形成。



2

赝张量介子在 π^-p/K^-p 的产生机制

有效拉氏量方法

- 在强子物理的非微扰能区，量子色动力学（QCD）难以直接求解，因此通常采用有效理论进行研究。
- 有效拉氏量方法以强子（介子与重子）作为有效自由度，在保持 QCD 对称性的前提下构建相互作用拉氏量，从而描述强子之间的动力学过程。
- 该方法已被广泛应用于强子谱研究、粒子衰变以及两体和三体散射过程的理论分析。

散射截面的计算流程

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} \implies \text{Feynman Rules} \implies \mathcal{M} \implies d\sigma$$

- 构建描述强子相互作用的有效拉氏量 \mathcal{L}_{eff} ；
- 根据费曼规则计算相关散射过程的所有费曼图；
- 得到散射振幅 \mathcal{M} ，并进一步求得散射截面等可观测量；
- 最终实现理论结果与实验数据之间的比较。

理论框架

- Effective Lagrangian approach
- Regge trajectory phenomenology

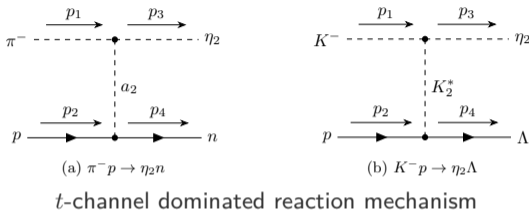
在 高能 散射 过程中，前向角区域通常由

t -channel exchange

主导，在本文中只考虑 t 道交换贡献。

其它道贡献

- s -channel: 贡献较小，可忽略
- u -channel: 贡献小，低能可忽略，高能 在后向角区域



$$\mathcal{L}_{T X P} = g_{T X P} T_{\mu\nu} X^{\mu\nu} P,$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{T N N} = & -2i \frac{g_{T N N}^{(1)}}{M} \bar{N} (\gamma_\lambda \partial_\sigma + \gamma_\sigma \partial_\lambda) N T^{\lambda\sigma} \\ & + 4 \frac{g_{T N N}^{(2)}}{M^2} \partial_\lambda \bar{N} \partial_\sigma N T^{\lambda\sigma}, \end{aligned}$$

其中 T 、 X 、 P 和 N 分别表示 赝张量介子场、张量介子场、赝标量介子场和核子场。

散射振幅

$\pi^- p \rightarrow \eta_2 n$

$$\mathcal{M}_{\pi^- p \rightarrow \eta_2 n} = g_{\eta_2 a_2 \pi} \epsilon_{\mu\nu}(\eta_2) \frac{\Pi^{\mu\nu;\lambda\sigma}}{t - m_{a_2}^2} \bar{u}(p_4) \left[\frac{g_{a_2 NN}^{(1)}}{M_N} (\gamma_\lambda P_\sigma + \gamma_\sigma P_\lambda) + \frac{g_{a_2 NN}^{(2)}}{M_N^2} P_\lambda P_\sigma \right] u(p_2) F_{a_2}^2(t)$$

Form Factor

$$F_{(t)} = \frac{\Lambda_t^2 - m_t^2}{\Lambda_t^2 - t}$$

Λ_t : 截断参数

$K^- p \rightarrow \eta_2 \Lambda$

$$\mathcal{M}_{K^- p \rightarrow \eta_2 \Lambda} = g_{\eta_2 K_2^* K} \epsilon_{\mu\nu}(K_2^*) \frac{\Pi^{\mu\nu;\lambda\sigma}}{t - m_{K_2^*}^2} \bar{u}(p_4) \left[\frac{g_{K_2^* N \Lambda}^{(1)}}{M_N} (\gamma_\lambda P_\sigma + \gamma_\sigma P_\lambda) + \frac{g_{K_2^* N \Lambda}^{(2)}}{M_N^2} P_\lambda P_\sigma \right] u(p_2) F_{K_2^*}^2(t)$$

衰变耦合常数 (单位: GeV)

$$\Gamma_{T \rightarrow XP} = \frac{k_f}{8\pi m_T^2} \frac{g_{TXP}^2}{45} \left(4 \frac{k_f^4}{m_X^4} + 30 \frac{k_f^2}{m_X^2} + 45 \right)$$

耦合常数	$\eta_2(4D)$	$\eta'_2(2D)$	$\eta'_2(3D)$	$\eta'_2(4D)$
$g_{\eta_2 a_2 \pi}$	1.104	0.955	0.698	0.566
$g_{\eta_2 K K_2^*}$	0.268	2.974	2.165	1.751

