BESIII上粲介子衰变中 ϕ分支比的测量

张晗

郑州大学

2026.10.17

目录

- ✧ 研究动机
- ✧ BESIII实验
- ✧ $D_s^+ \to \phi(\pi^+\pi^-\pi^0,\ K^+K^-)\pi^+$
- ✧ $D_s^+ \to \phi(\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0)\pi^+$
- ✧ $D_s^+ \to \phi(K_S^0K_L^0)\pi^+$
- ✧ $D^+ \to \phi(K_S^0K_L^0)\pi^+$
- ✧ 总结与展望

研究动机

ϕ粒子($s\bar{s}$)

- ✓ 正反奇异夸克组成的最轻介子，处于非微扰量子色动力学的区域，
- ✓ 是汤川秀树介子交换理论认为的重子之间相互作用的可能载体，
- ✓ 是研究相对论重离子碰撞中形成的量子色动力学物质的良好探针。

精确测量ϕ衰变特性的意义

ϕ介子衰变特性的精确测量对于研究强相互作用的非微扰行为、理解强子之间核力的作用特性、深入理解强子物质的结构等都具有非常重要的理论和实验价值。

B 物理中的关键输入参数

含ϕ介子的衰变道常被用来测量CP破坏。$B_{(s)} \to \phi\phi, B \to \phi K, B \to J/\psi\phi K, B \to \phi\phi K$

需要$\phi \to K^+K^-$的分支比作为输入参数。

精确测量ϕ介子衰变的分支比对寻找CP破坏以及理解强相互作用的性质有重要影响

研究动机

现有实验测量来源：

ϕ介子主要衰变分支比的测量结果几乎都来自：$K-p$ 散射、$\pi-N$ 散射、以及正负电子湮灭实验

现有实验方法的问题：

介子-核子散射过程：本底太复杂，无法很好地考虑干涉效应的影响；

正负电子对撞实验：虽然在原则上可以通过截面扫描方法得到无偏的结果，但很多应考虑的干涉可能没有考虑完全；

实验需求：

迫切需要一种独立于之前的方法，以得到更精确的ϕ介子衰变测量结果，为相关理论和实验研究提供实验数据。

ϕ介子的主要衰变道为$\phi \to K^+K^-$与$\phi \to K_S^0K_L^0$。两者分支比之和超过 80%，是研究ϕ介子特性最重要的衰变道。

$D_s^+ \to \phi\pi^+$是D_s^+介子的黄金衰变道，能提供大量的ϕ介子样本。

研究动机

理论计算：

- ✓ 理论计算 $R_\phi = \frac{\mathcal{B}(K_S^0 K_L^0)}{\mathcal{B}(K^+K^-)}$ 考虑了，相空间差异修正、电磁辐射修正、结构相关的辐射修正、接近阈值引起的额外修正以及隐藏的局域对称性模型等，
- ✓ 不同理论预测的R_ϕ值分布在一个相对较大范围(0.62~0.71)。

实验对R_ϕ的计算：

目前实验测量值在0.64 ~ 0.89之间，粒子数据组（PDG）的平均值为0.740 ± 0.031，总体上仍有显著差异。

PDG	A. Bramon et. al [1]	E. Fischbach et. al [2]	M. Benayoun et. al [3]
0.740 ± 0.031	0.62	0.68	0.71 ± 0.01

BESIII 的实验优势：

BESIII 实验积累了世界最大的近阈粲介子样本，粲介子成对产生、本底极低，其衰变产物中含有海量的ϕ介子，这为我们研究ϕ介子提供了绝佳的实验条件。

[1] Phys.Lett.B 526 (2002), 355-359 [2] Eur.Phys.J.C 72 (2012), 1848 [3] Phys. Rev. D 104, 012016(2022)

