



兰州理工大学

LANZHOU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

第一届介子束流物理研讨会

基于介子束流实验的轻介子谱 及隐奇异五夸克态产生研究

报告人：高源

指导老师：王晓云 刘翔

2024 年 12 月 28 日

X. Y. Wang, F. C. Zeng and X. Liu, Phys. Rev. D 106, 036005 (2022).

X. Y. Wang, H. F. Zhou and X. Liu, Phys. Rev. D 108, 034015 (2023).

X. Y. Wang, H. F. Zhou and X. Liu, Phys. Rev. D 110, 014026 (2024).

X. Y. Wang, Y. Gao and X. Liu, [arXiv:2408.17076 [hep-ph]]. Accepted
by PRD

目录

01

研究背景与意义

02

轻介子 $\eta_1(1855)$, $a_0(1817)$ 的产生

03

隐奇异五夸克态 $P_{s\bar{s}}$ 的产生

04

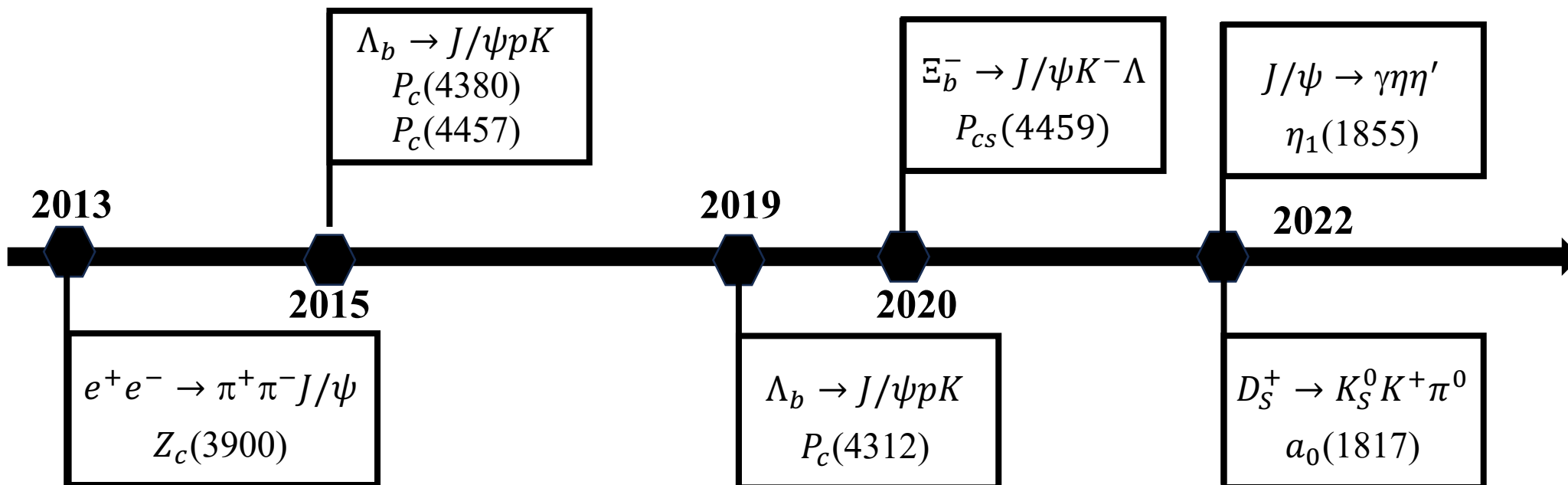
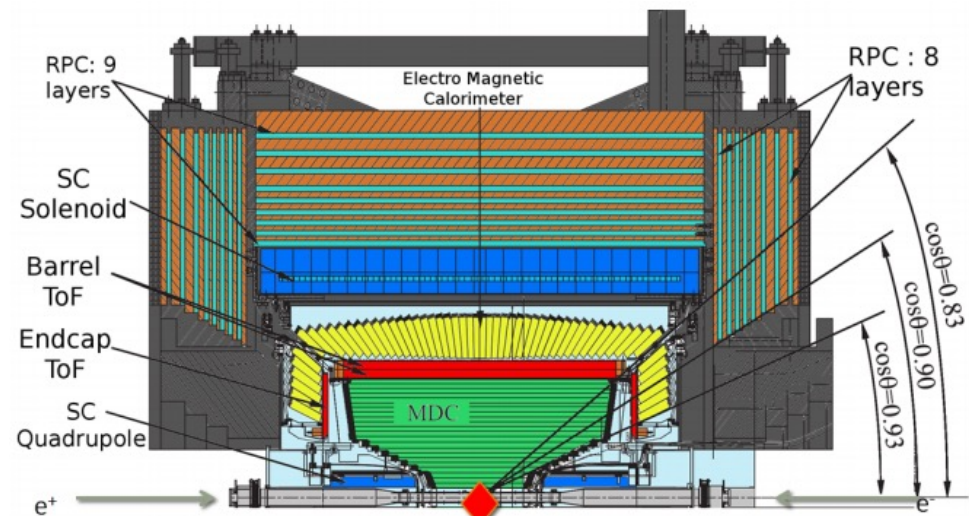
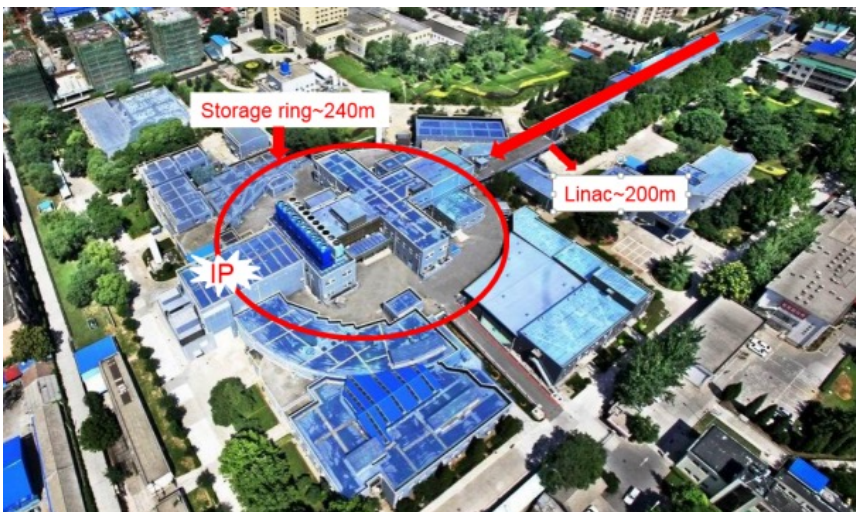
结果与展望



研究背景与意义

01

BESIII experiment

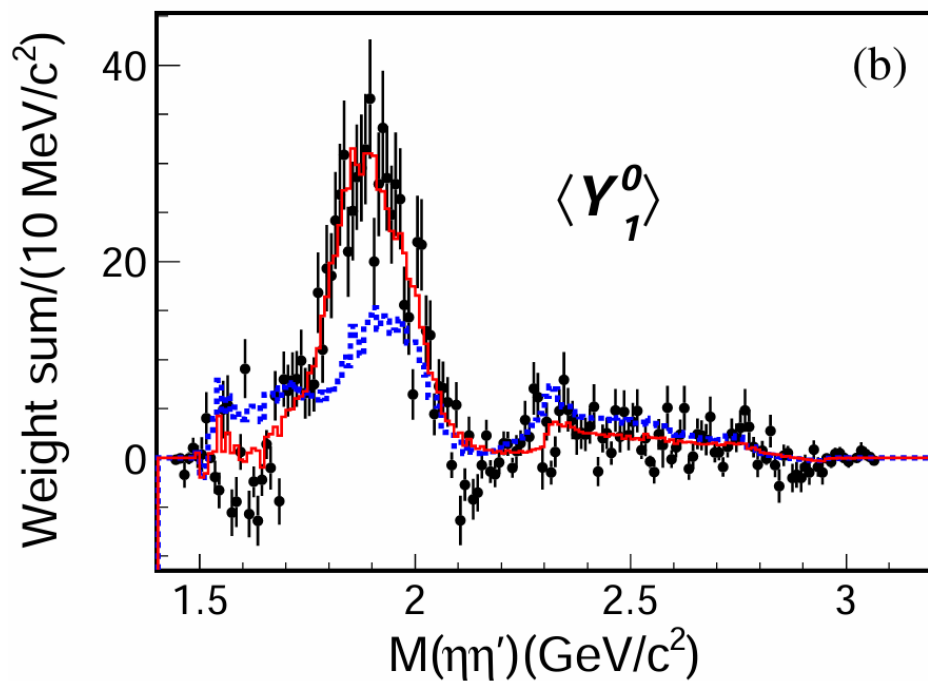


02

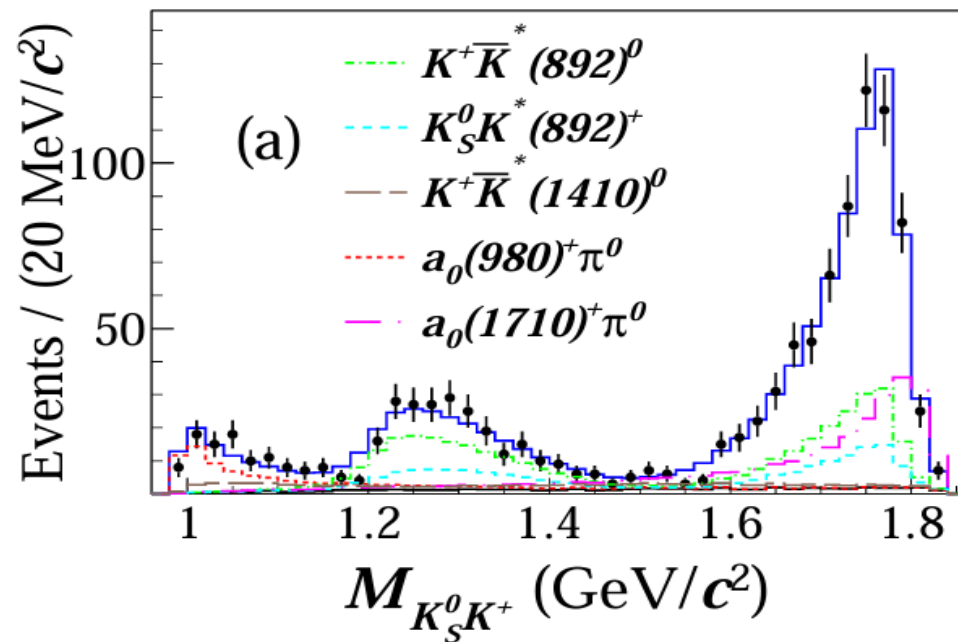
轻介子 $\eta_1(1855)$, $a_0(1817)$
的产生

发现 $\eta_1(1855)$ 和 $a_0(1817)$

2022年，通过分析 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\eta'$ 衰变过程，BESIII合作组在 $\eta\eta'$ 的不变质量谱中发现了 $\eta_1(1855)$ 。



通过分析 $D_S^+ \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^0$ 衰变过程，BESIII合作组在 $K_S^0 K^+$ 的不变质量谱中发现了 $a_0(1817)$ 。





$\eta_1(1855)$

- $\eta_1(1855)$ 不能归为传统的强子态，这是一个很好的奇特态候选者；
- 在目前的理论中， $\eta_1(1855)$ 被解释为混杂态，分子态和四夸克态。
- $\eta_1(1855)$ 可以被认为是 $K\bar{K}(1400)$ 分子态

TABLE I. The masses, widths, $\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \gamma X \rightarrow \gamma\eta\eta')$ or $\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \eta' h_1 \rightarrow \gamma\eta\eta')$ (B.F.), and statistical significances (Sig.) for each component in the baseline set of amplitudes. The first uncertainties are statistical, and the second are systematic.

