

# Observation of charge–parity symmetry breaking in baryon decays

杨雪婷

北京大学

第十四届“晨光杯”青年优秀论文评选

2026年7月15日

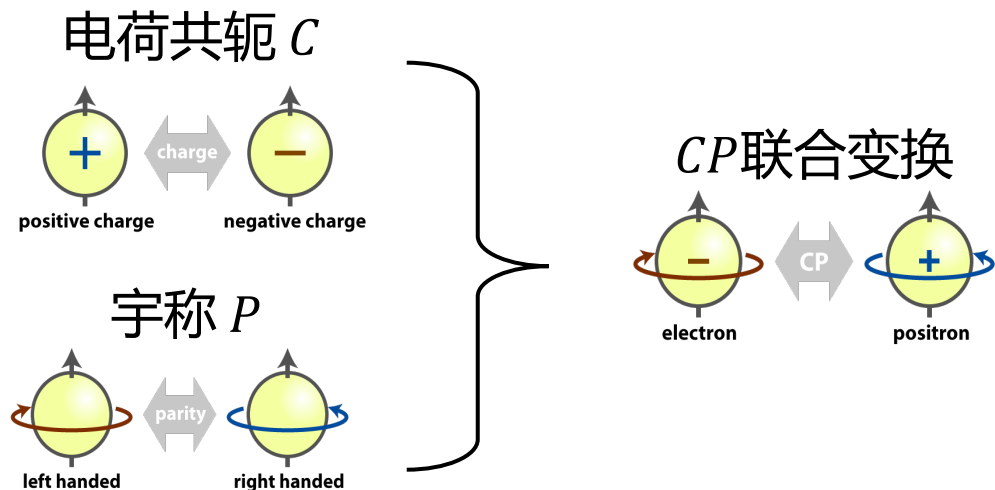
# 报告大纲

- 研究背景
- 研究内容
- 成果影响

# 报告大纲

- 研究背景
- 研究内容
- 成果影响

# 电荷共轭-宇称对称性 ( $CP$ ) 破坏



## ➤ $CP$ 破坏

- 物理规律在  $CP$  联合变换下不再保持不变
- 可表现为正粒子与反粒子衰变性质存在差异

正粒子衰变

$$\Lambda_b^0 \rightarrow X$$

$\neq$

反粒子衰变

$$\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{X}$$

## ➤ $CP$ 破坏是粒子物理的核心研究方向之一

- 理解标准模型的味结构
- 产生宇宙正反物质不对称性的必要条件之一 (Sakharov, 1967)



# CP破坏的研究历史



重子是否存在CP破坏?

- 实验相继在**奇异介子** (1964)、**底介子** (2001)、**粲介子** (2019) 中发现CP破坏
- CKM机制**预期在**重子**衰变中也存在可观的CP破坏, 长期未被实验证实

# 重子 $CP$ 破坏

- 根据CKM机制，**奇异重子**，**粲重子**中的 $CP$ 破坏预期分别为 $\mathcal{O}(10^{-5})$ ， $\mathcal{O}(10^{-3})$

- **奇异重子：**

- $A_{CP}(\Lambda \rightarrow p\pi^-) = (-0.25 \pm 0.48)\%$  [[BESIII](#)]

当前实验结果与理论预期相容

- **粲重子：**

- $A_{CP}(\Lambda_c^+ \rightarrow pK^+K^-) - A_{CP}(\Lambda_c^+ \rightarrow p\pi^+\pi^-) = (0.30 \pm 1.1)\%$  [[LHCb](#)]

- $A_{CP}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda K^+) = (2.1 \pm 2.6)\%$  [[Belle](#)]

- CKM机制预言**底重子**衰变中的 $CP$ 破坏可达 $\mathcal{O}(10^{-1})$ ，实验上进行了广泛测量

- ✓ **底介子：**

- $A_{CP}(B^0 \rightarrow K^+\pi^-) = (-8.2 \pm 0.5)\%$  [[LHCb](#)]

- $A_{CP}(B_S^0 \rightarrow K^-\pi^+) = (23.6 \pm 1.7)\%$  [[LHCb](#)]