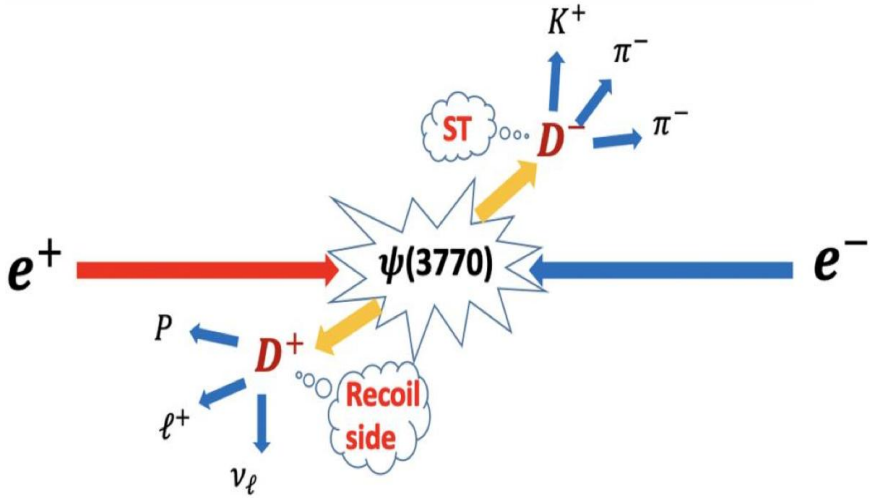
BESIII charm dataset

$D^{\pm,0}$: 20.3 fb^{-1} @E_{cm}=3.773 GeV

$e^+e^- \to \psi(3770) \to D\bar{D}$

$D_s^{\pm}$: 7.33 fb^{-1} @E_{cm}=4.128 − 4.226 GeV

$e^+e^- \to D_sD_s^* \to D_s\gamma D_s$



Beijing Electron Positron Collider II(BEPCII)



BESIII

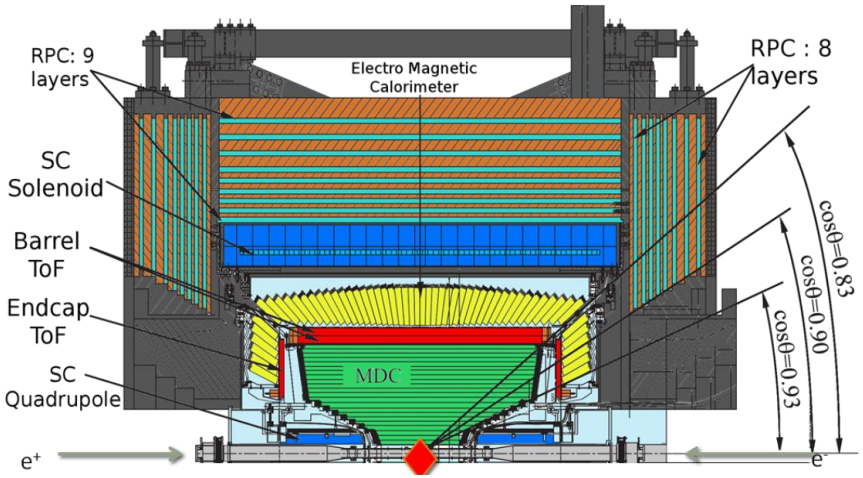
2004：Started BEPCII upgrade, BESIII construction

2009-now：BESIII physics run

- 2009-now（BEPCII）

$L_{peak} = 1.0 \times 10^{33}\ cm^{-2} \cdot s^{-1}$

BESIII



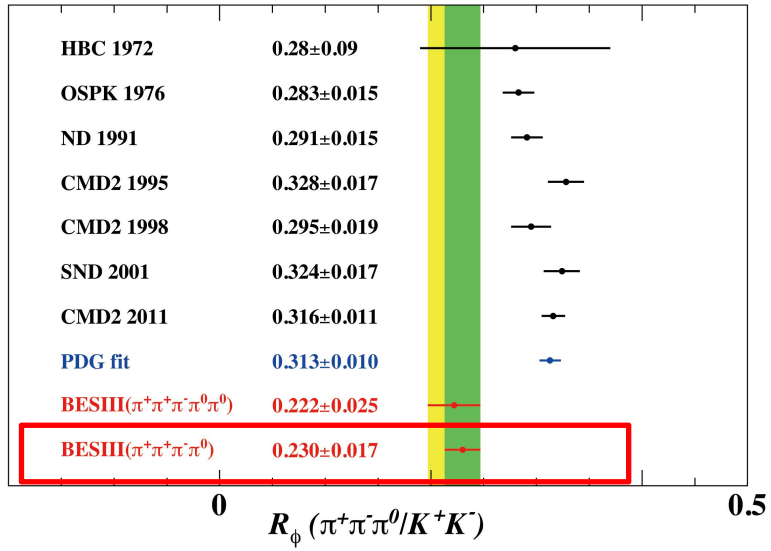
Study of $D_s^+ \to f_0(980)\rho^+$ and $\phi\pi^+$ in $D_s^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\pi^0$ decay PRL 134, 011904 (2025)