Resonance	M (MeV/ c^2)	Γ (MeV)	B.F.($\times 10^{-5}$)	Sig.
$f_0(1500)$	1506	112	$1.81 \pm 0.11^{+0.19}_{-0.13}$	$>30\sigma$
$f_0(1810)$	1795	95	$0.11 \pm 0.01^{+0.04}_{-0.03}$	11.1σ
$f_0(2020)$	$2010 \pm 6^{+6}_{-4}$	$203 \pm 9^{+13}_{-11}$	$2.28 \pm 0.12^{+0.29}_{-0.20}$	24.6σ
$f_0(2330)$	$2312 \pm 7^{+7}_{-3}$	$65 \pm 10^{+3}_{-12}$	$0.10 \pm 0.02^{+0.01}_{-0.02}$	13.2σ
$\eta_1(1855)$	$1855 \pm 9^{+6}_{-1}$	$188 \pm 18^{+3}_{-8}$	$0.27 \pm 0.04^{+0.02}_{-0.04}$	21.4σ
$f_2(1565)$	1542	122	$0.32 \pm 0.05^{+0.12}_{-0.02}$	8.7σ

X. K. Dong, Y. H. Lin and B. S. Zou, Sci. China Phys. Mech. Astron. 65, 261011 (2022).

H. X. Chen, N. Su and S. L. Zhu, Chin. Phys. Lett. 39, 051201(2022).

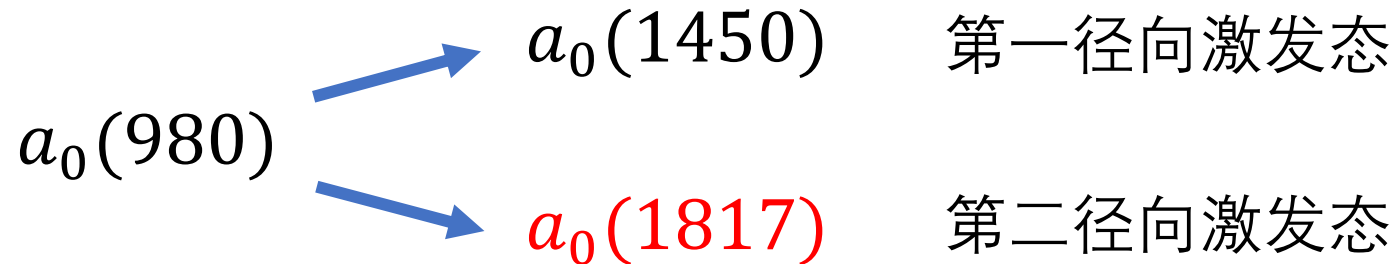
B. D. Wan, Eur. Phys. J. C 84, 760 (2024).

X. K. Dong, Y. H. Lin and B. S. Zou, Sci. China Phys. Mech. Astron. 65, 261011(2022).



$a_0(1817)$

BaBar : $M=1.704\pm 0.005(\text{stat.}) \pm 0.002(\text{syst.}) \text{ GeV}$,
 $\Gamma=0.110 \pm 0.015(\text{stat.}) \pm 0.011(\text{syst.}) \text{ GeV}$
BESIII : $M=1.817\pm 0.008(\text{stat.}) \pm 0.020(\text{syst.}) \text{ GeV}$,
 $\Gamma=0.097 \pm 0.022(\text{stat.}) \pm 0.015(\text{syst.}) \text{ GeV}$

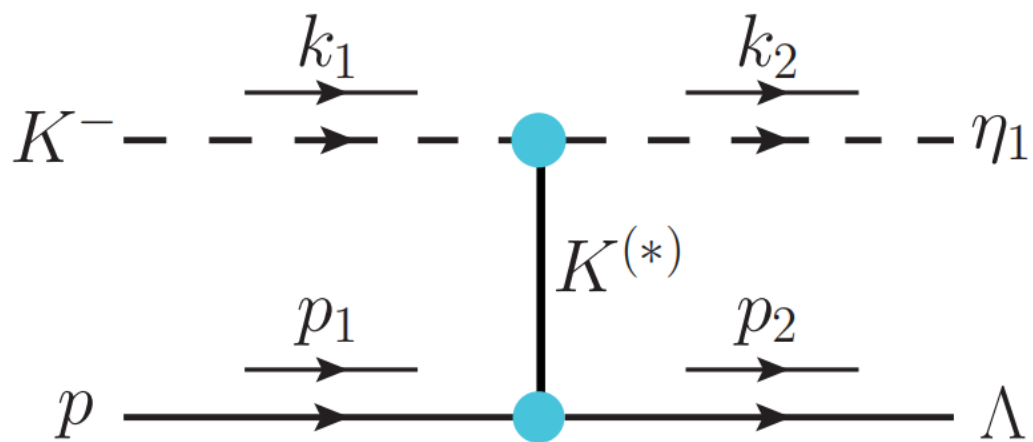


先前的研究已经考虑了 $a_0(980)$ 作为一个四夸克态的可能性，以及 $a_0(1450)$ 作为一个包含双夸克和四夸克组合的混合态的可能性。

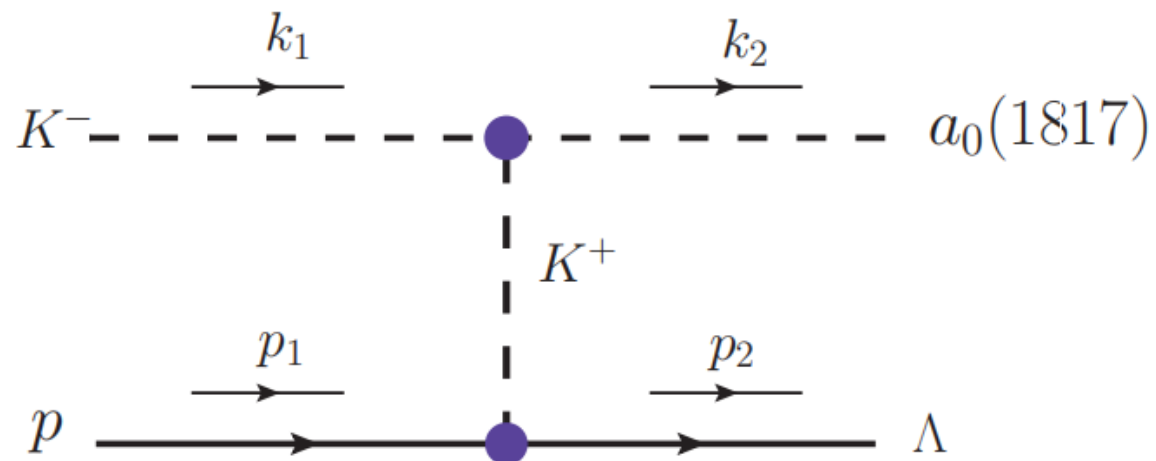
费曼图



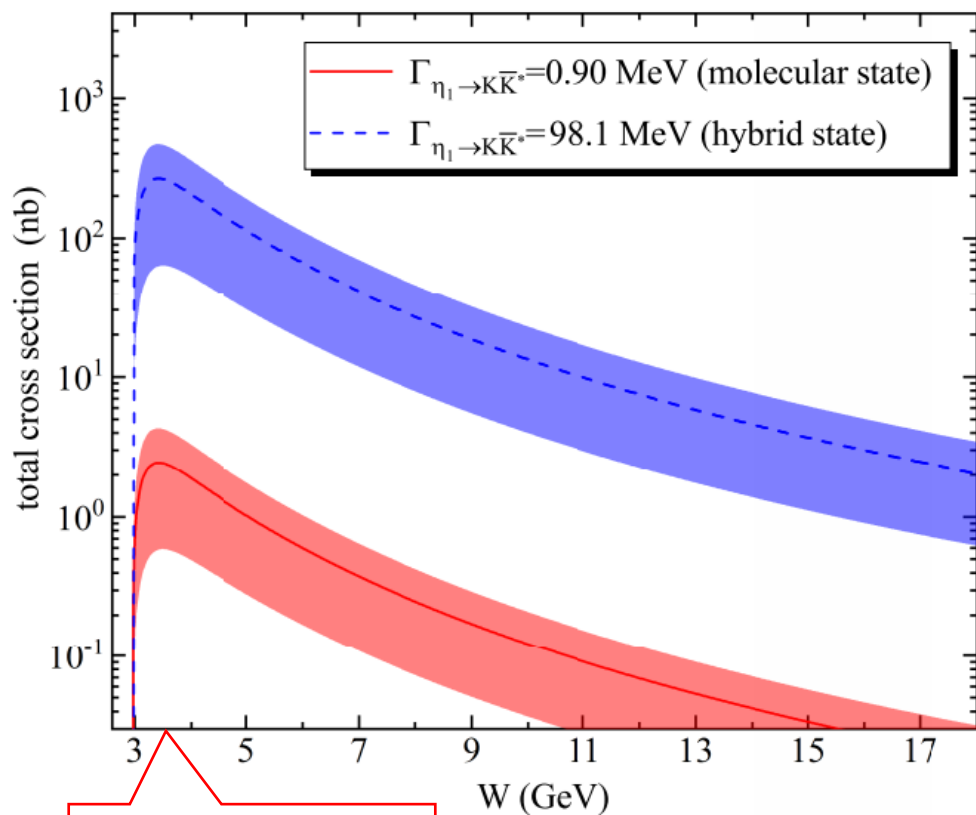
$$K^- p \rightarrow \eta_1(1855) \Lambda$$