- 底重子：**

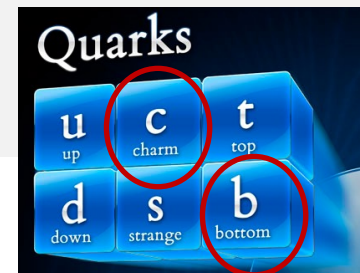
- $A_{CP}(\Lambda_b^0 \rightarrow pK^-) = (-1.1 \pm 0.8)\%$  [[LHCb](#)]

- $A_{CP}(\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-) = (0.2 \pm 0.9)\%$  [[LHCb](#)]

底重子是否存在 $CP$ 破坏？

# 报告大纲

- 研究背景
- 研究内容
- 成果影响



➤ LHCb是大型强子对撞机 (LHC) 上**专**为研究含重味夸克( $b, c$ )的强子设计的实验

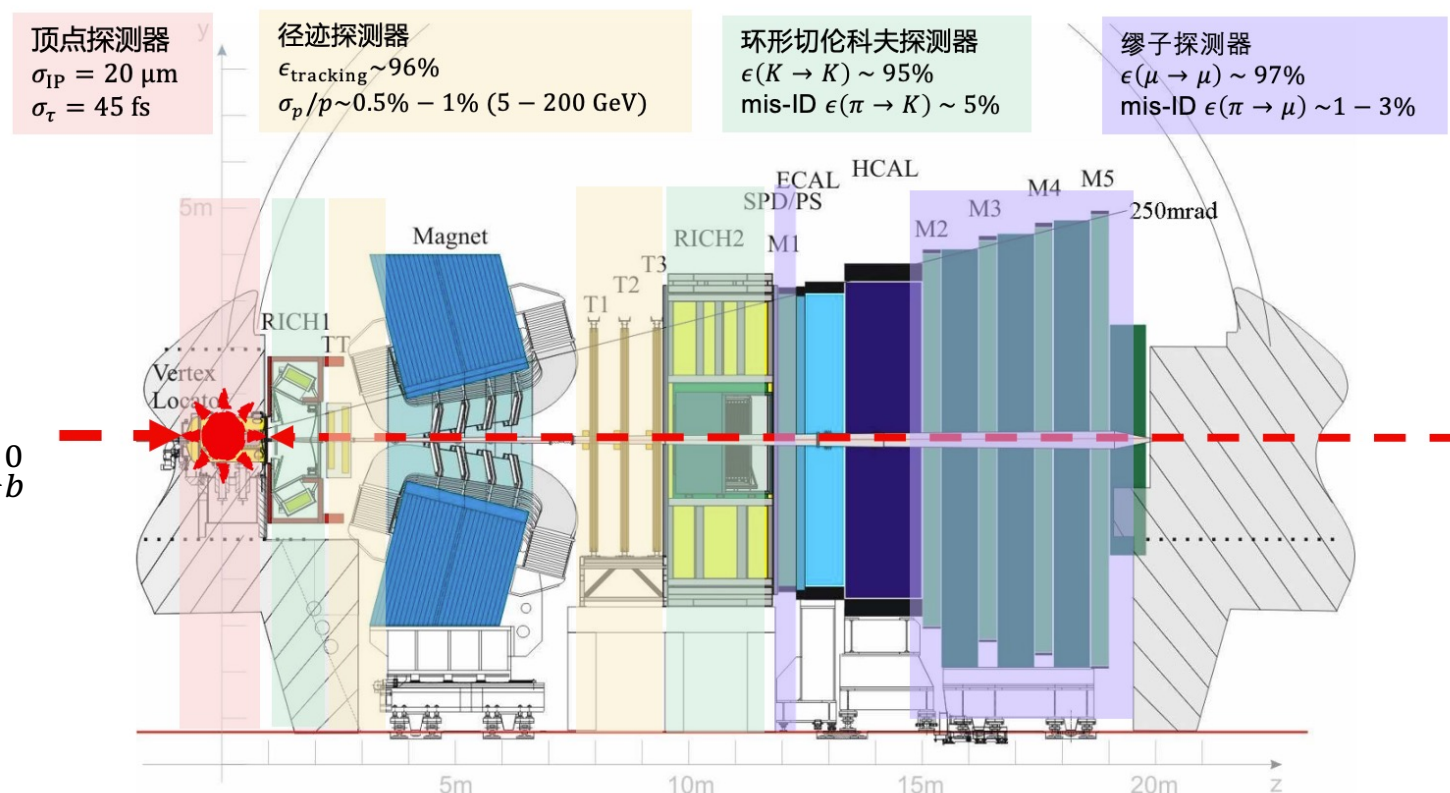
- 精确探测衰变顶点
- 精确测量径迹动量
- 有效鉴别粒子类型

- **高效采集底重子**

❖ 2011-2018年, LHCb约采集到:

$$9 \text{ fb}^{-1} \times 500 \mu\text{b} \times \mathcal{O}(10^{-1}) \sim 10^{11} \Lambda_b^0$$

↓      ↓      ↓  
积分亮度   产生截面   LHCb接受度



[JINST 3 \(2008\) S08005](#)

[IJMPA 30 \(2015\) 1530022](#)

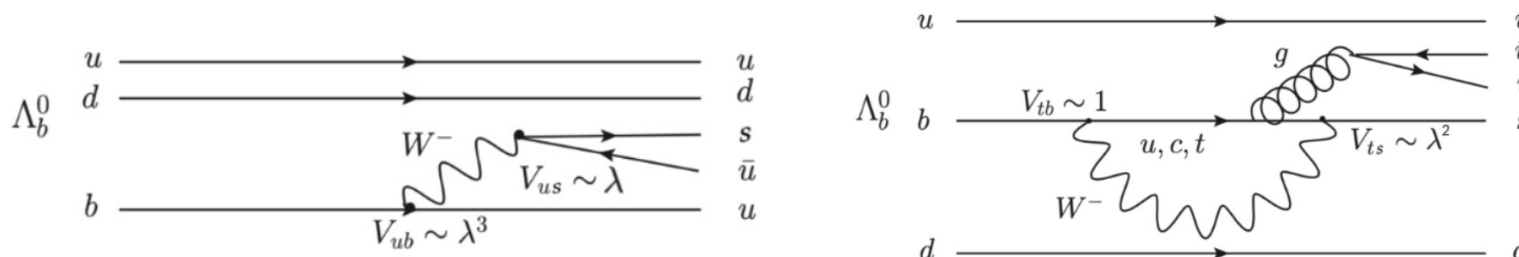
# 衰变模式

➤ 选择底重子四体衰变:  $\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^-$

➤ 理论: 可能存在显著CP破坏

❖ CP破坏来自于具有不同相位的振幅之间的干涉

- 同时存在树图和圈图的振幅贡献 (弱相位差)



- 衰变包含丰富的中间共振态贡献 (强相位差)

$$\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda^*(\rightarrow p K^-) \pi^+ \pi^-, \Lambda_b^0 \rightarrow \Delta^{++}(\rightarrow p \pi^+) K^- \pi^-, \Lambda_b^0 \rightarrow p K^- f_0(\rightarrow \pi^+ \pi^-)$$

➤ 实验: 信号产额高、末态粒子易重建

正粒子衰变:  $\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^-$   $\longleftrightarrow$  反粒子衰变:  $\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{p} K^+ \pi^- \pi^+$

$$CP\text{破坏: } A_{CP} \equiv \frac{\Gamma(\Lambda_b^0)/\Gamma_{\text{tot}} - \Gamma(\bar{\Lambda}_b^0)/\bar{\Gamma}_{\text{tot}}}{\Gamma(\Lambda_b^0)/\Gamma_{\text{tot}} + \Gamma(\bar{\Lambda}_b^0)/\bar{\Gamma}_{\text{tot}}}$$

