

精确测量 $X(3872)$ 束缚能的可能性

$$e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma X(3872) \text{ 和 } p\bar{p} \rightarrow \gamma X(3872)$$

报告人：景豪杰

轻强子谱国际协同研究研讨会，中国·北京，2021年7月9日。

2021年7月9日

Based on Shuntaro Sakai, Hao-Jie Jing and Feng-Kun Guo,
Phys.Rev.D 102 (2020) 11, 114041 [arXiv:2008.10829].

轻强子谱国际协同研究研讨会



中国科学院理论物理研究所
Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences

- ① 奇特强子态 $X(3872)$
- ② 精确测量 $X(3872)$ 质量的新方法
- ③ 可行性研究
- ④ 总结



① 奇特强子态 $X(3872)$

② 精确测量 $X(3872)$ 质量的新方法

③ 可行性研究

④ 总结



奇特态 $X(3872)$ 的质量，宽度和自旋宇称

粒子	质量 (MeV)	寿命或宽度	自旋宇称
D^0	1864.83 ± 0.05	410.1 ± 1.5 fs	0^-
D^{*0}	2006.85 ± 0.05	55.3 ± 1.4 keV	1^-
$X(3872)$	3871.69 ± 0.17	1.19 ± 0.21 MeV	1^+

表 1: 介子 D^0 , D^{*0} 和 $X(3872)$ 的质量，寿命或宽度和自旋宇称。 D^{*0} 的宽度取自 [Guo, 2019]，其余取自粒子数据组 (Review of Particle Physics, RPP) [Zyla et al., 2020]。

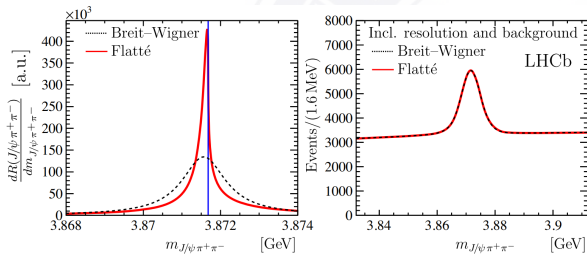


图 1: Flatté 和 Breit-Wigner 参数化的比较。图片取自 LHCb [Aaij et al., 2020]。

奇特态 $X(3872)$ 的衰变模式

$D^0 \bar{D}^0 \pi^0$	$\bar{D}^{*0} D^0$	$\gamma \psi(2S)$	$\omega J/\psi(1S)$	$\pi^+ \pi^- J/\psi(1S)$	$\pi^0 \chi_{c1}$	$\gamma J/\psi$
$> 29\%$	$> 28\%$	$> 2.5\%$	$> 2.2\%$	$> 2.6\%$	$> 1.8\%$	$> 4 \times 10^{-3}$

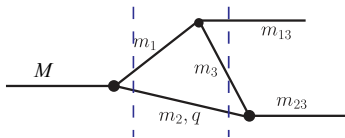
表 2: $X(3872)$ 的主要衰变模式及分支比, 取自RPP [Zyla et al., 2020]。 $X(3872)$ 很可能是一个由 $D^0 \bar{D}^{*0}$ 构成的 S 波浅束缚态

- 可以自然地解释 $X(3872) \rightarrow \pi^0 D^0 \bar{D}^0 / D^0 \bar{D}^{*0}$ 较大的分支比 [Li and Yuan, 2019, Braaten et al., 2019];
- 可以自然地解释同位旋破坏过程 $X(3872) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ 相对于同位旋守恒过程 $X(3872) \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 J/\psi$ 较大的分支比 [Gamermann and Oset, 2009]。