$$K^- p \rightarrow a_0(1817) \Lambda$$

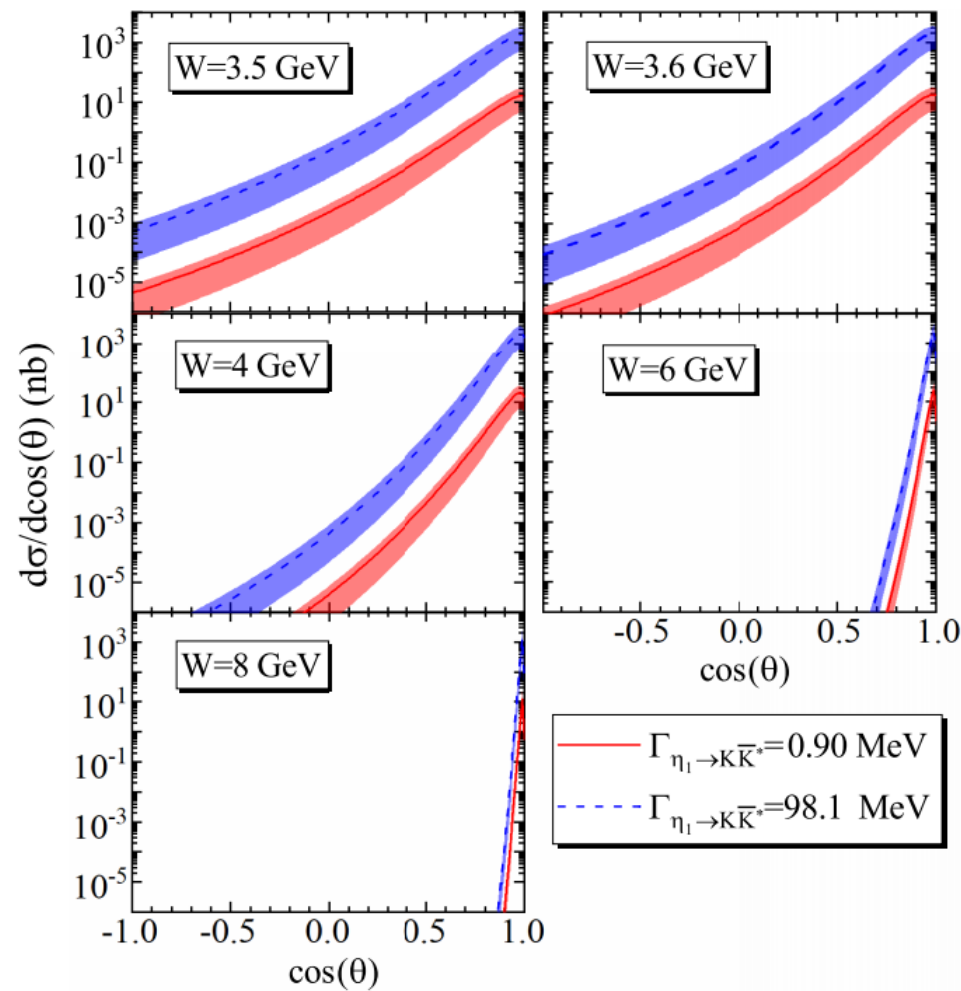


$K^- p \rightarrow \eta_1(1855)\Lambda$ 截面



3.4 - 3.6 GeV

总截面

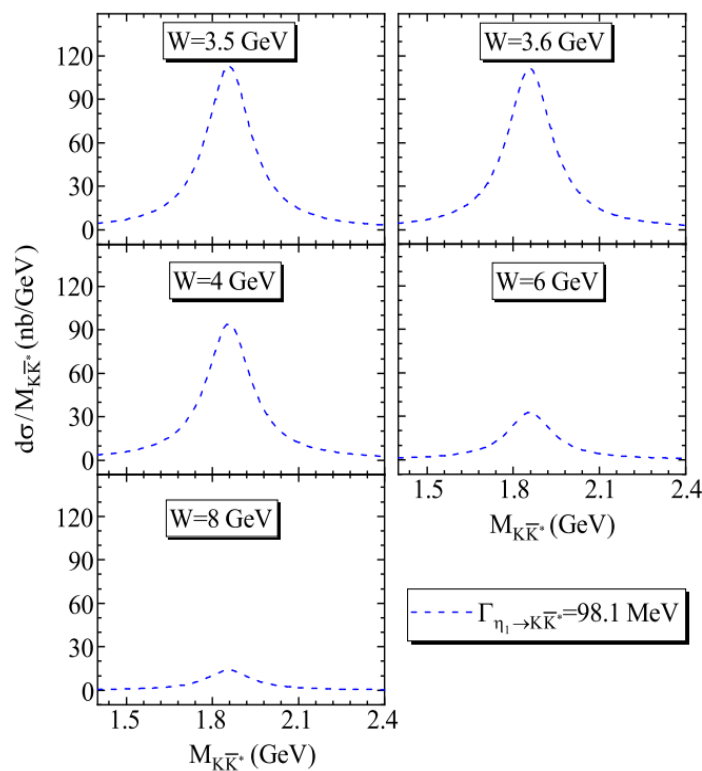


微分截面

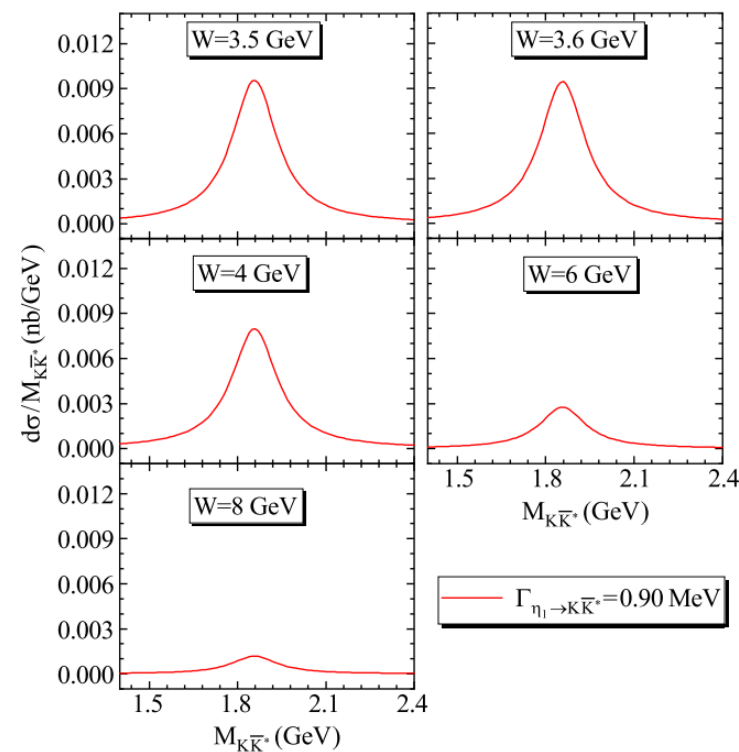
Dalitz过程

$$K^- p \rightarrow \eta_1(1855) \Lambda \rightarrow K \bar{K}^* \Lambda$$

计算质心能 $W=3.5-8$ GeV 的不变质量谱，发现在 $M_{K\bar{K}^*} = 1.86$ GeV 处存在明显峰值



混杂态



分子态

$$\frac{\sigma(K^- p \rightarrow \eta_1(1855)\Lambda \rightarrow K\bar{K}^*\Lambda)}{\sigma(K^- p \rightarrow K\bar{K}^*\Lambda)}$$



$$K^* \rightarrow K\pi \approx 100\%$$

$$\frac{\sigma(K^- p \rightarrow \eta_1(1855)\Lambda \rightarrow K\bar{K}\pi\Lambda)}{\sigma(K^- p \rightarrow K\bar{K}\pi\Lambda)}$$