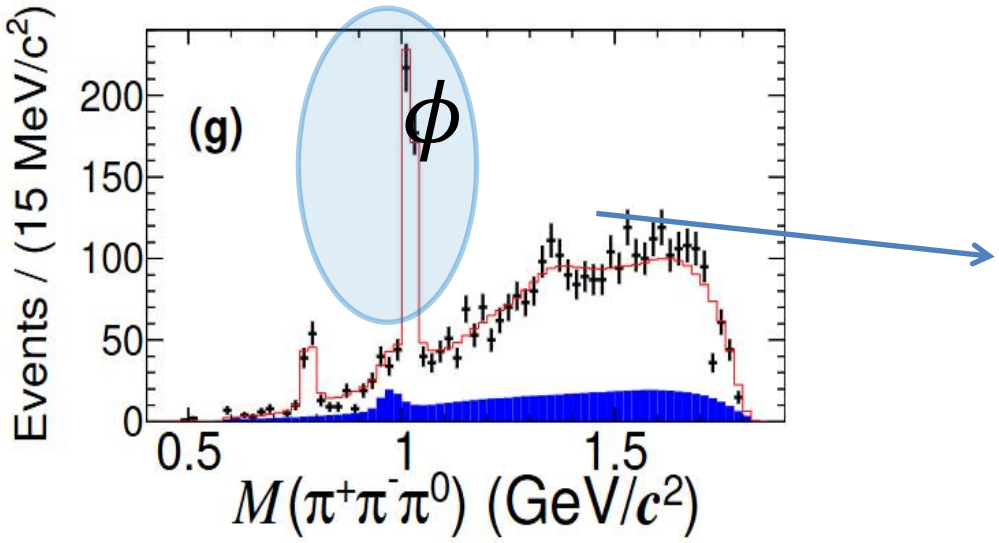
精确测量了R_ϕ的比值：

$$R_\phi\left(\frac{\pi^+\pi^-\pi^0}{K^+K^-}\right)=0.230 \pm 0.014_{\text{stat.}} \pm 0.010_{\text{sys.}}$$

- $\mathcal{B}(D_s^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\pi^0|_{\text{non}-\eta}) = (2.04 \pm 0.08_{stat} \pm 0.05_{syst})\%$
- $\mathcal{B}(D_s^+ \to \phi\pi^+, \phi \to \pi^+\pi^-\pi^0) = (5.08 \pm 0.32 \pm 0.10) \times 10^{-3}$
- $\mathcal{B}(D_s^+ \to \phi\pi^+, \phi \to K^+K^-)^{(1)} = (2.21 \pm 0.05 \pm 0.07)\%$

which deviates from the world average value by more than 4σ





Component	Phase (rad)	FF (%)	BF (10^{-3})
$f_0(1370)\rho^+$	0.0(fixed)	$24.9 \pm 3.8 \pm 2.1$	$5.08 \pm 0.80 \pm 0.43$
$f_0(980)\rho^+$	$3.99 \pm 0.13 \pm 0.07$	$12.6 \pm 2.1 \pm 1.0$	$2.57 \pm 0.44 \pm 0.20$
$f_2(1270)\rho^+$	$1.11 \pm 0.10 \pm 0.10$	$9.5 \pm 1.7 \pm 0.6$	$1.94 \pm 0.36 \pm 0.12$
$(\rho^+\rho^0)_S$	$1.10 \pm 0.18 \pm 0.10$	$3.5 \pm 1.2 \pm 0.6$	$0.71 \pm 0.25 \pm 0.12$
$(\rho(1450)^+\rho^0)_S$	$0.43 \pm 0.18 \pm 0.17$	$4.6 \pm 1.3 \pm 0.8$	$0.94 \pm 0.27 \pm 0.16$
$(\rho^+\rho(1450)^0)_P$	$4.58 \pm 0.16 \pm 0.09$	$8.6 \pm 1.3 \pm 0.4$	$1.75 \pm 0.27 \pm 0.08$
$\phi((\rho\pi) \to \pi^+\pi^-\pi^0)\pi^+$	$2.90 \pm 0.15 \pm 0.18$	$24.9 \pm 1.2 \pm 0.4$	$5.08 \pm 0.32 \pm 0.10$
$\omega((\rho\pi) \to \pi^+\pi^-\pi^0)\pi^+$	$3.22 \pm 0.21 \pm 0.09$	$6.9 \pm 0.8 \pm 0.3$	$1.41 \pm 0.17 \pm 0.06$
$a_1^+(\rho^0\pi^+)_S\pi^0$	$3.78 \pm 0.16 \pm 0.12$	$12.5 \pm 1.6 \pm 1.0$	$2.55 \pm 0.34 \pm 0.20$
$a_1^0((\rho\pi)_S \to \pi^+\pi^-\pi^0)\pi^+$	$4.82 \pm 0.15 \pm 0.12$	$6.3 \pm 1.9 \pm 1.2$	$1.29 \pm 0.39 \pm 0.24$
$\pi(1300)^0((\rho\pi)_P \to \pi^+\pi^-\pi^0)\pi^+$	$2.22 \pm 0.14 \pm 0.08$	$11.7 \pm 2.3 \pm 2.2$	$2.39 \pm 0.48 \pm 0.45$