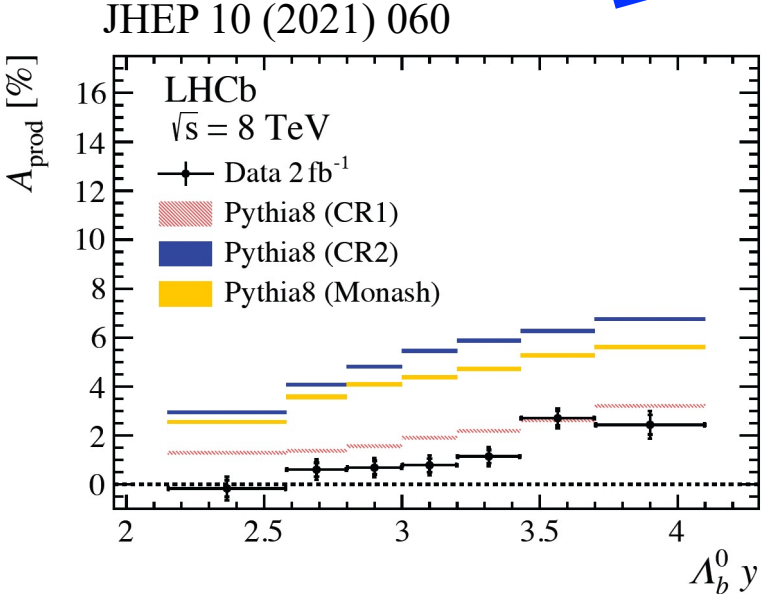
❖ 正、反粒子衰变分宽度的相对差别

$$\begin{aligned} \text{实验测量: } A_{\text{yield}} &= \frac{N - \bar{N}}{N + \bar{N}} \\ &= A_{CP} + A_{\text{prod}} + A_{\text{det}} \end{aligned}$$

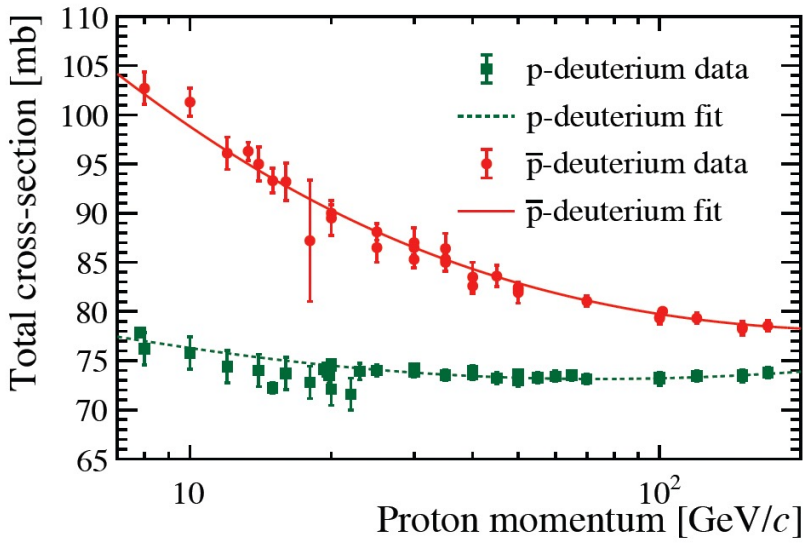
- $A_{\text{prod}}$ : 正、反底重子产率的不对称性 ( $\sim 1\%$ )
- $A_{\text{det}}$ : 探测器对正、反粒子探测效率的不对称性 ( $\sim 0.5\%$ )