$$W = 3.5 \text{ GeV}$$

混杂态



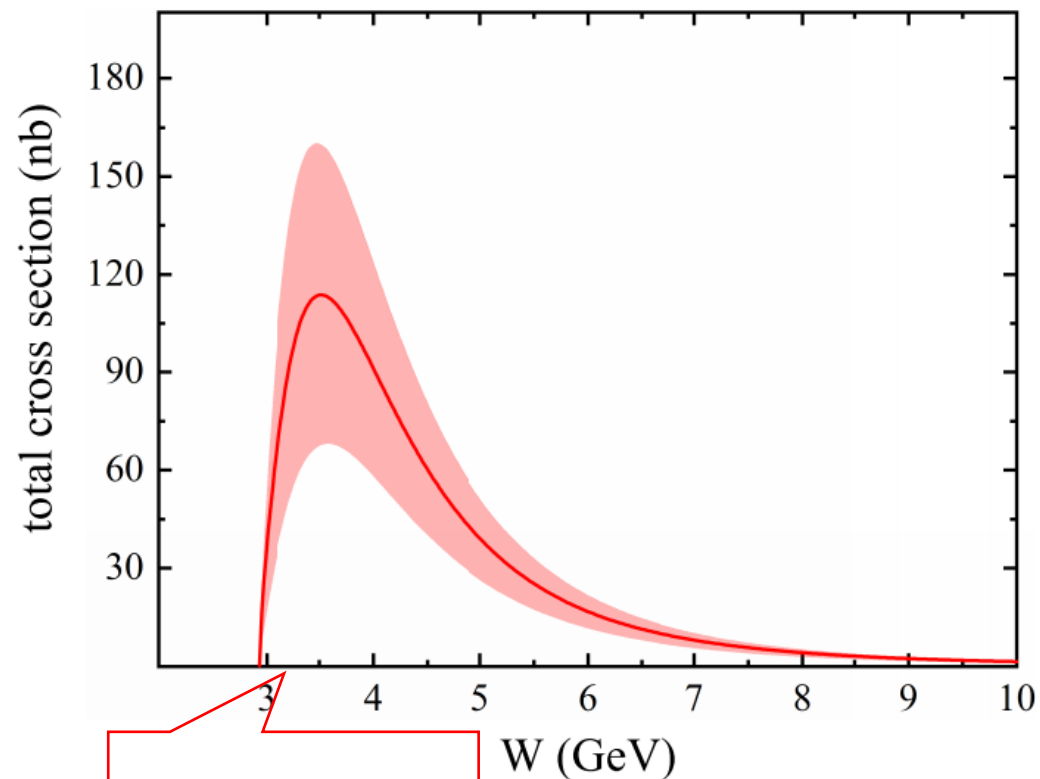
$$\approx 0.085\%$$

分子态

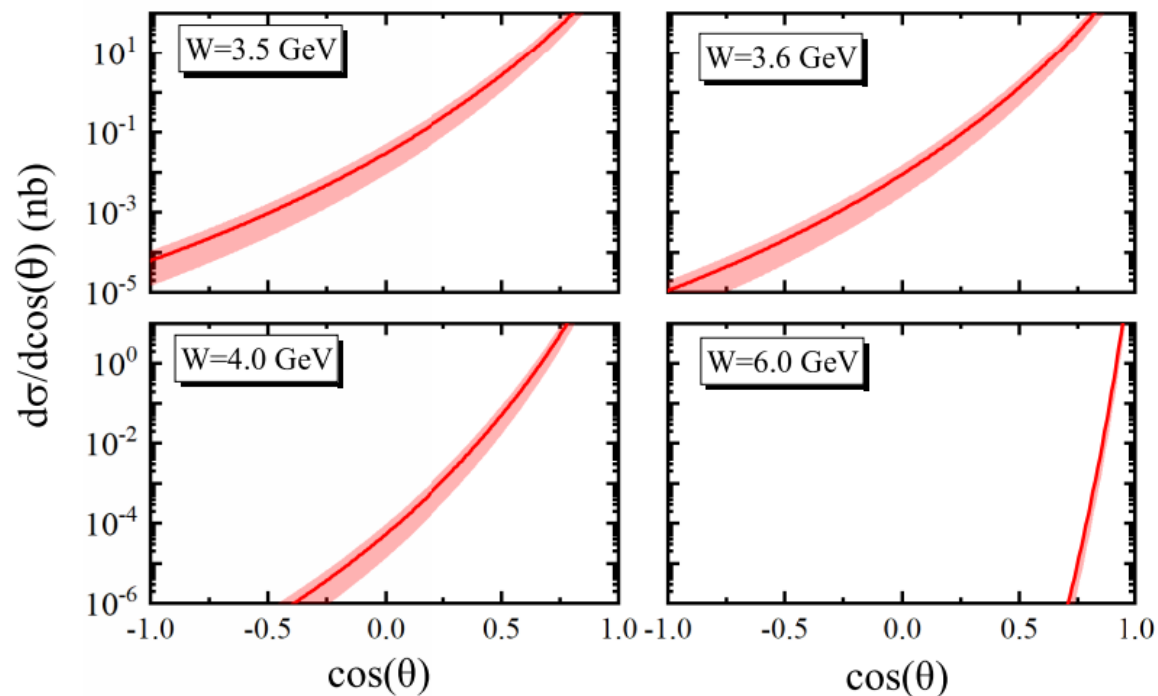


$$\approx 0.0000072\%$$

$K^- p \rightarrow a_0(1817)\Lambda$ 截面



总截面



微分截面

Dalitz过程

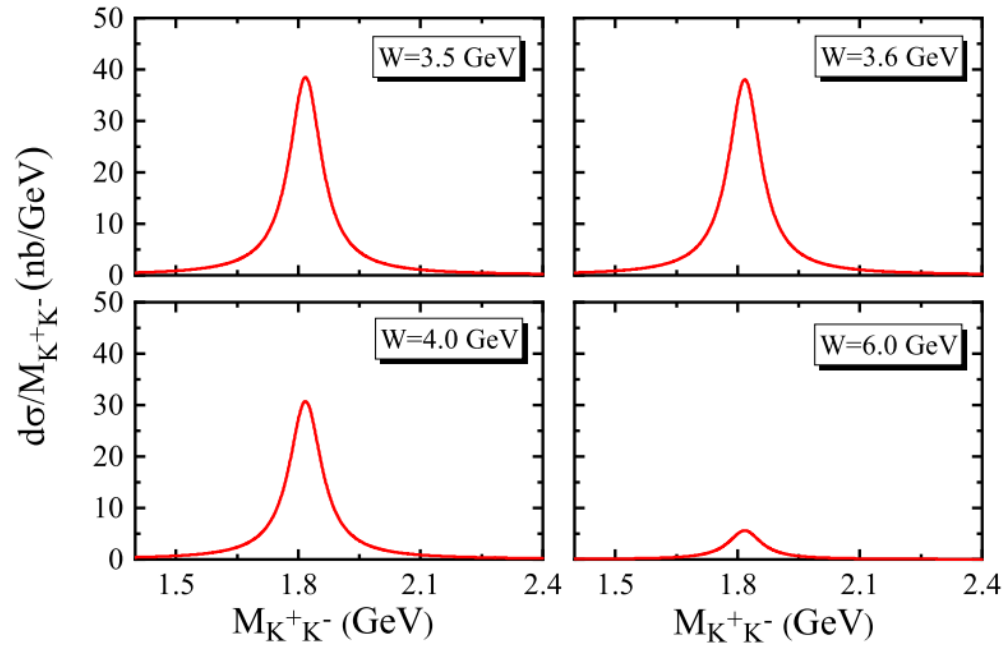
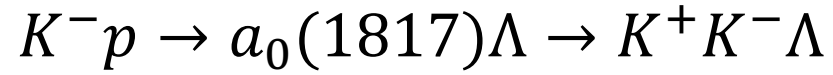


FIG. 5. The invariant-mass distribution $d\sigma_{K^-p \rightarrow a_0\Lambda \rightarrow K^+K^-\Lambda}/dM_{K^+K^-}$ reactions at different c.m. energies $W = 3.5, 3.6, 4.0, 6.0$ GeV.

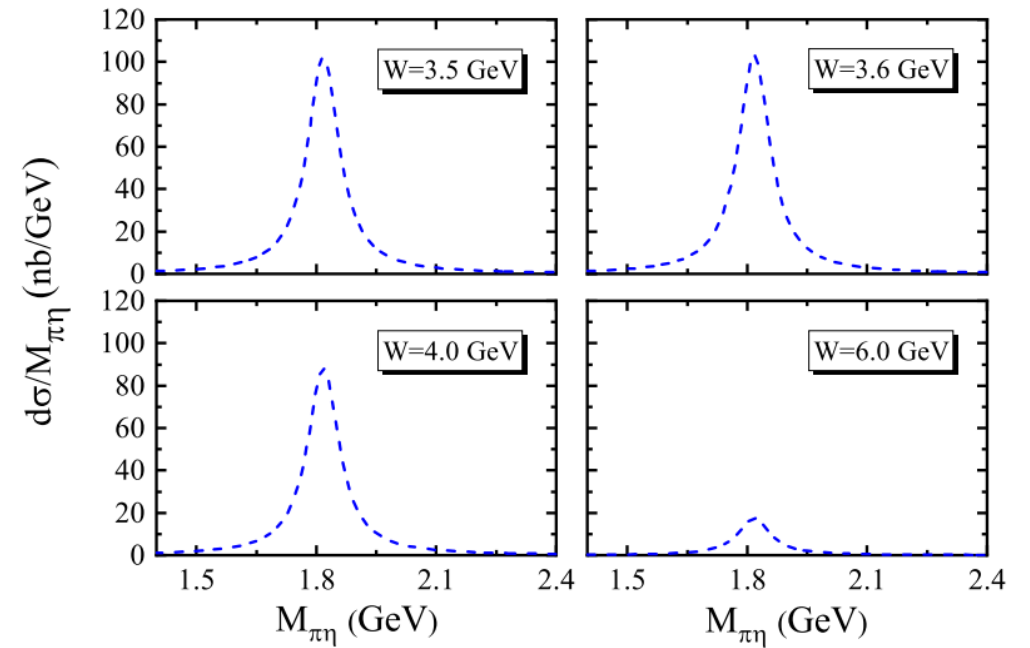
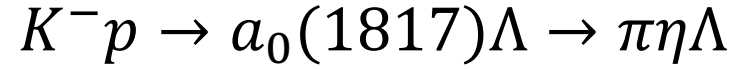


FIG. 6. The invariant-mass distribution $d\sigma_{K^-p \rightarrow a_0(1817)\Lambda \rightarrow \pi\eta\Lambda}/dM_{\pi\eta}$ reactions at different c.m. energies $W = 3.5, 3.6, 4.0, 6.0$ GeV.



$$\sigma(K^-p \rightarrow a_0(1817)\Lambda \rightarrow K^+K^-\Lambda) \approx \mathbf{5.72nb}$$

$$\frac{\sigma(K^-p \rightarrow a_0(1817)\Lambda \rightarrow K^+K^-\Lambda)}{\sigma(K^-p \rightarrow K^+K^-\Lambda)} \approx \mathbf{0.016\%}$$

$$W = 3.37 \text{ GeV}$$

$$\sigma(K^-p \rightarrow a_0(1817)\Lambda \rightarrow \pi\eta\Lambda) \approx \mathbf{25.40nb}$$

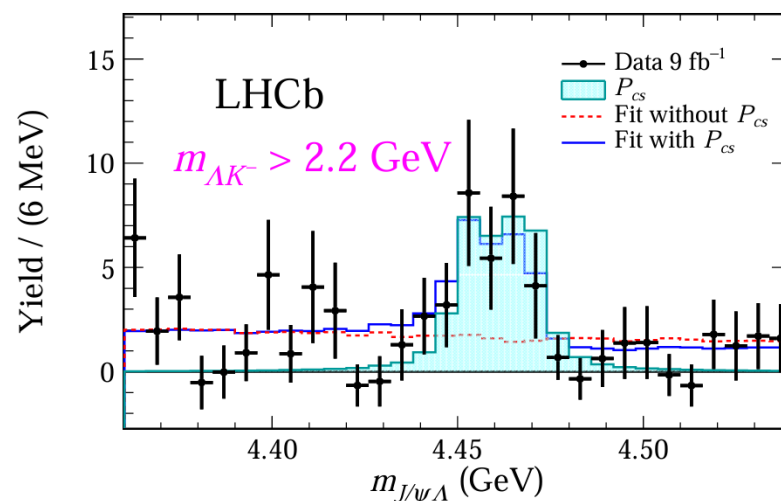
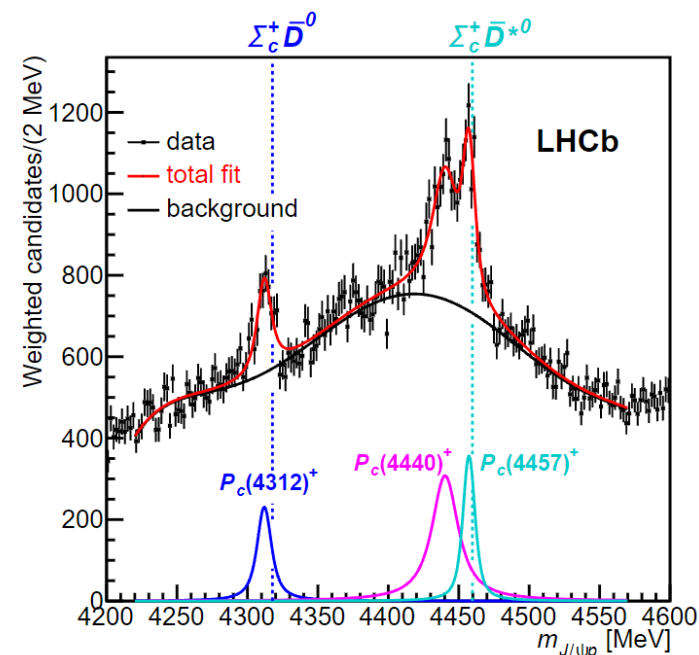
基于目前的实验条件，通过 $K^-p \rightarrow \pi\eta\Lambda$ 中检测 $a_0(1817)$ 比 $K^-p \rightarrow K^+K^-\Lambda$ 更可行。

03

隐奇异五夸克态
 $P_{s\bar{s}}$ 的产生

发现五夸克态

- 2015年，LHCb合作组在 $J/\psi p$ 的不变质量谱中宣布观测到两个隐粲五夸克态 $P_c(4380)$ 和 $P_c(4450)$ ；
- 2019年，又发现了一个新的五夸克态 $P_c(4312)$ ；
- 2020年，LHCb合作组在 $J/\psi \Lambda$ 不变质量谱中报告了含奇异数的隐粲五夸克态 $P_{cs}(4459)^0$ 的首个证据。