(1) $D_s^+ \to K^+K^-\pi^+$ PRD 104, 012016(2021)

$D_s^+ \to \omega\rho^+$ and $D_s^+ \to \phi\rho^+$ in $D_s^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ decay

PRL 134, 201902 (2025)

对 $D_s^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$衰变的首次振幅分析，研究粲介子衰变中的“极化难题”。

首次观察到纯湮灭过程： $\mathcal{B}(D_s^+ \to \omega\rho^+) = (0.99 \pm 0.08 \pm 0.07)\%$ **about 50% D-wave**

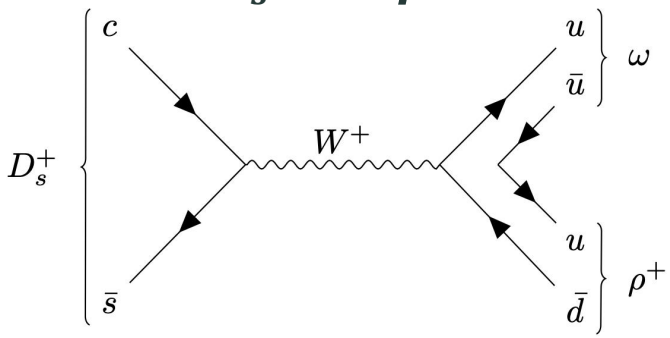
精确测量 $D_s^+ \to \phi\rho^+$的分支比： $\mathcal{B}(D_s^+ \to \phi\rho^+) = (3.98 \pm 0.33 \pm 0.21)\%$ **dominated by S-wave**

两个过程展现出截然不同的极化模式，为“极化难题”的解决提供了直接的实验对比和关键约束。

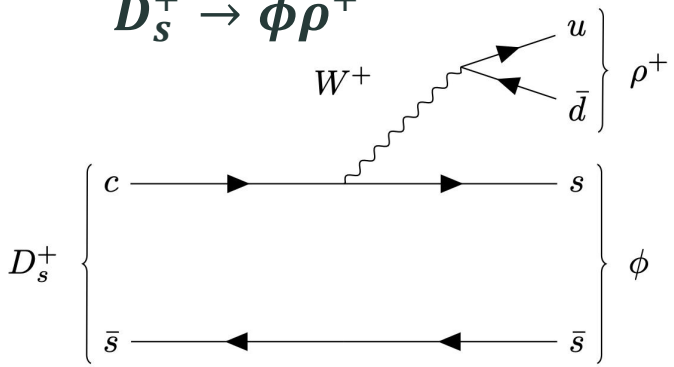
$R_\phi(\frac{\pi^+\pi^-\pi^0}{K^+K^-}) = 0.222 \pm 0.019 \pm 0.016$

与$D_s^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\pi^0$测量结果一致，但与PDG值相比相差3σ。