注: 衰变宽度值来源于 [Phys. Rev. D 110, 114049 \(2024\)](#) 理论计算结果

基于 SU(3) 味对称性的耦合常数

$$g_{f_2 NN}^{(1,2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} (4\alpha_{(1,2)} - 1) g_{a_2 NN}^{(1,2)},$$

$$g_{K_2^* N \Lambda}^{(1,2)} = -\frac{1}{\sqrt{3}} (1 + 2\alpha_{(1,2)}) g_{a_2 NN}^{(1,2)}$$

- $f_2 NN$ 顶点: $g^{(1)} = 6.45$, $g^{(2)} = 0$
[Phys.Lett.B 701 \(2011\)](#)
- $a_2 NN$ 顶点: $g^{(1)} = 1.4$
- $K_2^* N \Lambda$ 顶点: $g^{(1)} = -4.45$

Regge 化 t-通道处理

- 高能强子产生过程的普适描述方法，用来描述高动量情况下的截面效应。
- 将 Feynman 振幅中的传播子替换为 Regge 形式：

$$\frac{1}{t - m_{a_2}^2} \rightarrow \left(\frac{s}{s_{\text{scale}}} \right)^{\alpha_{a_2}(t)-2} \frac{\pi \alpha'_{a_2}(t)}{\Gamma[\alpha_{a_2}(t) - 1] \sin[\pi \alpha_{a_2}(t)]} \left(\frac{1 + e^{-i\pi \alpha_{a_2}(t)}}{2} \right),$$
$$\frac{1}{t - m_{K_2^*}^2} \rightarrow \left(\frac{s}{s_{\text{scale}}} \right)^{\alpha_{K_2^*}(t)-2} \frac{\pi \alpha'_{K_2^*}(t)}{\Gamma[\alpha_{K_2^*}(t) - 1] \sin[\pi \alpha_{K_2^*}(t)]} \left(\frac{1 + e^{-i\pi \alpha_{K_2^*}(t)}}{2} \right).$$

这里 s_{scale} 为质量标度，通常取 $s_{\text{scale}} = 1 \text{ GeV}^2$ 。 a_2 和 K_2^* 交换对应的雷杰轨迹参数化如下：

$$\alpha_{a_2}(t) = 0.8(t - m_{a_2}^2) + 2,$$
$$\alpha_{K_2^*}(t) = 0.83(t - m_{K_2^*}^2) + 2.$$

3

数值计算及其结果分析

产生截面计算

- 对于一般的 $2 \rightarrow 2$ 过程，质心系中的微分截面由下式给出：

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{64\pi s} \frac{1}{|\mathbf{p}_{1\text{cm}}|^2} |\overline{\mathcal{M}}|^2,$$

- 其中：
 - $s = (p_1 + p_2)^2$ 是质心系能量的平方
 - $\mathbf{p}_{1\text{cm}}$ 是质心系中入射 pion 介子或 Kaon 介子的动量
 - $|\overline{\mathcal{M}}|^2$ 表示平方散射振幅，对初态自旋求平均、末态自旋求和
- 质心系到实验系的转化：

$$p_{\text{cm}} = p_{\text{lab}} \frac{m_2}{E_{\text{cm}}}.$$

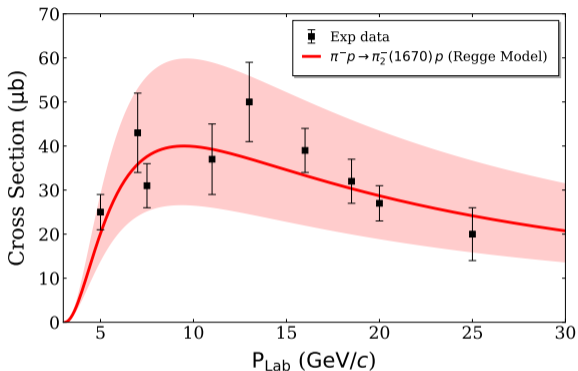
$\pi^- p \rightarrow \pi_2^-(1670)p$ 反应的截面

- 校准反应: $\pi^- p \rightarrow \pi_2^-(1670)p$ ($\pi_2(1670)$ 为已知赝张量介子, 实验数据充分);
- 实验数据: 选取 **Phys.Rev.D 7, 669 (1973)** 中 9 个数据点, 覆盖束流动量 $P_{\text{Lab}} = 3.1 \text{ GeV}/c \sim 30.0 \text{ GeV}/c$;

数据点	P_{Lab} (GeV/c)	σ (μb)	误差 (μb)
1	5.0	25	4
2	7.0	43	9
3	7.5	31	5
4	11.0	37	8
5	13.0	50	9
6	16.0	39	5
7	18.5	32	5
8	20.0	27	4
9	25.0	20	6