R. Aaij et al. [LHCb], Phys. Rev. Lett. 115, 072001 (2015).

R. Aaij et al. [LHCb], Phys. Rev. Lett. 122, 222001 (2019).

R. Aaij et al. [LHCb], Sci. Bull. 66, 1278-1287 (2021).

隐奇异五夸克态

$$\gamma p \rightarrow J/\psi p$$

从光生实验中获得隐粲五夸克态？

在 J/ψ 光生实验中尚未获得含隐粲五夸克态存在的证据

隐粲五夸克态



隐奇异五夸克态



$P_c(4457)$

奇异伙伴

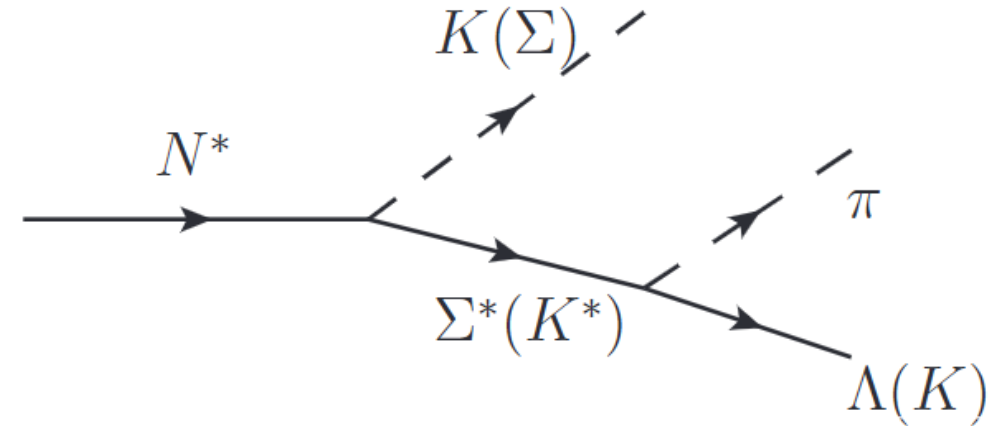


$N^*(2080)$

隐奇异五夸克态

在先前的工作中，采用有效拉氏量方法计算了 $J^P = \frac{3}{2}^-$ 的 $N^*(2080)$ 作为s波 $K^*\Sigma$ 分子态的衰变模式。

结果表明， $N^*(2080)$ 的总宽度得到了很好的再现，支持了该状态的分子态解释。

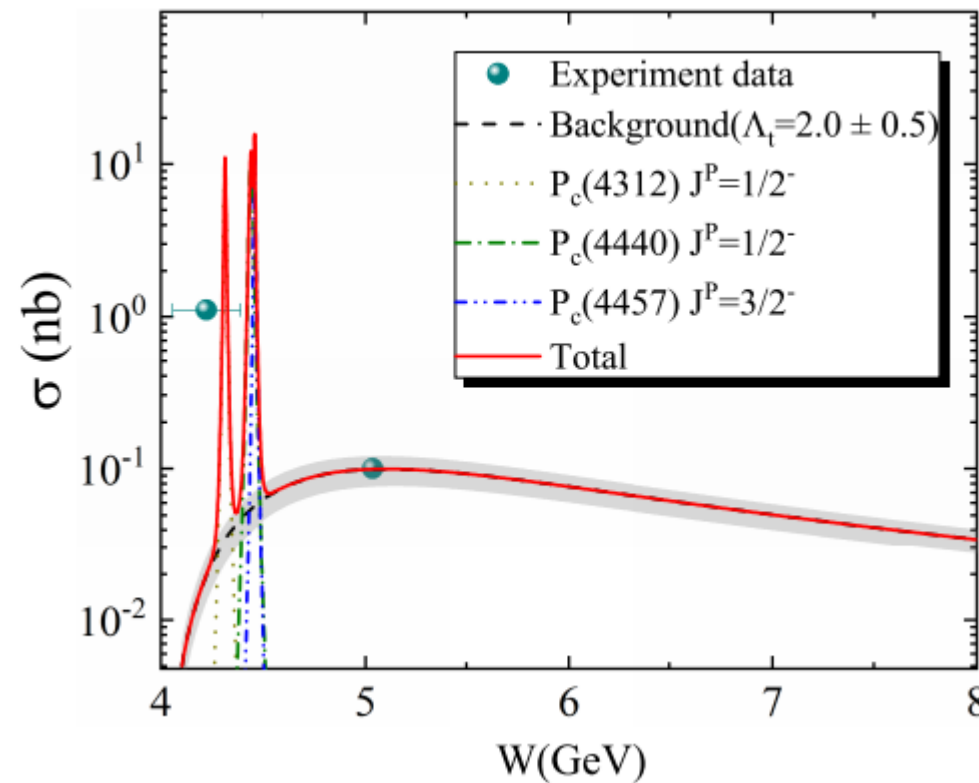
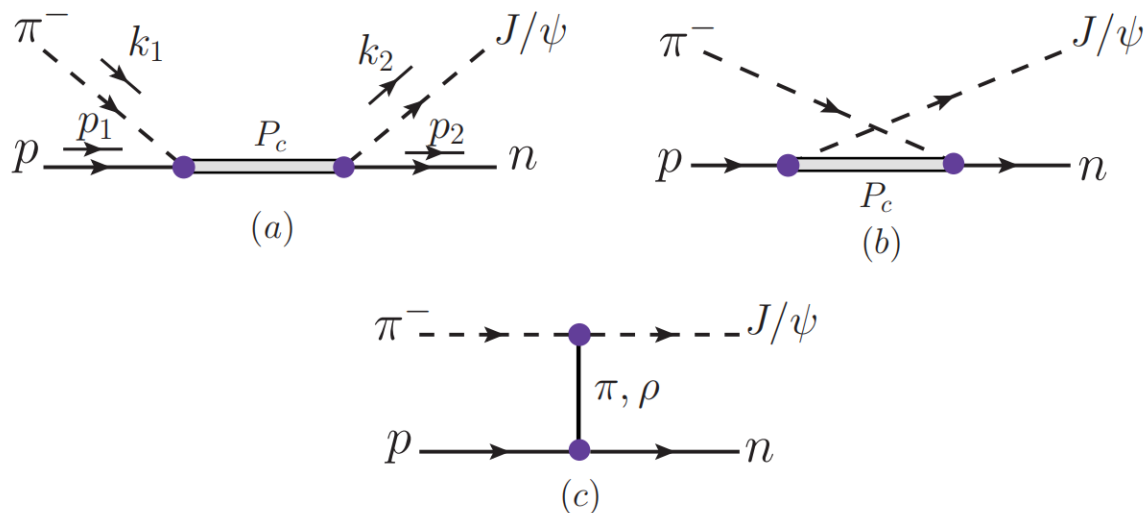


最新的PDG显示，先前确定的双星核子共振 $N^*(2080)$ 被分为三星 $N(1875)$ 和二星 $N(2120)$ 。因此，在我们最新的工作中，不再使用 $N^*(2080)$ 来表示参考文献中所考虑的隐奇异分子型五夸克态。

$$N^*(2080) \left(\frac{3}{2}^- \right) \rightarrow P_{s\bar{s}} \left(\frac{3}{2}^- \right)$$

$$N^*(2080) \left(\frac{1}{2}^- \right) \rightarrow P_{s\bar{s}} \left(\frac{1}{2}^- \right)$$

寻找隐奇异五夸克态



$P_c : \pi^- p \rightarrow J/\psi n \longrightarrow P_{s\bar{s}} : \pi^- p \rightarrow \phi n$

温伯格复合规则 $g_{K^*\Sigma P^*}^2 = \frac{4\pi}{4M_{P^*}M_\Sigma} \frac{(M_{K^*} + M_\Sigma)^{5/2}}{(M_{K^*}M_\Sigma)^{1/2}} \sqrt{32\epsilon}, \longrightarrow P_{s\bar{s}} : \pi^- p \rightarrow K^*\Sigma$

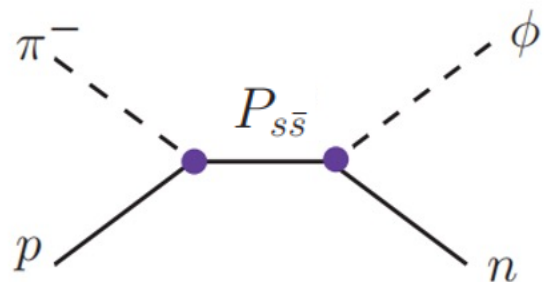
X. Y. Wang, J. He, X. R. Chen, Q. Wang, and X. Zhu, Phys. Lett. B 797, 134862 (2019).

D. Ben, A. C. Wang, F. Huang and B. S. Zou, Phys. Rev. C 108, 065201 (2023).

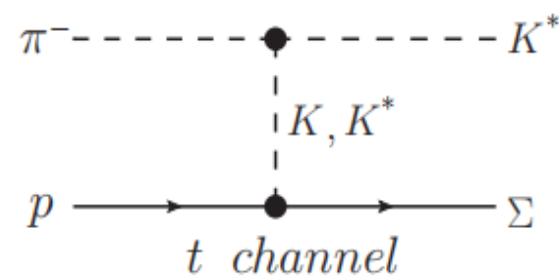
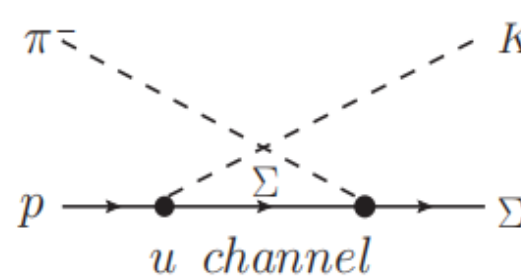
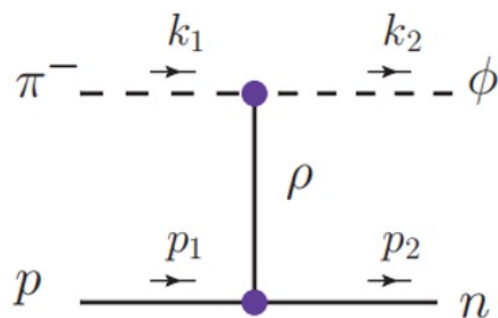
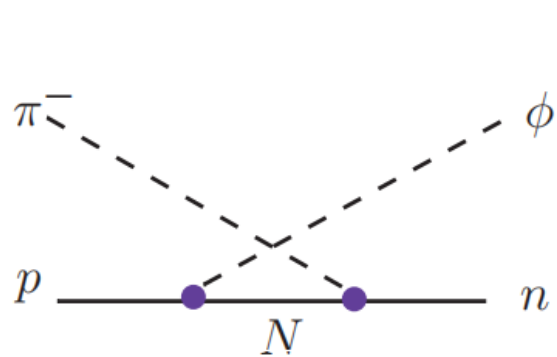
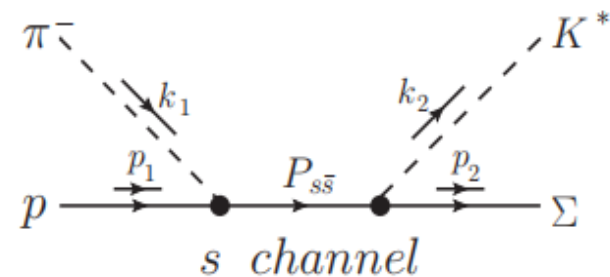
费曼图