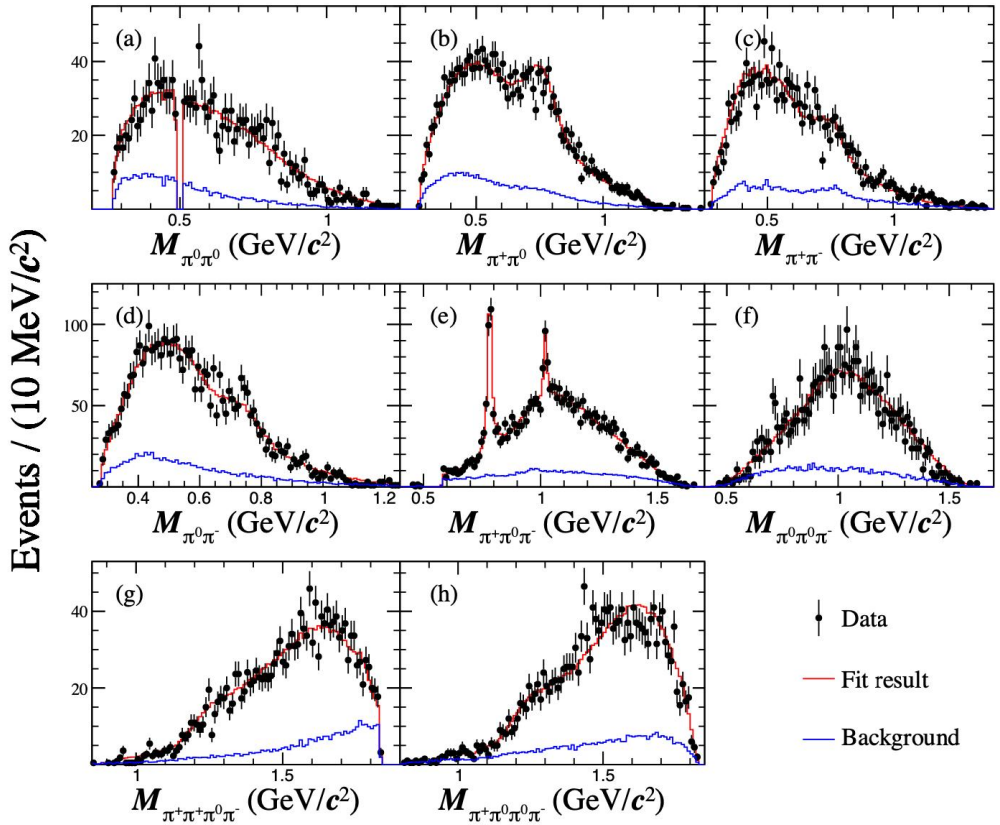
$D_s^+ \to \omega\rho^+$



$D_s^+ \to \phi\rho^+$



Larger than other WA decays



Study of $\phi \to K\bar{K}$ and $K_S^0 - K_L^0$ asymmetry $D_s^+ \to K_S^0 K_L^0 \pi^+$ PRL 135, 161902 (2025).628

首次对 $D_s^+ \to K_S^0 K_L^0 \pi^+$ 进行振幅分析： $\mathcal{B}(D_s^+ \to K_S^0 K_L^0 \pi^+) = (1.86 \pm 0.06 \pm 0.03)\%$

测定 $R_\phi(\frac{K_S^0 K_L^0}{K^+K^-})$=$0.593 \pm 0.031$ **并发现比值与 PDG 值(0.740 ± 0.031)显著偏离**