- ① 奇特强子态 $X(3872)$
- ② 精确测量 $X(3872)$ 质量的新方法
- ③ 可行性研究
- ④ 总结



三角奇点 (Triangle Singularity)



$$q_{\text{on}+} = \frac{1}{2M} \sqrt{\lambda(M^2, m_1^2, m_2^2)} + i\varepsilon,$$

$$q_{a\pm} = \gamma (\beta E_2^* \pm p_2^*) \pm i\varepsilon.$$

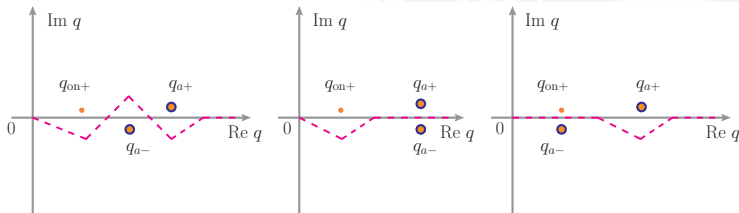


图 2: 在三动量模 q 的积分路径上遇到奇点的三种情形。左侧: 无运动学奇点; 中间: 两体阈值奇点; 右侧: 三角奇点 ($q_{\text{on}+} = q_{a-}$)。

三角奇点对运动学变量十分敏感 [Bayar et al., 2016, Guo et al., 2020]

$$m_{23} \in \left[m_2 + m_3, \sqrt{[(m_1 + m_2)(m_3^2 + m_1 m_2) - m_2 m_{13}^2] / m_1} \right].$$

精确测量 $X(3872)$ 的束缚能

- $X(3872)$ 束缚能的定义:

$$\delta = m_{D^0} + m_{\bar{D}^{*0}} - m_X = 0.00 \pm 0.18 \text{ MeV};$$

- 通过测量 $X(3872)$ 衰变产物 (如 $\pi^+\pi^-J/\psi$) 的不变质量分布线形来确定 $X(3872)$ 的质量, 进而确定其束缚能;
- 利用三角奇点对运动学变量的敏感性, 可以通过测量末态 $\gamma X(3872)$ 的线形来直接确定 $X(3872)$ 的束缚能 [Guo, 2019];

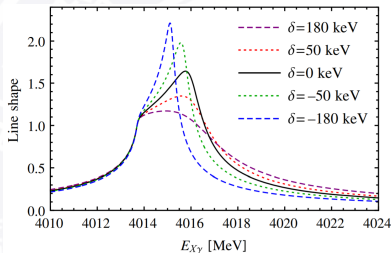
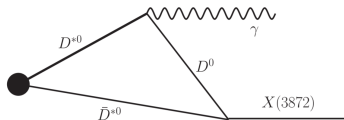


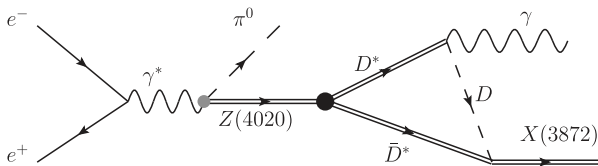
图 3: 左: 短距 $D^{*0}\bar{D}^{*0}$ 产生 $\gamma X(3872)$ 的三角圈图; 右: 在 $D^{*0}\bar{D}^{*0}$ 阈值附近末态 $\gamma X(3872)$ 的线形。图片取自 [Guo, 2019]。