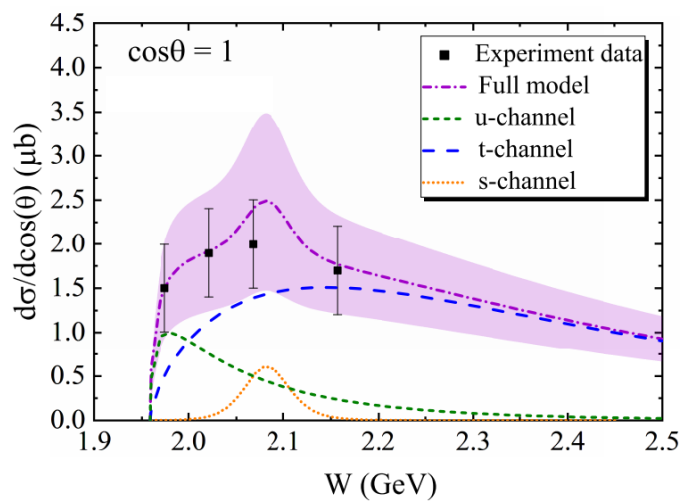
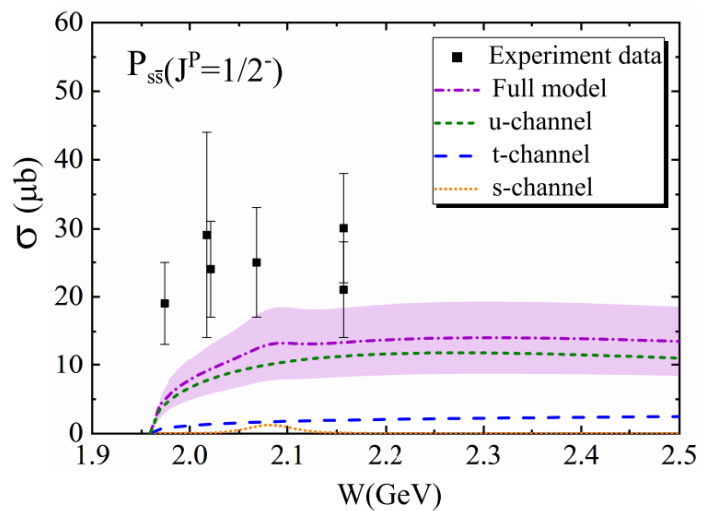
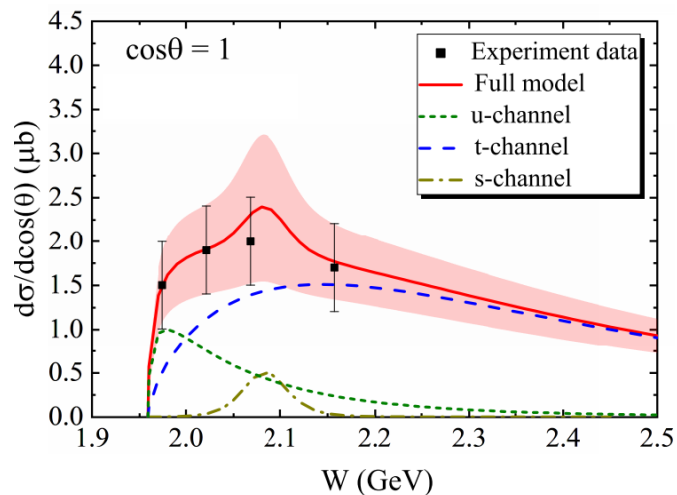
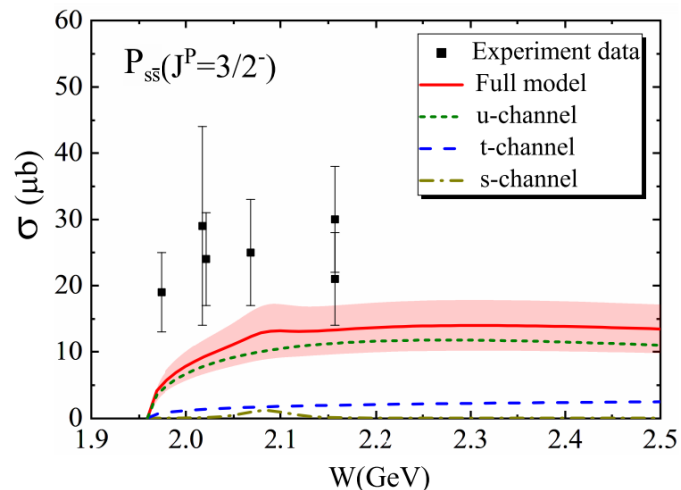
$$\pi^- p \rightarrow \phi n$$



$$\pi^- p \rightarrow K^* \Sigma$$



$\pi^- p \rightarrow \phi n$ 截面



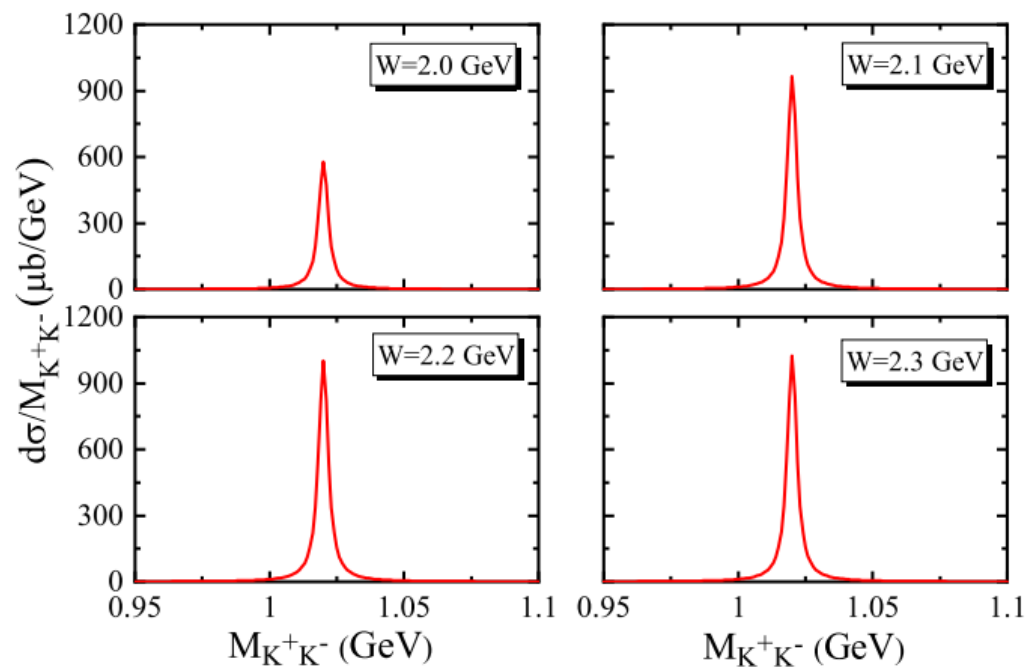
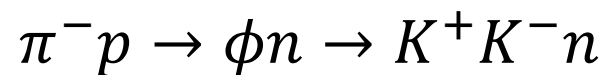
总截面

微分截面

s道 $P_{s\bar{s}}$ 交换的贡献对前向角的微分截面很敏感，在阈值附近提供了一个峰值



Dalitz过程



质心能: 2.0~2.3 GeV

$M_{K^+K^-} = 1.02 \text{ GeV}$

峰值 $\geq 577 \mu\text{b}/\text{GeV}$



$W = 2.15 \text{ GeV}$

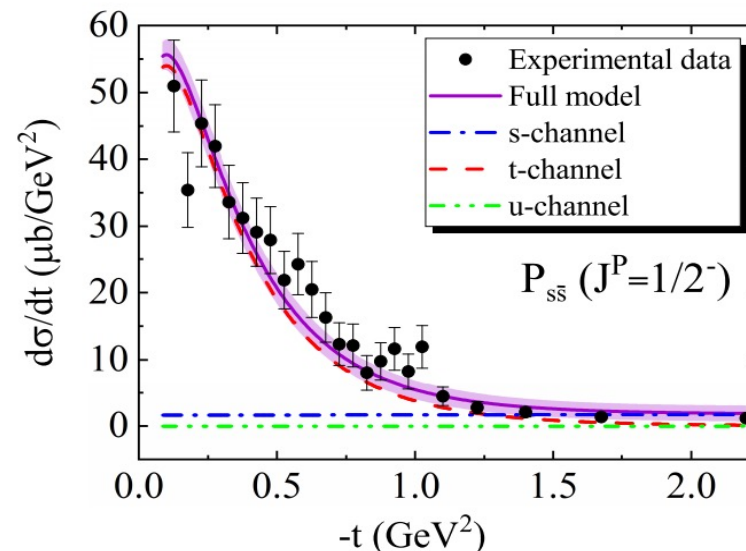
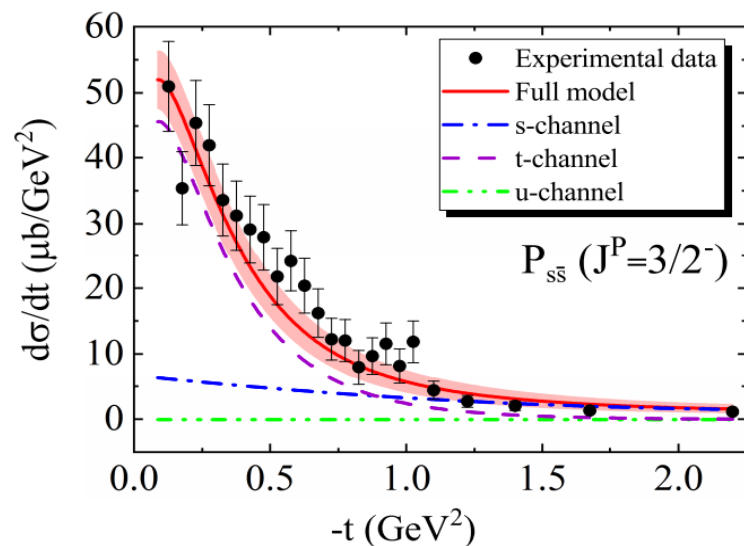
$$\frac{\sigma(\pi^- p \rightarrow \phi n \rightarrow K^+ K^- n)}{\sigma(\pi^- p \rightarrow K^+ K^- n)} \approx 16.7\%$$