# 产生与探测过程中的不对称性来源

$$A_{\text{yield}} = A_{CP} + A_{\text{prod}} + A_{\text{det}}$$



- 正、反底重子产率不对称性随重子快度的变化关系

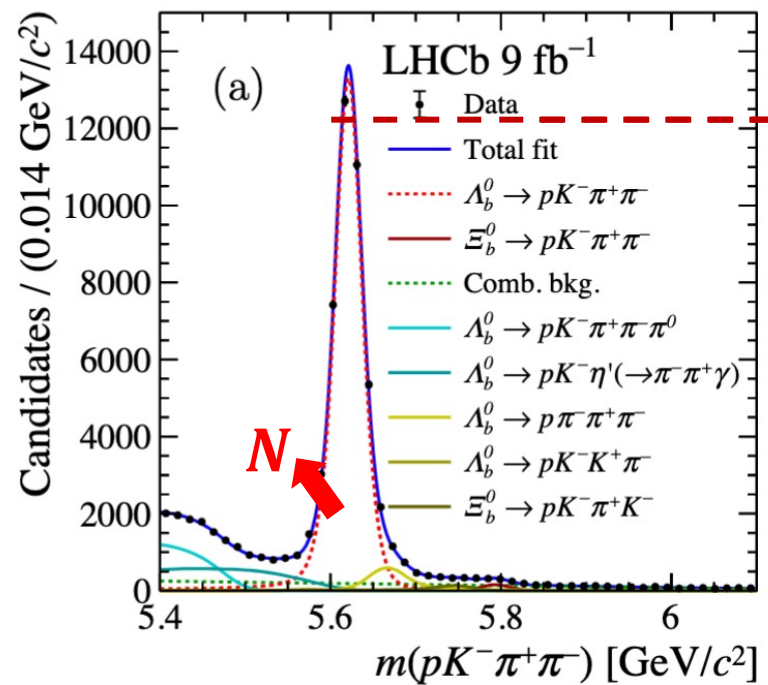


- 正、反质子与氘原子反应截面随质子动量的变化关系

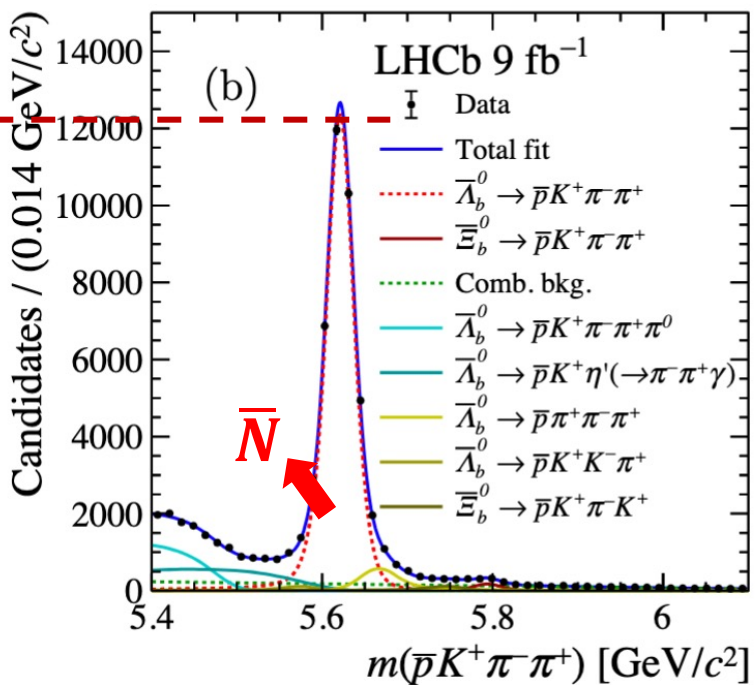
# 提取信号产额并计算 $A_{\text{yield}}$

➤极大似然法拟合质量谱，得到**信号产额**

正粒子衰变:  $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^-\pi^+\pi^-$



反粒子衰变:  $\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{p}K^+\pi^-\pi^+$



➤  $A_{\text{yield}}(\Lambda_b^0 \rightarrow pK^-\pi^+\pi^-) = \frac{N - \bar{N}}{N + \bar{N}} = (3.71 \pm 0.39)\%$