- ① 奇特强子态 $X(3872)$
- ② 精确测量 $X(3872)$ 质量的新方法
- ③ 可行性研究
形式计算
数值计算结果
- ④ 总结

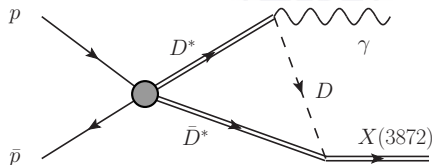


可行性研究

- $e^+e^- \rightarrow \pi^0(D^*\bar{D}^*)^0 \rightarrow \pi^0\gamma X(3872)$



- $p\bar{p} \rightarrow (D^*\bar{D}^*)^0 \rightarrow \gamma X(3872)$



- ① 奇特强子态 $X(3872)$
- ② 精确测量 $X(3872)$ 质量的新方法
- ③ 可行性研究
形式计算
数值计算结果
- ④ 总结



$$e^+e^- \rightarrow \pi^0 \gamma X(3872)$$

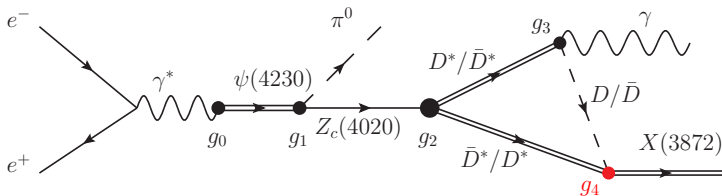


图 4: 本工作中考虑的 $e^+e^- \rightarrow \pi^0 \gamma X(3872)$ 三角圈图。

- $g_0 g_1 g_2 = 0.68 \text{ GeV}^3$

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \pi^0(D^* \bar{D}^*)^0} = 61.6 \text{ pb @ } \sqrt{s} = 4.23 \text{ GeV},$$

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \pi^0(D^* \bar{D}^*)^0} = 43.4 \text{ pb @ } \sqrt{s} = 4.26 \text{ GeV [Ablikim et al., 2015]}.$$

- $g_3 = 1.77 \text{ GeV}^{-1}$

$$\Gamma_{D^{*0} \rightarrow \gamma D^0} = 55.3 \text{ keV} \times 35.3\% = 19.5 \text{ keV}$$

[Braaten, 2015, Guo, 2019, Zyla et al., 2020].

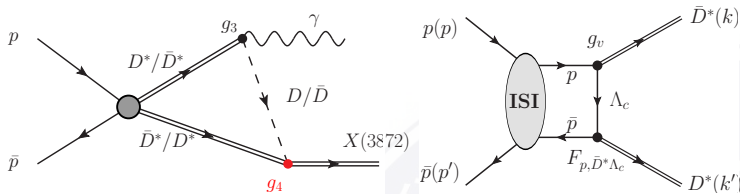


图 6: 左: 本工作中考虑的 $p\bar{p} \rightarrow \gamma X(3872)$ 三角圈图; 右: $p\bar{p}$ 通过交换 Λ_c 产生 $\bar{D}^* D^*$ 。

- $p\bar{p}$ 初态相互作用 (Initial-State Interaction, ISI)。

$$|\mathcal{M}_{\text{ISI}}|^2 = 0.25 @ \sqrt{s} = 5 \text{ GeV} \text{ [Dong et al., 2014]}.$$

为了估算散射截面, 我们取 $|\mathcal{M}_{\text{ISI}}|^2 = 0.2 @ \sqrt{s} \sim 4.02 \text{ GeV}$.

- 耦合常数 $q_v = -5.20$ 。

通过味道 $SU(4)$ 对称性估算, $g_{\Lambda_c p D^*} = -\frac{\sqrt{3}}{2} g_{NN\rho}$ [Liu et al., 2001, Dong et al., 2014]。

- 形状因子 $F_{p,\bar{D}^*\Lambda_c}^2 = \frac{\Lambda^4}{((p-k)^2 - m_{\Lambda_c}^2)^2 + \Lambda^4}$, $\Lambda \sim 2 \text{ GeV}$ [He, 2015, Lin et al., 2017]。

$X(3872)$ 的宽度效应

- $X(3872)$ 的谱函数对散射截面的抹平效应

$$\bar{F}(m_{\gamma X}) = \int_{m_X - 2\Gamma_X}^{m_X + 2\Gamma_X} d\tilde{m}_X \rho_X(\tilde{m}_X) \frac{\Gamma_{X,\rho}(\tilde{m}_X)}{\text{Re}[\Gamma_X(\tilde{m}_X)]} F(m_{\gamma X}, \tilde{m}_X).$$

- Flatté 参数化形式 [Hanhart et al., 2007, Aaij et al., 2020]

$$\Gamma_X(\tilde{m}_X) = g(k_1 + k_2) + \Gamma_{X,\rho}(\tilde{m}_X) + \Gamma_{X,\omega}(\tilde{m}_X) + \Gamma_{X0},$$

