



LHCb 实验上的 γ 角测量

北京大学 魏亚静

第四届强子与重味物理理论与实验联合研讨会 兰州 2025年3月24日 味道本征态



Phys. Rev. Lett. 10 (1963) 531 Prog. Theor. Phys. 49 (1973) 652]

$$V_{CKM} = \begin{bmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}|e^{-i\gamma} \\ -|V_{cs}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}|e^{-i\beta} & -|V_{ts}|e^{i\beta_s} & |V_{tb}| \end{bmatrix}$$

■ CKM 矩阵的幺正性要求幺正三角形关系

质量本征态

 $\begin{bmatrix} d'\\s'\\b' \end{bmatrix} = V_{CKM} \begin{bmatrix} d\\s\\b \end{bmatrix}$

标准模型中的 CP 破坏



- 幺正三角形的面积代表 CP 破坏的大小
- 通过测量 CKM 矩阵参数探索标准模型之外的新物理







• γ 角通过树图阶过程测量,理论误差小 $|\delta\gamma| \leq O(10^{-7})$

JHEP 01 (2014) 051

• 实验测量结果



- 若直接测量与间接测量的结果存在显著差异,则标志着新物理现象的存在
- 提升 γ 角的直接测量精度检验标准模型





■ 利用 $b \rightarrow u$ 和 $b \rightarrow c$ 过程的干涉测量,例如 $(B^{\pm} \rightarrow D^{0}K^{\pm}) + (B^{\pm} \rightarrow \overline{D}^{0}K^{\pm})$







Dump

Low B (pp) High Luminosity

CMS

Octant 5

RF & Future Exp

- LHCb 探测器: 致力于研究重味物理, 几何接受度 2 < η < 5
- γ角的精确测量是LHCb的首要物理目标之一







- 2022年 LHCb 测量结果: γ^{dir.}_{LHCb} = (63.8^{+3.5}_{-3.7})° _{LHCb-CONF-2022-002}
- 世界平均测量结果由LHCb实验主导
- LHCb上测量 γ 角的黄金道: $B^{\pm} \rightarrow D^{0}K^{\pm}$
 - LHCb 上的 $B^{\pm} \rightarrow D^{0} [\rightarrow K_{S}^{0} h^{+} h^{-}] h^{\pm}$ 中给出了误差最小 的单一衰变道测量结果