其中s通道 $P_{s\bar{s}}$ 交换的贡献占0.13%，接近50 nb。

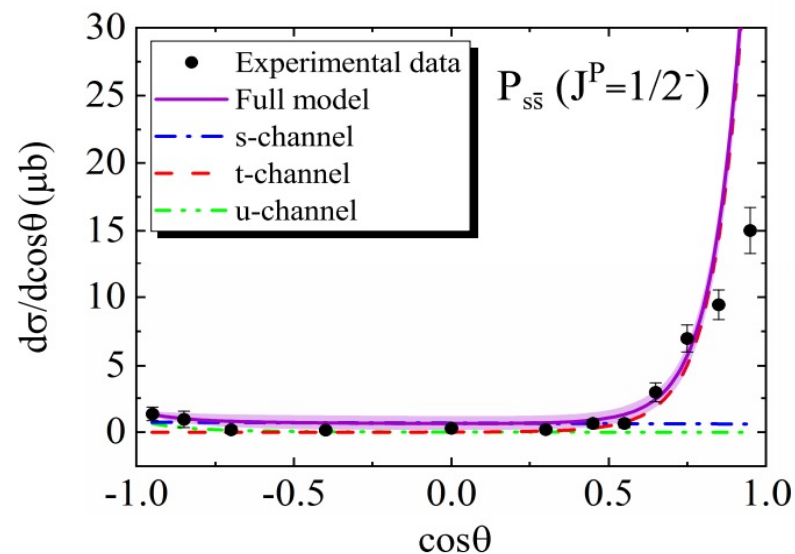
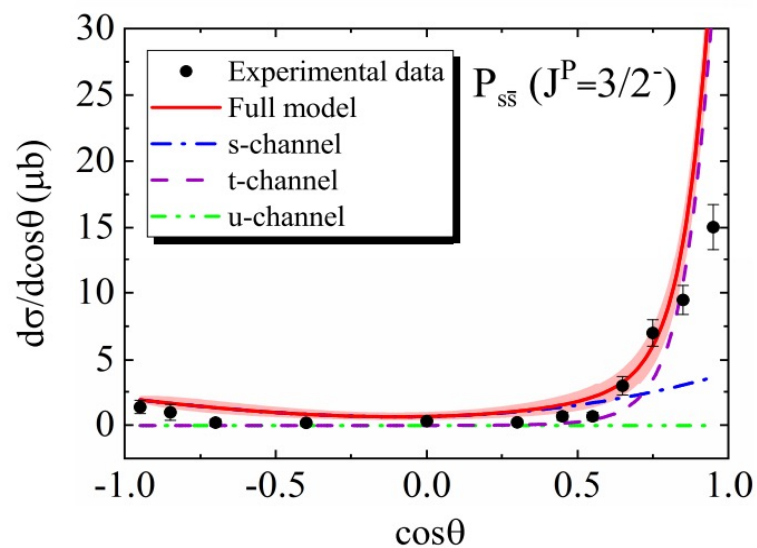
此外，s通道 $P_{s\bar{s}}$ 交换对应的 $\pi^- p \rightarrow \phi n \rightarrow K^+ K^- n$ 的截面在质心能为2.08 GeV时达到500nb

$\pi^- p \rightarrow K^* \Sigma$ 截面

$W=2.88$ GeV

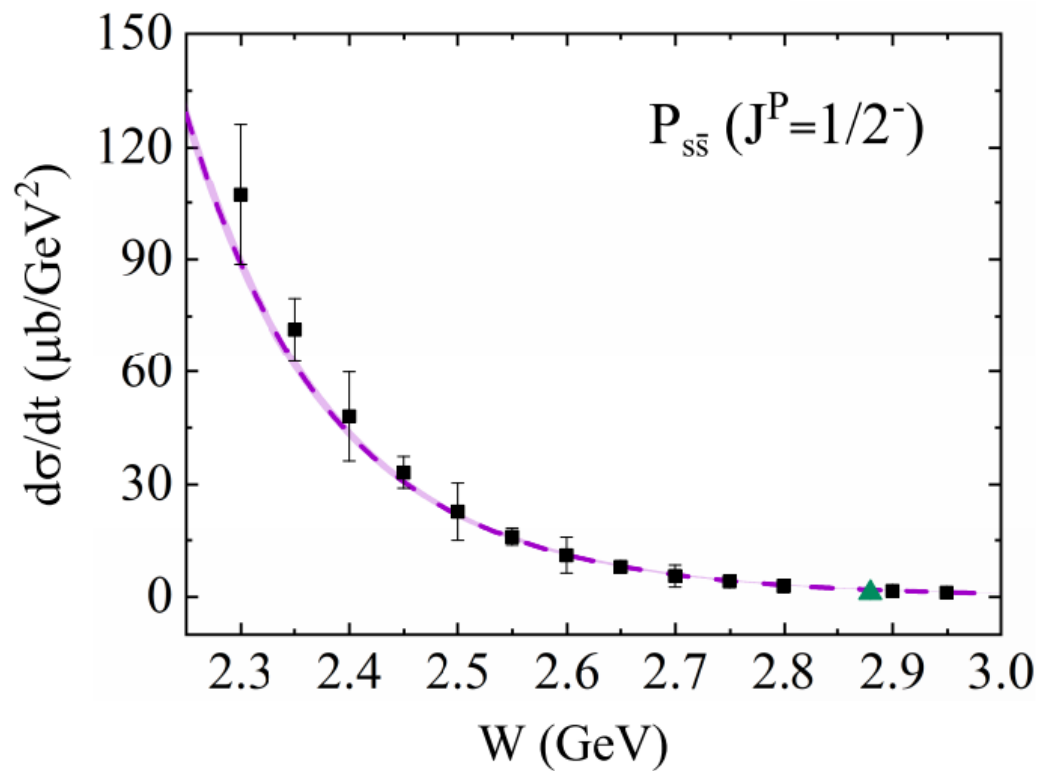
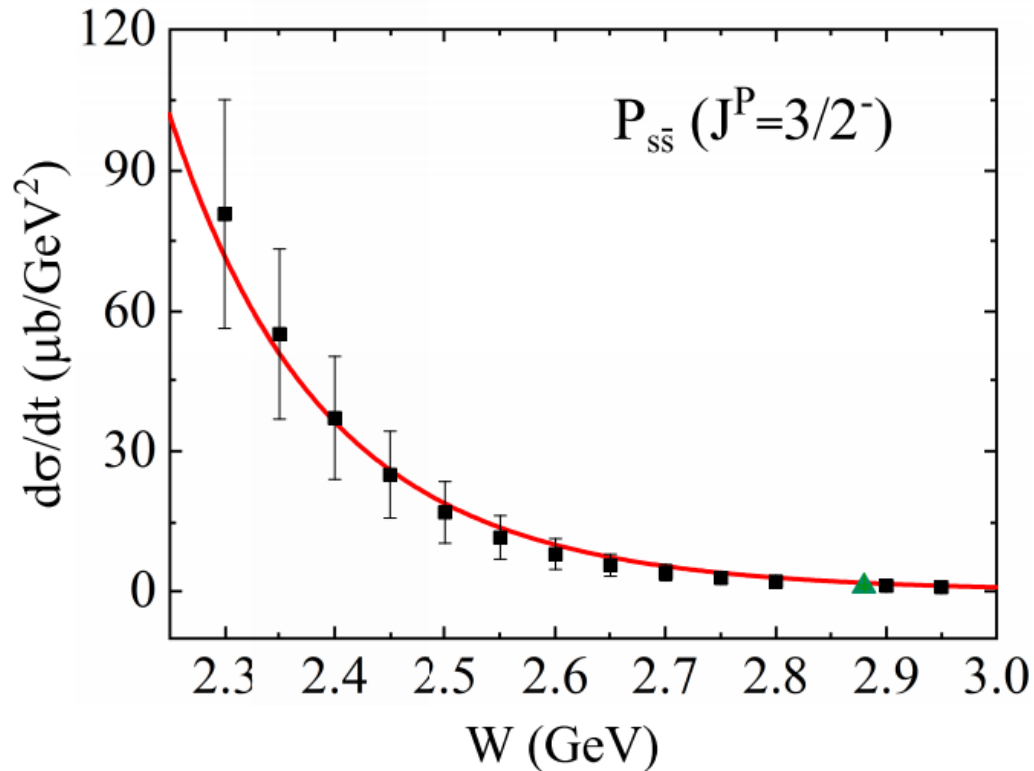


$W=3.056$ GeV



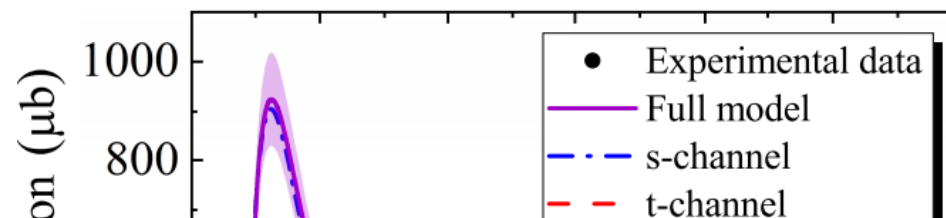
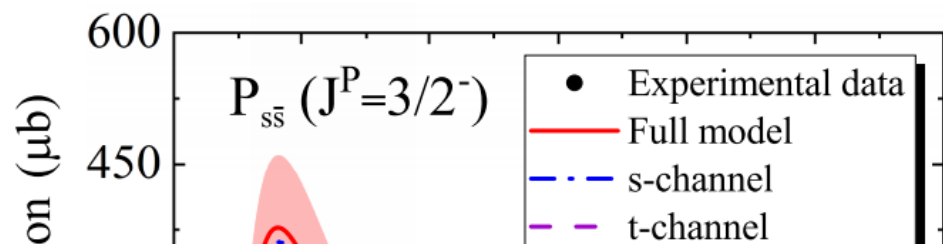
组分标度定律

$$\frac{d\sigma}{dt} = (\text{constant} \times s^{2-n}) \quad n=10$$

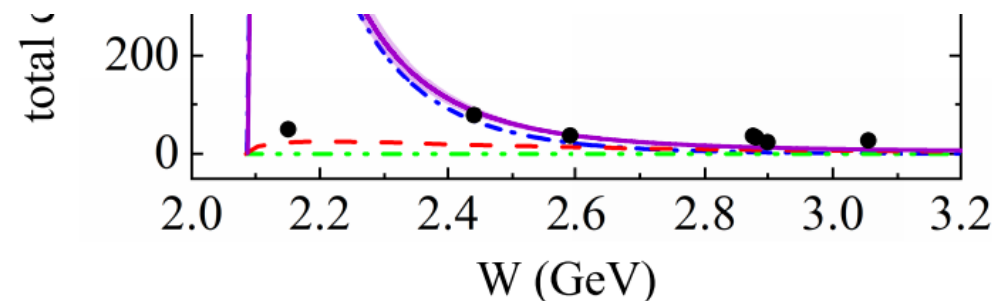
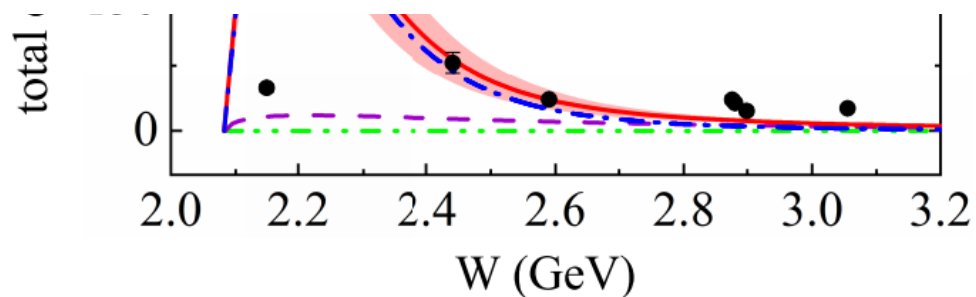