其中 $\rho_X, k_{1,2}, \Gamma_{X,\rho/\omega}$ 的具体形式见 [Sakai et al., 2020a] 中的公式 (14)。

表 3: Flatté 振幅中的参数取值。

δ (keV)	m_{X0} (GeV)	g (—)	f_ρ (—)	f_ω (—)	Γ_{X0} (MeV)
0	3.8645	$0.108^{+0.006}_{-0.007}$	$(1.8^{+0.92}_{-0.85}) \times 10^{-3}$	1.0×10^{-2}	1.4 ± 0.72
180	3.8644	0.097	1.6×10^{-3}	9.0×10^{-3}	0.0
50	3.8643	0.108	1.8×10^{-3}	1.0×10^{-2}	0.3
-50	3.8714	5.186×10^{-3}	8.6×10^{-5}	4.8×10^{-4}	0.03
-180	3.8717	2.802×10^{-3}	4.7×10^{-5}	2.6×10^{-4}	0.035

- ① 奇特强子态 $X(3872)$
- ② 精确测量 $X(3872)$ 质量的新方法
- ③ 可行性研究
形式计算
数值计算结果
- ④ 总结



$e^+e^- \rightarrow \pi^0 \gamma X(3872) @ \sqrt{s} = 4.23 \text{ GeV}$ 的数值结果

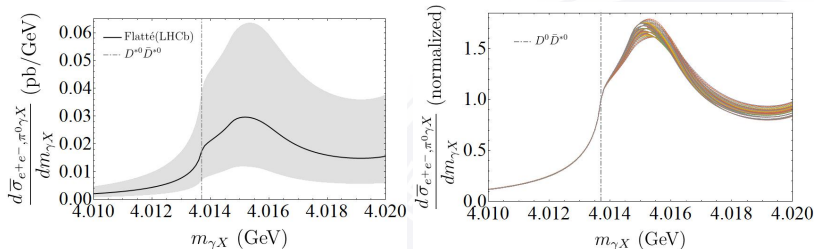


图 7: 左: $X(3872)$ 的束缚能 $\delta = 0 \text{ keV}$ 时 $e^+e^- \rightarrow \pi^0 \gamma X(3872)$ 的微分散射截面, 灰色带状区域由文献 [Aaij et al., 2020] 中最佳拟合参数的误差给出; 右: 在文献 [Aaij et al., 2020] 中给出的最佳拟合参数的误差范围内不变质量分布的线形变化。

$e^+e^- \rightarrow \pi^0 \gamma X(3872) @ \sqrt{s} = 4.23 \text{ GeV}$ 的数值结果

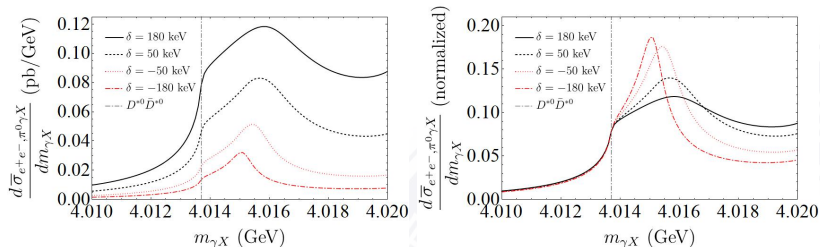


图 8: $X(3872)$ 的束缚能 $\delta = -180, -50, 50, 180 \text{ keV}$ 时 $e^+e^- \rightarrow \pi^0 \gamma X(3872)$ 的微分散射截面（左）及其线形变化（右）。

散射截面的量级: $\sigma_{e^+e^- \rightarrow \pi^0 \gamma X(3872)} \cdot \mathcal{B}(X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) \sim \mathcal{O}(0.1 \text{ fb})$ 。