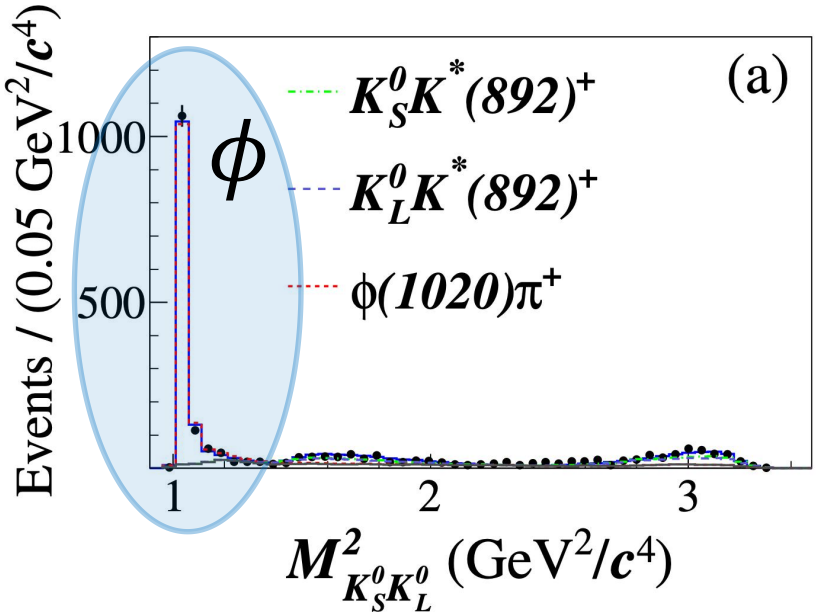
首次测量 $K_S^0 - K_L^0$ 的不对称性

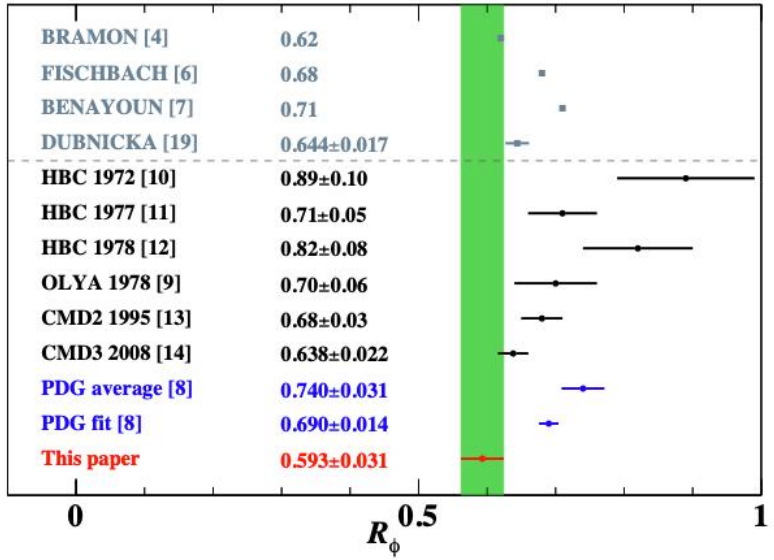
$$\frac{B(D_S^+ \to K_S^0 K^*(892)^+) - B(D_S^+ \to K_L^0 K^*(892)^+)}{B(D_S^+ \to K_S^0 K^*(892)^+) + B(D_S^+ \to K_L^0 K^*(892)^+)} =$$

$(-13.4 \pm 5.0 \pm 3.4)\%$

这不仅对非微扰 QCD 输入产生直接冲击，也为末态相互作用研究开辟了新观测量。

Amplitude	Phase (rad)	FF (%)	BF (%)
$D_s^+ \to \phi\pi^+$	0.0(fixed)	$70.9 \pm 1.3 \pm 1.5$	$1.32 \pm 0.05 \pm 0.04$
$D_s^+ \to K_L^0 K^*(892)^+$	$0.68 \pm 0.17 \pm 0.21$	$22.8 \pm 1.3 \pm 1.5$	$0.42 \pm 0.03 \pm 0.03$
$D_s^+ \to K_S^0 K^*(892)^+$	$-2.40 \pm 0.18 \pm 0.31$	$17.4 \pm 1.2 \pm 0.9$	$0.31 \pm 0.02 \pm 0.02$





Study of $\phi \to K\bar{K}$ in $D^+ \to K^0_S K^0_L \pi^+$ decay

arxiv:2605.11464

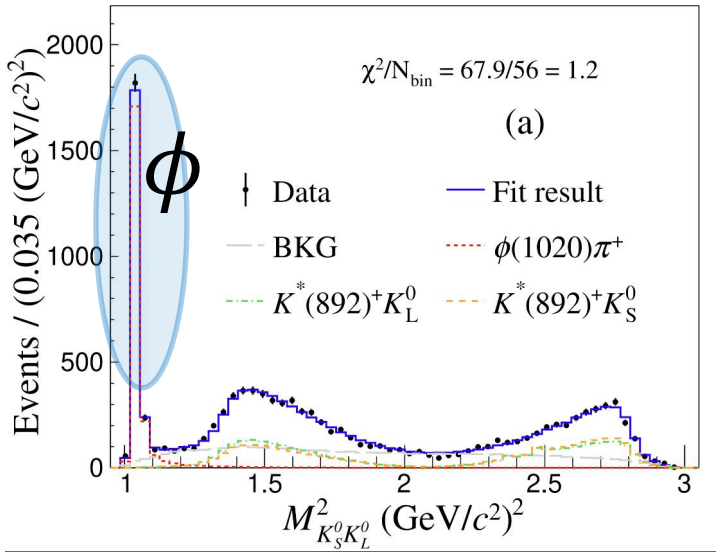
首次对 $D^+ \to K^0_S K^0_L \pi^+$进行振幅分析并测得分支比：

$$\mathcal{B}\left(D^+ \to K^0_S K^0_L \pi^+\right) = (1.69 \pm 0.06 \pm 0.04)\%$$

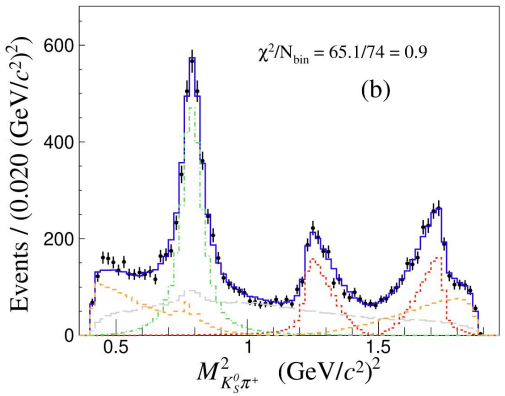
$$\mathcal{B}\left(D^+ \to K^0_S K^*(892)^+\right) = (2.20 \pm 0.06 \pm 0.03)\%\,,$$