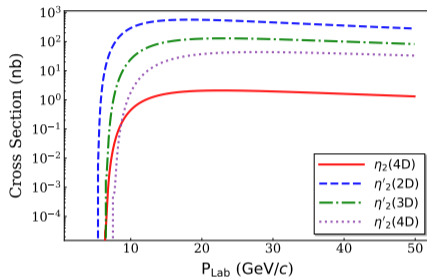
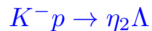
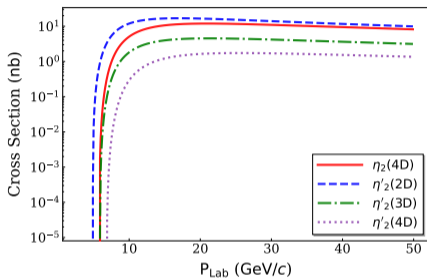
- 耦合常数: $g_{\pi_2(1670)f_2(1270)\pi} \simeq 5.439 \text{ GeV}$;
- f_2 介子 Regge 轨迹: $\alpha_{f_2}(t) = 0.9(t - m_{f_2}^2) + 2$;
- 拟合目标: 优化形式因子中的截断参数 Λ , 最小化 χ^2/dof (自由度);

拟合结果分析



- 最优截断参数: $\Lambda = 0.762 \pm 0.028$ GeV
- 拟合优度: $\chi^2/\text{dof} = 1.006$ (理论与实验高度吻合)
- 从图中可观察到截面随 P_{Lab} 的典型演化趋势, 符合 Regge 唯象学对高能强子反应的描述。

产生截面特性分析



$$\pi^- p \rightarrow \eta_2 n \text{ (nb)}$$

$$K^- p \rightarrow \eta_2 \Lambda \text{ (nb)}$$

展张量态

	$\eta_2(4D)$	$\eta'_2(2D)$	$\eta'_2(3D)$	$\eta'_2(4D)$	$\eta_2(4D)$	$\eta'_2(2D)$	$\eta'_2(3D)$	$\eta'_2(4D)$
--	--------------	---------------	---------------	---------------	--------------	---------------	---------------	---------------

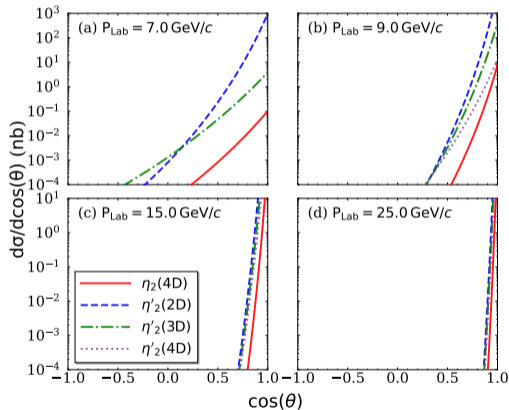
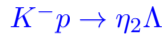
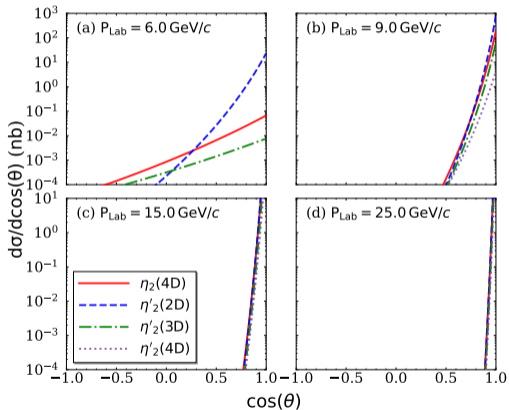
阈值 (GeV/c)

阈值 (GeV/c)	5.9	4.9	5.9	6.9	6.4	5.4	6.5	7.5
峰值截面	11.95	16.91	4.54	1.74	2.11	566.92	129.39	43.70
峰值位置 (GeV/c)	20.9	16.9	21.3	25.6	22.7	18.2	23.1	27.9

峰值截面

峰值位置 (GeV/c)

微分散射截面的角度分析



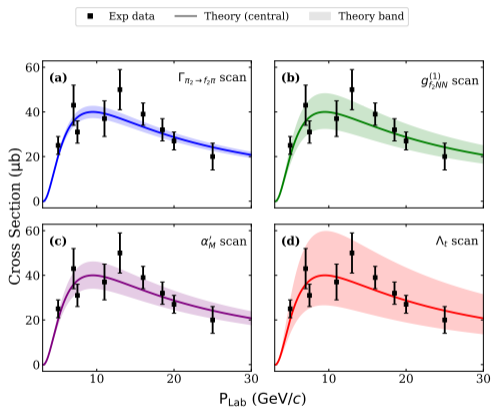
理论不确定性来源

不确定性主要来源于：

- (a) 耦合常数 $g_{\eta_2 a_2 \pi^-}$ 与 $g_{\eta_2 K K_2^*}$ 由衰变宽度 $\Gamma_{T \rightarrow X P}$ 反推得到，具有显著模型依赖性。
- (b) 介子-核子-核子（或超子）顶点耦合常数基于 SU(3) 味对称性确定，但实际过程中该对称性存在破缺，尤其在含奇异夸克顶点（如 $K_2^* N \Lambda$ ）中更为明显。
- (c) 采用了常用的 Regge 轨迹斜率参数，带来一定模型依赖。
- (d) 单极形状因子：