这个量级的散射截面和 BESIII 在 $e^+e^- \rightarrow \pi^0 Z_c(4020)^0 \rightarrow \pi^0 X(3872) \gamma$ 过程中测量的上限一致 [Ablikim et al., 2021]。

$$\sigma \cdot \mathcal{B} < 0.15 \text{ pb} @ \sqrt{s} = 4.226 \text{ GeV}.$$

$p\bar{p} \rightarrow \gamma X(3872)$ 的数值结果

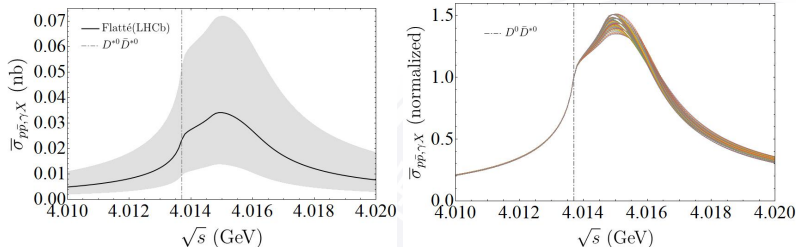


图 9: 左: $X(3872)$ 的束缚能 $\delta = 0$ keV 时 $p\bar{p} \rightarrow \gamma X(3872)$ 的散射截面随质心系能量变化的线形, 灰色带状区域由文献 [Aaij et al., 2020] 中最佳拟合参数的误差给出; 右: 在文献 [Aaij et al., 2020] 中给出的最佳拟合参数的误差范围内质心系能量分布的线形变化。

$p\bar{p} \rightarrow \gamma X(3872)$ 的数值结果

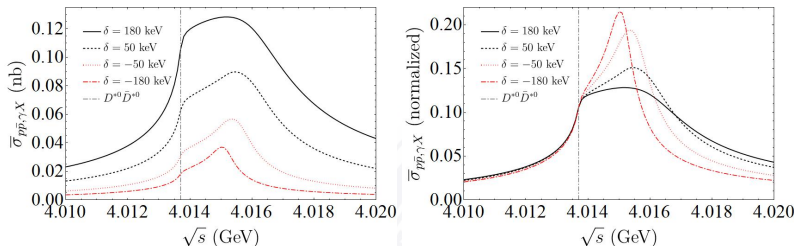


图 10: $X(3872)$ 的束缚能 $\delta = -180, -50, 50, 180$ keV 时 $p\bar{p} \rightarrow \gamma X(3872)$ 的散射截面随质心系能量的变化 (左) 及其线性变化 (右)。

散射截面的量级: $\sigma_{p\bar{p} \rightarrow \gamma X(3872)} \cdot \mathcal{B}(X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) \sim \mathcal{O}(10 \text{ pb})$ 。

- PANDA 在五个月内的积分亮度约为 $2 \text{ fb}^{-1} @ \sqrt{s} = 3872 \text{ MeV}$ [Barucca et al., 2019]
可以预期收集到的 $X(3872)$ 事例数 $N \sim \mathcal{O}(2 \times 10^4)$;
- $\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow e^+ e^- / \mu^+ \mu^-) \sim 6\%$ [Zyla et al., 2020]
可以预期 PANDA 实验可以重构的事例数 $N \sim \mathcal{O}(2 \times 10^3)$ 。

误差估计的蒙特卡洛模拟

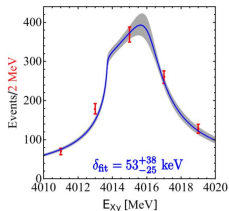
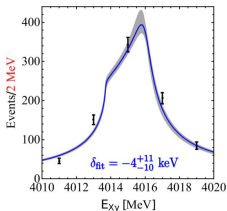
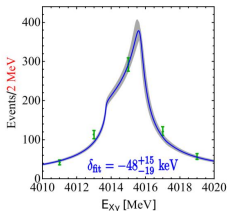
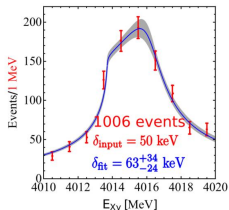
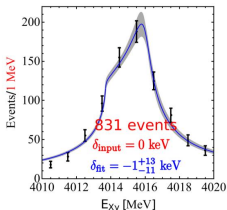
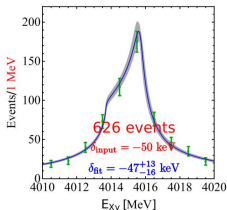
TS as a tool: precise measurement of $X(3872)$