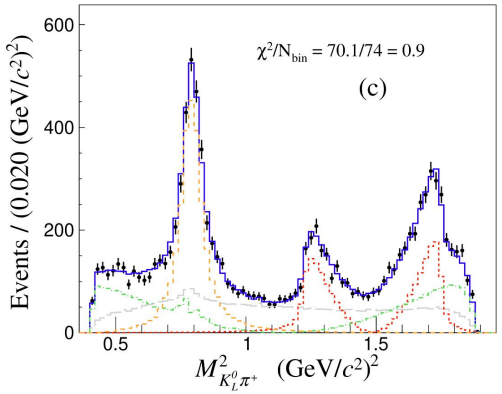
$$\mathcal{B}(D^+ \to K^0_L K^*(892)^+) = (2.33 \pm 0.06 \pm 0.03)\%$$

$R_\phi(\frac{K^0_S K^0_L}{K^+K^-}) = 0.628 \pm 0.032$ 与D_s^+测量结果一致，与PDG值显著偏离



Amplitude	Phase (rad)	FF (%)	BF (10^{-3})	σ
$D^+ \to \phi\pi^+$	0.0(fixed)	$29.24 \pm 0.97 \pm 0.65$	$1.69 \pm 0.06 \pm 0.04$	>10
$D^+ \to K^0_L K^*(892)^+$	$2.34 \pm 0.09 \pm 0.09$	$40.21 \pm 0.83 \pm 0.26$	$2.33 \pm 0.06 \pm 0.03$	>10
$D^+ \to K^0_S K^*(892)^+$	$5.50 \pm 0.09 \pm 0.09$	$38.06 \pm 0.79 \pm 0.25$	$2.20 \pm 0.06 \pm 0.03$	>10