 $\gamma = (68.7^{+5.2}_{-5.1})^{\circ}$ Jhep 02 (2021) 169

- 用多种衰变道测量提高测量精度
 - 不同道对 γ 角和强衰变参数的限制不同





2024年 LHCb 上γ 角测量结果

2024年LHCD反何 J	γ用机采浊丁/配□	的组合论	则里纪禾	LHCb-CONF-2024-00
B decay	D decay	Ref.	Dataset	Status since
				Ref. [14]
$B^{\pm} \rightarrow Dh^{\pm}$	$D ightarrow h^{\pm} h'^{\mp}$	[35]	Run 1&2	As before
$B^{\pm} \rightarrow Dh^{\pm}$	$D \to h^+ h^- \pi^+ \pi^-$	[19]	Run 1&2	New
$B^{\pm} \rightarrow Dh^{\pm}$	$D \to K^\pm \pi^\mp \pi^+ \pi^-$	[36]	Run 1&2	As before
$B^{\pm} \rightarrow Dh^{\pm}$	$D ightarrow h^{\pm} h^{\prime\mp} \pi^0$	[37]	Run 1&2	As before
$B^{\pm} \rightarrow Dh^{\pm}$	$D ightarrow K_{ m S}^0 h^+ h^-$	[38]	Run 1&2	As before
$B^{\pm} \rightarrow Dh^{\pm}$	$D o K^0_{ m S} K^\pm \pi^\mp$	[39]	Run 1&2	As before
$B^{\pm} \rightarrow D^{*}h^{\pm}$	$D \to h^{\pm} h'^{\mp} \ (\mathrm{PR})$	[35]	$\mathrm{Run}\;1\&2$	As before
$B^{\pm} \rightarrow D^* h^{\pm}$	$D \to K_{ m S}^0 h^+ h^- ~({ m PR})$	[20]	Run 1&2	New
$B^{\pm} \rightarrow D^* h^{\pm}$	$D \rightarrow K_{\rm S}^0 h^+ h^- ({\rm FR})$	[21]	Run 1&2	New
$B^{\pm} \rightarrow DK^{*\pm}$	$D ightarrow h^{\pm} h'^{\mp}$	$[22]^{\dagger}$	Run 1&2	Updated
$B^{\pm} \rightarrow DK^{*\pm}$	$D \to h^\pm \pi^\mp \pi^+ \pi^-$	$[22]^{\dagger}$	Run 1&2	Updated
$B^{\pm} \rightarrow DK^{*\pm}$	$D ightarrow K_{ m S}^0 h^+ h^-$	$[22]^{\dagger}$	Run 1&2	New
$B^{\pm} \rightarrow Dh^{\pm}\pi^{+}\pi^{-}$	$D ightarrow h^{\pm} h'^{\mp}$	[40]	Run 1	As before
$B^0 \rightarrow DK^{*0}$	$D ightarrow h^{\pm} h'^{\mp}$	[23]	$\mathrm{Run}\;1\&2$	Updated
$B^0 \rightarrow DK^{*0}$	$D \to h^\pm \pi^\mp \pi^+ \pi^-$	[23]	Run 1&2	Updated
$B^0 \rightarrow DK^{*0}$	$D ightarrow K_{ m S}^0 h^+ h^-$	[24]	Run 1&2	Updated
$B^0 \rightarrow D^{\mp} \pi^{\pm}$	$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$	[41]	Run 1	As before
$B^0_s \to D^{\mp}_s K^{\pm}$	$D^+_s ightarrow h^+ h^- \pi^+$	$[25,42]^\dagger$	Run 1&2	Updated
$B^0_s \rightarrow D^{\mp}_s K^{\pm} \pi^+ \pi^-$	$D_s^+ ightarrow h^+ h^- \pi^+$	[43]	Run 1&2	As before
<u>- s</u> · <u>- s</u> <u>-</u> · · · ·	- 8	[]		j

2022年 $\gamma_{\text{LHCb}}^{\text{dir.}} = (63.8^{+3.5}_{-3.7})^{\circ}$

2024年 $\gamma_{LHCb}^{dir.} = (64.6 \pm 2.8)^{\circ}$

BPGGSZ方法测量 γ 角

Phys. Rev. D68 (2003) 054018 Eur. Phys. J. C47 (2006) 347



利用 D 衰变到多体末态的衰变道(如K⁰_Sπ⁺π⁻, K⁰_SK⁺K⁻, K⁰_Sπ⁺π⁻π⁰) 测量 γ 角



■ 利用B⁺、B⁻衰变在 Dalitz 图上的区别分区间测量









- *D* 介子衰变到 *CP*-even 本征态:
 - $D \rightarrow K^+K^-$, $D \rightarrow \pi^+\pi^-$, $D \rightarrow \pi^+\pi^-(\pi^+\pi^-)$
- 可观测量
 - 衰变概率与CKM增强的模式的比值

$$R_{CP+} = \frac{\Gamma(B^- \to [h^+h^-]_D K^{*-}) + \Gamma(B^+ \to [h^+h^-]_D K^{*+})}{\Gamma(B^- \to [K^-\pi^+]_D K^{*-}) + \Gamma(B^+ \to [K^+\pi^-]_D K^{*+})} \frac{B(D^0 \to K^-\pi^+)}{B(D^0 \to h^+h^-)}$$
$$= 1 + r_B^2 + 2 \kappa r_B \cos(\delta_B) \cos(\gamma)$$