- Directly probe δ , uncertainty can be smaller than that of the $D^{(*)0}$ masses

Monte Carlo simulation of the sensitivity:

FKG, PRL122(2019)202002



- ① 奇特强子态 $X(3872)$
- ② 精确测量 $X(3872)$ 质量的新方法
- ③ 可行性研究
- ④ 总结



总结

- 因三角奇点的存在, $X(3872)$ 束缚能的改变 (± 180 keV) 会明显影响末态 $\gamma X(3872)$ 不变质量分布的线形, 这一性质可以用来精确测定 $X(3872)$ 的束缚能;
- 对于 $e^+e^- \rightarrow \pi^0 \gamma X(3872)$ 和 $p\bar{p} \rightarrow \gamma X(3872)$ 两个过程, 在考虑 $X(3872)$ 的宽度效应, 以及初态相互作用和能量区间平均后这种效应依然足够明显;
- 对于 $p\bar{p} \rightarrow \gamma X(3872)$, 散射截面足够大。
 $\sigma_{p\bar{p} \rightarrow \gamma X(3872)} \sim \mathcal{O}(10 \text{ pb}) @ \sqrt{s} = 4.02 \text{ GeV}$
 $\Rightarrow N \sim \mathcal{O}(2 \times 10^3) @ \text{PANDA (五个月内)}$

我们建议在 PANDA 上精确测量 $X(3872)$ 的束缚能。

Thank you for your attention!

[Aaij et al., 2020] Aaij, R. et al. (2020).

Study of the lineshape of the $\chi_{c1}(3872)$ state.

Phys. Rev. D, 102:092005.

[Ablikim et al., 2015] Ablikim, M. et al. (2015).

Observation of a neutral charmoniumlike state $Z_c(4025)^0$ in $e^+e^- \rightarrow (D^*\bar{D}^*)^0\pi^0$.

Phys. Rev. Lett., 115(18):182002.

[Ablikim et al., 2021] Ablikim, M. et al. (2021).

Study of $e^+e^- \rightarrow \pi^0 X(3872)\gamma$ and search for $Z_c(4020)^0 \rightarrow X(3872)\gamma$.

[Baru et al., 2004] Baru, V., Haidenbauer, J., Hanhart, C., Kalashnikova, Yu., and Kudryavtsev, A. E. (2004).
Evidence that the $a_0(980)$ and $f_0(980)$ are not elementary particles.

Phys. Lett., B586:53–61.

[Barucca et al., 2019] Barucca, G. et al. (2019).
Precision resonance energy scans with the PANDA experiment at FAIR: Sensitivity study for width and line-shape measurements of the $X(3872)$.

Eur. Phys. J. A, 55(3):42.

[Bayar et al., 2016] Bayar, M., Aceti, F., Guo, F.-K., and Oset, E. (2016).

A Discussion on Triangle Singularities in the $\Lambda_b \rightarrow J/\psi K^- p$ Reaction.

Phys. Rev., D94(7):074039.

[Braaten, 2015] Braaten, E. (2015).

Galilean-invariant effective field theory for the $X(3872)$.

Phys. Rev., D91(11):114007.

[Braaten et al., 2019] Braaten, E., He, L.-P., and Ingles, K. (2019).

Branching Fractions of the $X(3872)$.

[Dai et al., 2020] Dai, L., Guo, F.-K., and Mehen, T. (2020).

Revisiting $X(3872) \rightarrow D^0 \bar{D}^0 \pi^0$ in an effective field theory for the $X(3872)$.

Phys. Rev. D, 101(5):054024.

[Dong et al., 2014] Dong, Y., Faessler, A., Gutsche, T., and Lyubovitskij, V. E. (2014).