$\pi^- p \rightarrow K^* \Sigma$ 截面

蓝色点划线代表 $P_{s\bar{s}}$ 的贡献



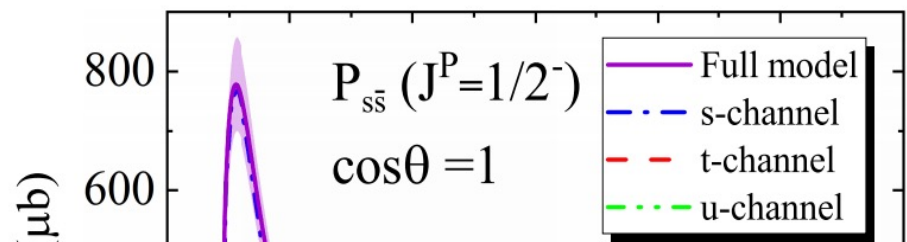
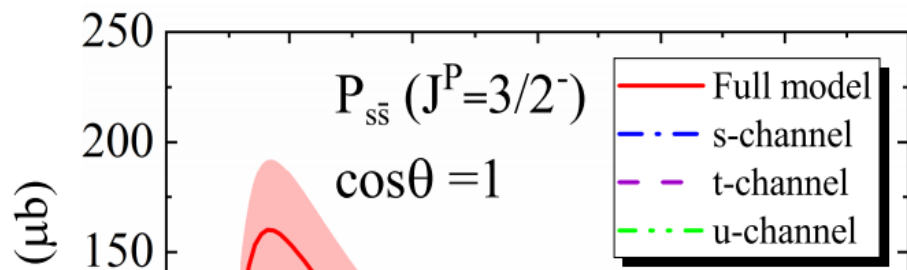
建议实验测量 $K^* \Sigma$ 阈值处的总截面



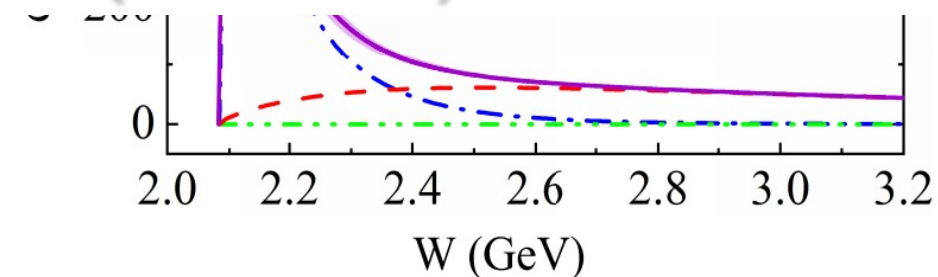
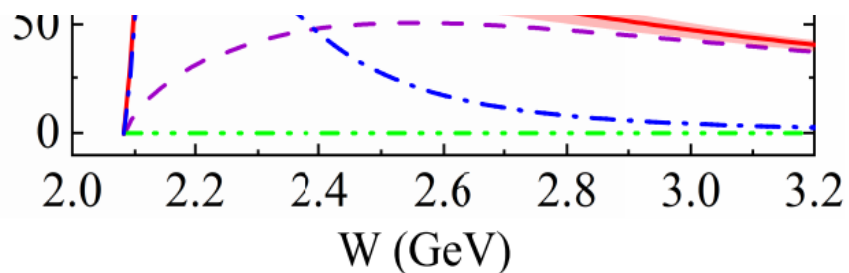
总截面

$\pi^- p \rightarrow K^* \Sigma$ 截面

蓝色点划线代表 $P_{s\bar{s}}$ 的贡献

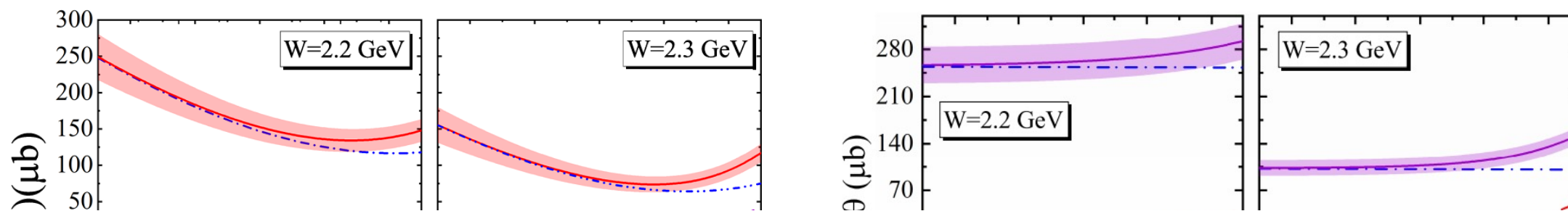


建议实验测量前向角($\theta=0^\circ$)的微分截面

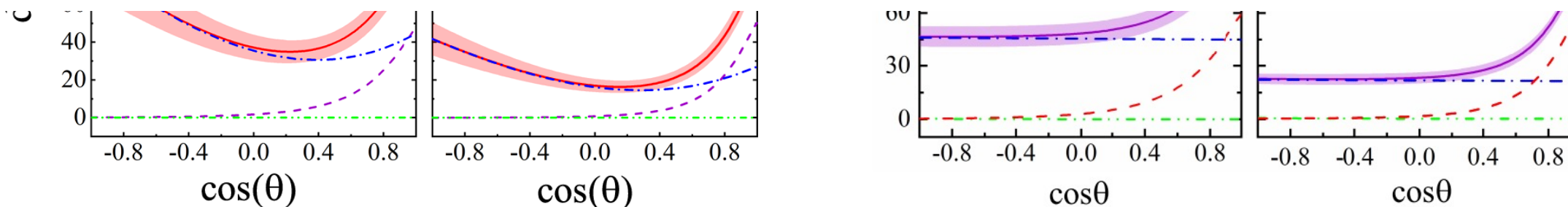


微分截面

$\pi^- p \rightarrow K^* \Sigma$ 截面



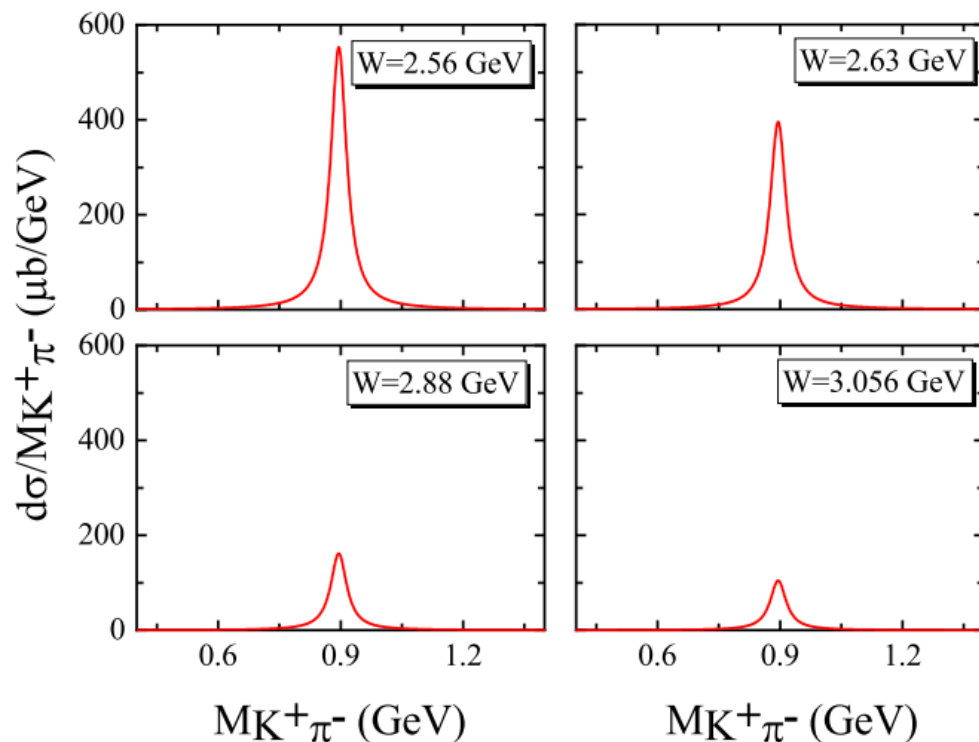
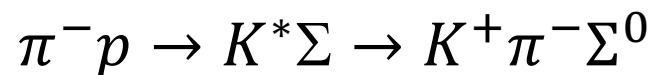
建议实验测量 $K^* \Sigma$ 阈值处的微分截面



微分截面



Dalitz过程



质心能: 2.56~3.056 GeV

$$M_{K^+ \pi^-} = 0.895 \text{ GeV}$$

峰值 $\geq 104.57 \mu\text{b/GeV}$

$$W = 2.56 \text{ GeV}$$

$$\frac{\sigma(\pi^- p \rightarrow K^* \Sigma \rightarrow K^+ \pi^- \Sigma^0)}{\sigma(\pi^- p \rightarrow K^+ \pi^- \Sigma^0)} \approx 76.61\%$$

其中s通道 $P_{s\bar{s}}$ 交换的贡献占73.19%，接近 $30.28 \mu\text{b}$ 。



04

结果与讨论



结果与讨论

我们的工作细致研究了 $K^-p \rightarrow \eta_1(1855)\Lambda$, $K^-p \rightarrow a_0(1817)\Lambda$, $\pi^-p \rightarrow \phi n$ 和 $\pi^-p \rightarrow K^*\Sigma$ 散射过程, 证明了通过介子束流实验寻找奇特强子态的可行性, 给实验上提供了切实可行的测量建议。

- 一方面可以对轻介子谱及相关物理进行研究, 澄清奇特介子态的产生机制和内部性质, 为解释标量介子谱过剩及非微扰QCD提供重要信息;
- 另一方面可以对隐奇异五夸克态及相关物理进行研究, 为解释重子激发态“丢失”问题提供实验数据支持。



结果与讨论

- 目前，介子-核子散射过程的高精度测量可以通过在**J-PARC**、**AMBER**和未来的设施如**HIKE**和**HIAF**上进行。我们建议这些实验对上述四个过程进行精确的测量。
- 未来我们将继续研究各种 π^-p 或 K^-p 散射过程，为今后的实验提供必要的理论支持。



兰州理工大学

LANZHOU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

恳请老师批评指正

报告人：高源

指导老师：王晓云 刘翔

2024 年 12 月 28 日