■ B⁻和 B⁺衰变的不对称性



Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 3257



- D 介子衰变到非 CP 本征态: $D \to K^{\pm}\pi^{\mp}$, $D \to K^{\pm}\pi^{\mp}\pi^{+}\pi^{-}$
- 可观测量
 - Cabbibo增强模式与压低模式的比值

$$R_{ADS} = \frac{\Gamma(B^- \to [\pi^- K^+]_D K^{*-}) + \Gamma(B^+ \to [\pi^+ K^-]_D K^{*+})}{\Gamma(B^- \to [K^- \pi^+]_D K^{*-}) + \Gamma(B^+ \to [K^+ \pi^-]_D K^{*+})} = r_B^2 + r_D^2 + 2 \kappa r_B r_D \cos(\delta_B + \delta_D) \cos(\gamma)$$

$$A_{ADS} = \frac{\Gamma(B^{-} \to [\pi^{-}K^{+}]_{D}K^{*-}) - \Gamma(B^{+} \to [\pi^{+}K^{-}]_{D}K^{*+})}{\Gamma(B^{-} \to [\pi^{-}K^{+}]_{D}K^{*-}) + \Gamma(B^{+} \to [\pi^{+}K^{-}]_{D}K^{*+})} = \frac{2 \kappa r_{B} r_{D} \sin(\delta_{B} + \delta_{D}) \sin(\gamma)}{R_{ADS}}$$

需要由粲工厂输入 D 衰变参数 r_D, δ_D, κ

$B^{\pm} \rightarrow D^* h^{\pm}, D^* \rightarrow D\pi^0 / \gamma, D \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$

JHEP 12 (2023) 013



- 在 $B^{\pm} \rightarrow D^* h^{\pm}, D^* \rightarrow D\pi^0 / \gamma, D \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$ 中测量 γ 角
- 重建整个衰变链,将相空间分区间模型无关地测量
- 联合拟合所有衰变模式、不同相空间区域的 m(Dh[±]) 和 m(Dπ⁰/γ)提取信号产额
- 测量得到此衰变道最精确的γ角测量结果





 $\gamma = (69^{+13}_{-14})^{\circ}$

 $B^{\pm} \rightarrow D^* h^{\pm}, D^* \rightarrow D\pi^0 / \gamma, D \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$

JHEP 02 (2024) 118



- 在 $B^{\pm} \rightarrow D^* h^{\pm}, D^* \rightarrow D\pi^0 / \gamma, D \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$ 中测量 γ 角
- 不重建 D*衰变的中性粒子 π⁰/γ, 将相空间分区间模型无关地测量
- 联合拟合所有衰变模式、不同相空间区域的质量谱 *m*(*Dh*[±])提取部分重建信号产额
- 测量得到 γ 角结果

 $\gamma = (92^{+21}_{-17})^{\circ}$





$B^0 \to DK^{*0}, D \to h^+h^- (h^+h^-)$

JHEP 05 (2024) 025



- $在B^0 \rightarrow DK^{*0}, D \rightarrow h^+h^-(h^+h^-)$ 中测量 γ 角
- 利用 $K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$ 衰变末态的电荷标记 B 介子的味道
- 联合拟合不同 D 衰变道和 B 介子味道的质量谱
- 同时测量了 $B_S^0 \rightarrow DK^{*0}$ 衰变道的 *CP* 破坏参数,未发现 *CP* 破坏的迹象



 $B^0 \to DK^{*0}, D \to h^+h^- (h^+h^-)$

JHEP 05 (2024) 025



- ADS和GLW方法测量结果存在多解
- 与 $B^0 \rightarrow DK^{*0}, D \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$ 结合确定唯一解: $\gamma = (63.2^{+6.9}_{-8.1})^\circ$ Eur. Phys. J. C84 (2024) 206
- γ角测量结果与LHCb平均结果一致
- 新增此结果使LHCb上B⁰衰变道的全局测量平均值与B[±]衰变道的测量结果一致性显著提升



 $B^{\pm} \to DK^{*\pm}, D \to h^{+}h^{-}(h^{+}h^{-}), K_{S}^{0}h^{+}h^{-}$

JHEP 02 (2025) 113



- 同时用ADS, GLW 和 BPGGSZ 方法测量 γ 角
 - $D \to K^{\pm} \pi^{\mp} (\pi^+ \pi^-)$
 - $D \rightarrow \pi^+ \pi^- (\pi^+ \pi^-)$