Role of the hadron molecule $\Lambda_c(2940)$ in the $p\bar{p} \rightarrow pD^0\bar{\Lambda}_c(2286)$ annihilation reaction.

Phys. Rev. D, 90(9):094001.

[Fleming et al., 2007] Fleming, S., Kusunoki, M., Mehen, T., and van Kolck, U. (2007).

Pion interactions in the $X(3872)$.

Phys. Rev., D76:034006.

[Gamermann et al., 2010] Gamermann, D., Nieves, J., Oset, E., and Ruiz Arriola, E. (2010).

Couplings in coupled channels versus wave functions: application to the $X(3872)$ resonance.

Phys. Rev., D81:014029.

[Gamermann and Oset, 2009] Gamermann, D. and Oset, E. (2009).

Isospin breaking effects in the $X(3872)$ resonance.

Phys. Rev., D80:014003.

[Guo, 2019] Guo, F.-K. (2019).

Novel Method for Precisely Measuring the $X(3872)$ Mass.

Phys. Rev. Lett., 122(20):202002.

[Guo et al., 2014] Guo, F.-K., Hidalgo-Duque, C., Nieves, J., Ozpineci, A., and Valderrama, M. P. (2014).

Detecting the long-distance structure of the $X(3872)$.

Eur. Phys. J., C74(5):2885.

[Guo et al., 2020] Guo, F.-K., Liu, X.-H., and Sakai, S. (2020).

Threshold cusps and triangle singularities in hadronic reactions.

Prog. Part. Nucl. Phys., 112:103757.

[Hanhart et al., 2007] Hanhart, C., Kalashnikova, Yu. S.,
Kudryavtsev, A. E., and Nefediev, A. V. (2007).
Reconciling the $X(3872)$ with the near-threshold enhancement
in the $D^0 \bar{D}^{*0}$ final state.
Phys. Rev., D76:034007.

[He, 2015] He, J. (2015).
Internal structures of the nucleon resonances $N(1875)$ and
 $N(2120)$.
Phys. Rev. C, 91(1):018201.

[Lees et al., 2020] Lees, J. et al. (2020).
Measurements of the Absolute Branching Fractions of
 $B^\pm \rightarrow K^\pm X_{c\bar{c}}$.
Phys. Rev. Lett., 124(15):152001.

- [Lehrach et al., 2006] Lehrach, A., Boine-Frankenheim, O., Hinterberger, F., Maier, R., and Prasuhn, D. (2006).
Beam performance and luminosity limitations in the high-energy storage ring (HESR).
Nucl. Instrum. Meth. A, 561:289–296.
- [Li and Yuan, 2019] Li, C. and Yuan, C.-Z. (2019).
Determination of the absolute branching fractions of $X(3872)$ decays.
Phys. Rev., D100(9):094003.
- [Lin et al., 2017] Lin, Y.-H., Shen, C.-W., Guo, F.-K., and Zou, B.-S. (2017).
Decay behaviors of the P_c hadronic molecules.
Phys. Rev., D95(11):114017.

[Liu et al., 2001] Liu, W., Ko, C. M., and Lin, Z. W. (2001).

Cross-section for charmonium absorption by nucleons.

Phys. Rev. C, 65:015203.

[Sakai et al., 2020a] Sakai, S., Jing, H.-J., and Guo, F.-K. (2020a).

Possible precise measurements of the $X(3872)$ mass with the $e^+e^- \rightarrow \pi^0 \gamma X(3872)$ and $p\bar{p} \rightarrow \gamma X(3872)$ reactions.

Phys. Rev. D, 102(11):114041.

[Sakai et al., 2020b] Sakai, S., Oset, E., and Guo, F.-K. (2020b).

Triangle singularity in the $B^- \rightarrow K^- \pi^0 X(3872)$ reaction and sensitivity to the $X(3872)$ mass.

Phys. Rev. D, 101(5):054030.

[Zyla et al., 2020] Zyla, P. et al. (2020).
Review of Particle Physics.
PTEP, 2020(8):083C01.