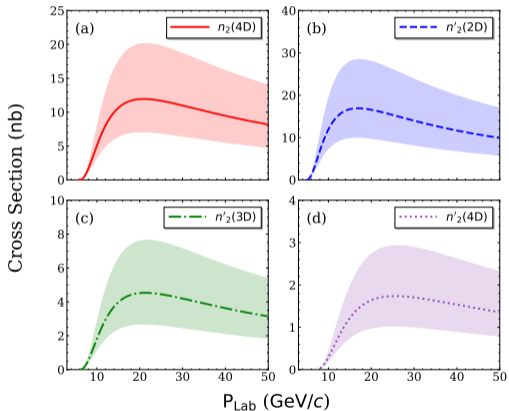
$$F(t) = \frac{\Lambda_t^2 - m_t^2}{\Lambda_t^2 - t}$$

其中 Λ_t 由拟合 $\pi^- p \rightarrow \pi_2(1670)p$ 实验数据确定，并推广至 π 和 K^- 诱导反应，其取值直接影响截面大小。

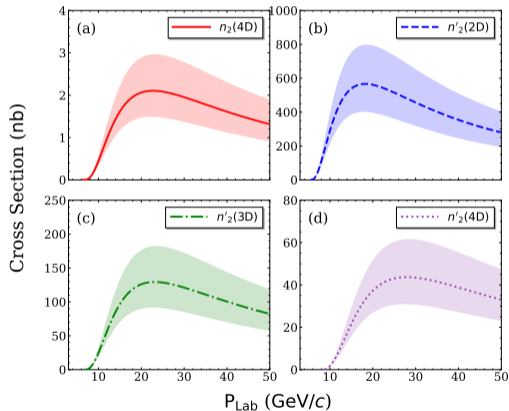


截断参数对散射截面的影响

$$\pi^- p \rightarrow \eta_2 n$$



$$K^- p \rightarrow \eta_2 \Lambda$$



4

总结与展望

研究背景与方法

以 BESIII 关于 $X(2600)$ 的研究为动机，围绕同位旋张量介子产生机制展开研究。基于有效拉氏量方法结合 Regge 唯象学，建立了适用于 $\pi^- p \rightarrow \eta_2 n$ 与 $K^- p \rightarrow \eta_2 \Lambda$ 的理论框架。

主要结果

- 产生截面特性：**不同态在 π^- 与 K^- 诱导反应中表现出显著的束流依赖性： $\eta_2(4D)$ 在 π^- 反应中占优，其余态在 K^- 反应中增强。
- 动力学特征：**微分截面在小动量转移区域呈前向增强，体现典型的 t 道 Regge 交换机制。
- 能量依赖规律：**总截面在阈值附近迅速上升，达到峰值后随束流动量增加缓慢下降；不同态对应不同最佳产生能区。
- 模型稳定性：**参数分析表明：截断参数仅影响绝对大小，不改变相对关系与动力学特征，结果具有良好稳定性与可靠性。

现有工作的不足

- 当前模型主要聚焦于 t 道主导机制，尚未系统纳入 s 、 u 道及其干涉效应；
- 顶点耦合常数多依赖 SU(3) 味对称性或唯象模型估计，缺乏高精度实验数据的直接约束；
- 未考虑耦合道效应及末态再散射过程，其对截面可能产生重要修正；
- 高激发张量介子的可能混合结构尚未在动力学框架中得到体现。

未来发展方向

- **实验驱动**：给 J-PARC、COMPASS、CERN-SPS 等国际实验平台提供理论建议并依托其获取更高精度与更丰富反应道数据，从而对理论模型进行严格检验与约束；
- **理论完善**：构建包含 s 、 t 、 u 道在内的统一动力学描述；引入耦合道效应及末态相互作用，提高计算的物理完备性；基于实验数据对关键参数进行全局拟合，提升模型预测能力。

谢 谢 大 家!

敬请批评和指正

卢东恩

18932732130@163.com

第五届强子与重味物理理论与实验联合研讨会

2026.03.30