• $D^0 \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$

• $D \rightarrow K^+K^-$

- Cabbibo 压低的道虽然产额较低,但有较大的CP破坏
- γ角测量结果 γ = (63 ± 13)°
- 首次观测到双Cabbibo压低的道 $B^{\pm} \rightarrow [\pi^{\pm}K^{\mp}]_{D}K^{*\pm} \Pi B^{\pm} \rightarrow [\pi^{\pm}K^{\mp}\pi^{\pm}\pi^{\mp}]_{D}K^{*\pm}$







LHCb-PAPER-2024-020



通过 B⁰_s 衰变与 B⁰_s 混合后衰变的含时振幅
 干涉测量 γ 角



- 利用味道标记的方法判断 B_s 介子产生时的
 味道
 - $\epsilon_{\rm eff} = \epsilon (1 2\omega)^2 \sim 4 8\%$





LHCb-PAPER-2024-020



- CP 破坏观测量依赖于 $\gamma + 2\beta_s$
- 联合拟合 B_S^0 和 D_S^{+} 质量谱,获得每个事例的信号的占比
- 拟合事例信号占比作为事例权重的衰变时间分布,得到 CP 观测量
- 结合 Run1 和 Run 2的测量结果得到 $\gamma = (81^{+12}_{-11})^{\circ}$
- 此测量结果为 B_S^0 衰变中最精确的单个衰变道 γ 角测量结果





1960

1940

2000

1980

2024年LHCb 上 γ 角测量结果

 2024年LHCb发布了γ角和粲强子混合的组合测量 结果

 $\gamma = (64.6 \pm 2.8)^{\circ}$

- 世界上最精确的单一实验测量的 γ 角结果
- 超过 Run1 + Run2 预期的 γ 角测量精度4°
- 不同 B 衰变道的 γ 角结果之间的差别减小
- 含时与不含时衰变道之间的结果较为一致
- 与 D⁰ 介子实验结果联合拟合,提升D⁰混合和 CP 破坏参数测量结果







- LHCb 2024年公布了新的 γ 角测量结果,包含了近两年的新结果
 - $B^{\pm} \rightarrow D^* K^{\pm}, D^* \rightarrow D\pi^0/\gamma, D \rightarrow K^0_S h^+ h^-$
 - $B^0 \rightarrow DK^{*0}, D \rightarrow h^+h^- (h^+h^-)$
 - $B^{\pm} \rightarrow DK^{*\pm}, D \rightarrow h^+h^- (h^+h^-), K^0_S h^+h^-$
 - $\bullet \quad B^0_S \to D^{\mp}_S K^{\pm}$
- 给出了目前世界上最精确的单一实验测量结果
 γ = (64.6 ± 2.8)°
- 误差由统计误差主导
 - 仍有Run 1-2 部分衰变道结果的正在分析中, 未来将会加入组合结果
- 随着 Run 3 数据(~50 fb⁻¹)的采集与分析, γ
 角的测量精度将达到 1°以下
- Run 4-6 的数据(~300 fb⁻¹)加入后,预计γ角 测量精度将达到0.35°以下
- 作为检验标准模型的"黄金探针",未来将出现更精确
 的 γ 角测量结果







- LHCb 2024年公布了新的 γ 角测量结果,包含了近两年的新结果
 - $B^{\pm} \rightarrow D^* K^{\pm}, D^* \rightarrow D\pi^0/\gamma, D \rightarrow K^0_S h^+ h^-$
 - $B^0 \rightarrow DK^{*0}, D \rightarrow h^+h^-(h^+h^-)$

 - $\bullet \quad B^0_S \to D^{\mp}_S K^{\pm}$
- 给出了目前世界上最精确的单一实验测量结果
 γ = (64.6 ± 2.8)°
- 误差由统计误差主导
 - 仍有Run 1-2 部分衰变道结果的正在分析中, 未来将会加入组合结果
- 随着 Run 3 数据(~50 fb⁻¹)的采集与分析, γ
 角的测量精度将达到 1°以下
- Run 4-6 的数据(~300 fb⁻¹)加入后,预计γ角 测量精度将达到0.35°以下
- 作为检验标准模型的"黄金探针",未来将出现更精确
 的 γ 角测量结果