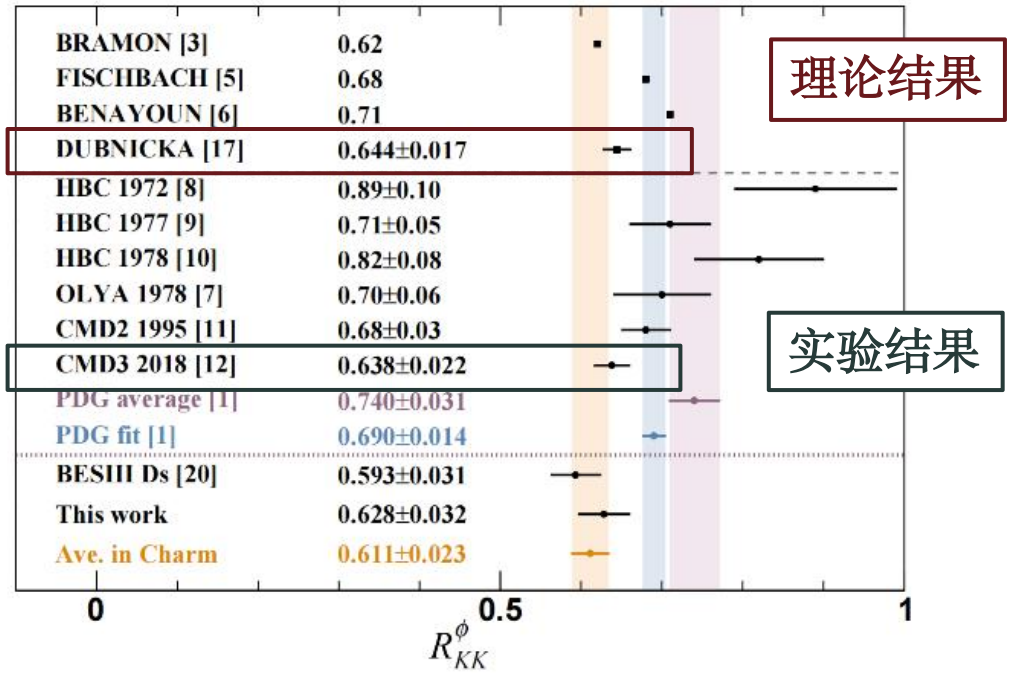




Study of $\phi \to K\bar{K}$ in $D^+ \to K_S^0 K_L^0 \pi^+$ decay

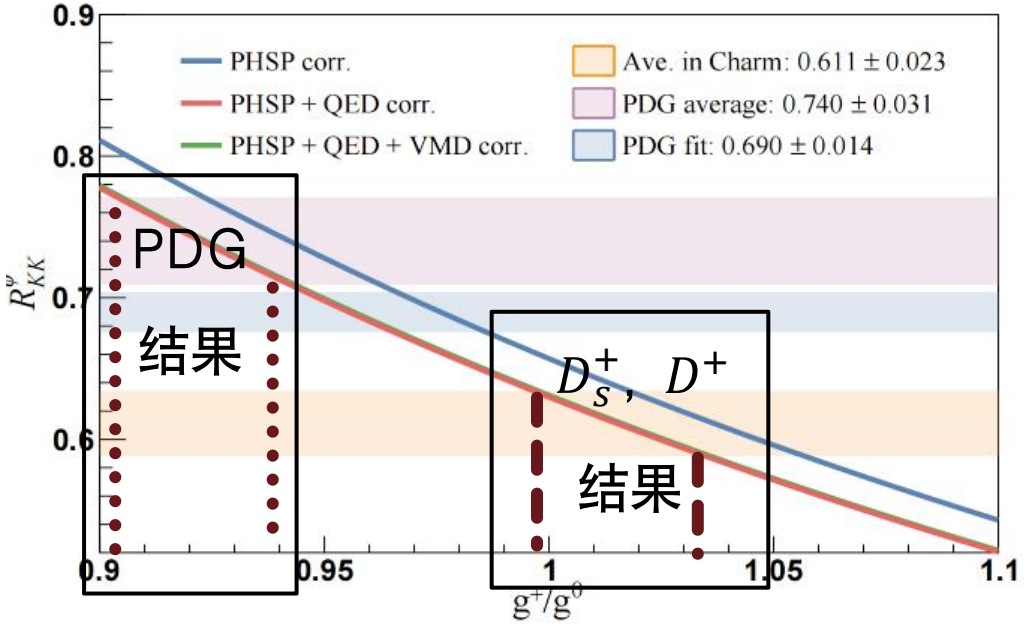
arxiv:2605.11464

粲介子衰变中R_{KK}^{ϕ}结果与其他结果的比较。



- ✓ 粲衰变中的R_{KK}^{ϕ}平均值与DUBNICKA理论计算结果[1]一致，但PDG给出的结果存在较大差异。
- ✓ 粲衰变中R_{KK}^{ϕ}的测量结果与CMD3的测量结果一致。
- ✓ 未来PDG对所有ϕ衰变分支比进行全面的重新评估。

R_{KK}^{ϕ}随ϕK^+K^-与$\phi K_S^0 K_L^0$ 耦合比g^+/g^0的变化关系。



- ✓ **理论预言**[2,3]：相空间差异（PHSP）修正、**电磁辐射** (QED) 修正以及**通过矢量介子主导（VMD修正）**引入的结构依赖性效应。
- ✓ **同位旋对称下忽略K与K^0的质量差，g^+/g^0=1**
- ✓ PDG平均值和拟合值表明，g^+/g^0 显著小于1，通过粲衰变测得的 R_{KK}^{ϕ}给出的g^+/g^0与1一致。

[1]Phys. Rev. D 110, 054019 (2024) [2] Phys. Lett. B 486,406 (2000) [3] Phys. Rev. D 78, 077301 (2008)]

总结展望

总结

BESIII通过对粲介子的多个衰变道独立测量并展开振幅分析研究，一致发现 ϕ 介子衰变分支比与PDG现有值存在显著差异。

短期目标

- ✓ 更高统计量：BESIII 已积累 20.3 fb^{-1} (3.773 GeV) 和 7.33 fb^{-1} (4.128–4.226 GeV)，未来数据量将进一步增加。未来更高统计量数据和拓展测量道，将进一步揭示 ϕ 介子衰变中隐藏的物理效应，并为新物理搜寻提供关键输入。
- ✓ 拓展测量道：将 ϕ 分支比测量拓展到更多粲强子衰变道（D^0, J/ψ 等含 ϕ 末态的过程）
- ✓ 联合分析：结合 D_s^+, D^+, D^0 等多条路径，给出更精确的粲介子平均 R_{KK}^{ϕ} 值

中长期方向

- ✓ 理论-实验协同：粲介子测量结果需要非微扰 QCD 理论（矢量介子主导模型、末态相互作用计算）给出解释
- ✓ 推动 PDG 数据重评：当前 PDG 平均值未纳入 CMD2 和 CMD3 结果，而这两个实验与 BESIII 粲介子结果一致，需要全面重新评估

感谢各位的垂听