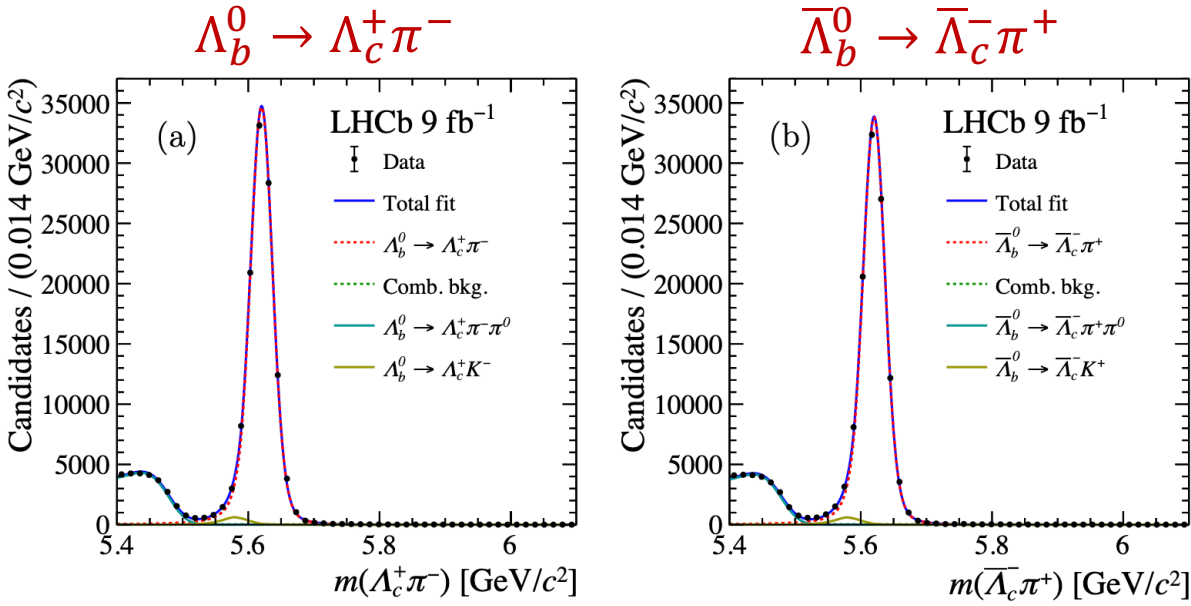
# 扣除产生与探测过程中的不对称性

## ➤利用控制道测量相对CP破坏

- 信号道  $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^-\pi^+\pi^-$  :  $A_{CP}^{sig} = A_{yield}^{sig} - A_{prod}^{sig} - A_{det}^{sig}$
- 控制道  $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+(\rightarrow pK^-\pi^+)\pi^-$  :  $A_{CP}^{con} = 0 = A_{yield}^{con} - A_{prod}^{con} - A_{det}^{con}$

$A_{CP}^{sig} = \Delta A_{yield} - (\Delta A_{prod} + \Delta A_{det})$

- 初态、末态均一致，有效抵消产生、探测等系统性影响  
 $\approx 0$  (系统不对称近似抵消)



$$A_{yield}^{con}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-) = (1.25 \pm 0.23)\%$$

$$\Delta A_{prod} + \Delta A_{det} = (0.01 \pm 0.10)\%$$

↓  
❖ 测量系统误差

# 测量结果

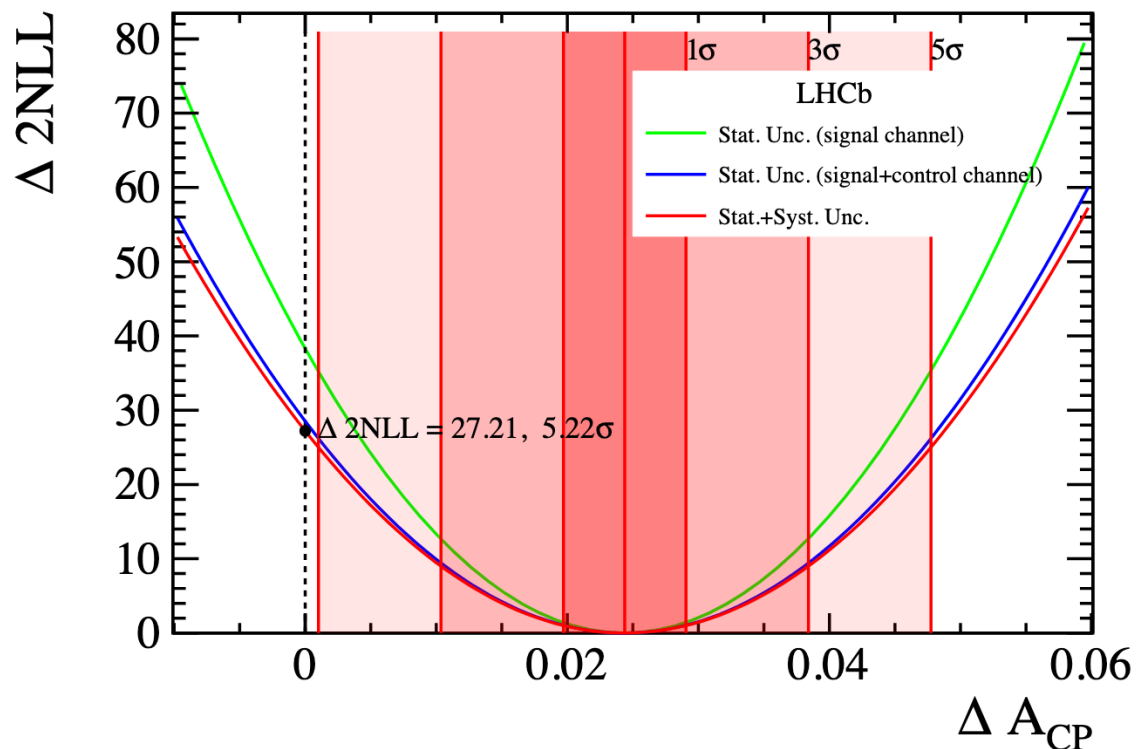
➤  $\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^-$  衰变中的直接  $CP$  破坏:

$$A_{CP} = (2.45 \pm 0.46 \pm 0.10)\%$$

统计误差 系统误差

❖  $CP$ 破坏显著性 $5.2\sigma$

❖ 重子存在 $CP$ 破坏



# 测量结果

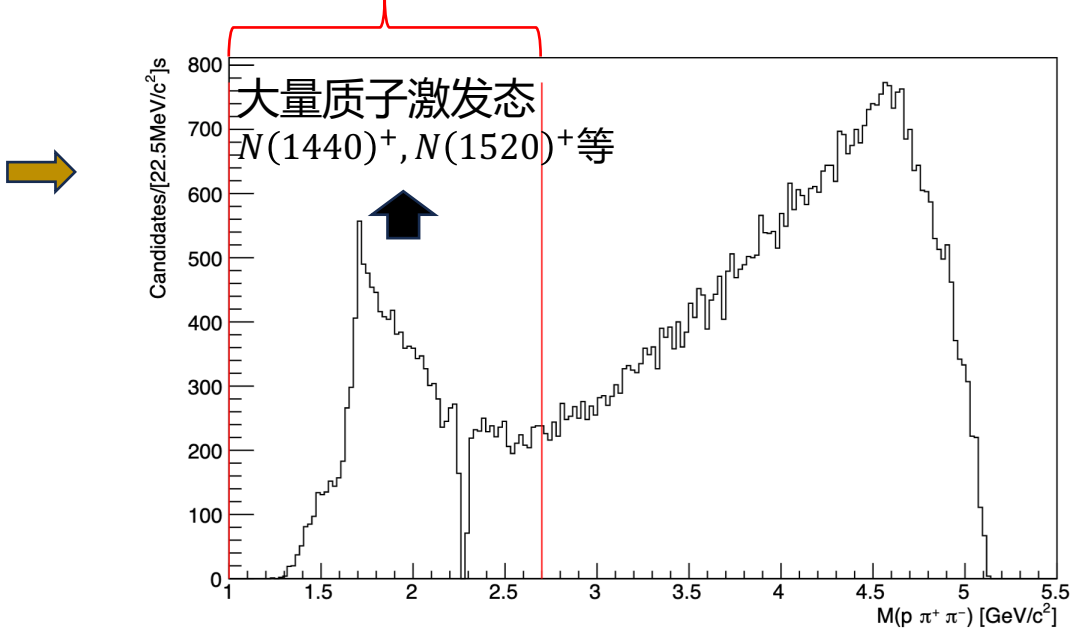
➤ 探索不同共振态成分对CP破坏的贡献

| Decay topology                                 | Mass region (GeV/c <sup>2</sup> )                                                 | $\mathcal{A}_{CP}$        |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| $\Lambda_b^0 \rightarrow R(pK^-)R(\pi^+\pi^-)$ | $m_{pK^-} < 2.2$<br>$m_{\pi^+\pi^-} < 1.1$                                        | $(5.3 \pm 1.3 \pm 0.2)\%$ |
| $\Lambda_b^0 \rightarrow R(p\pi^-)R(K^-\pi^+)$ | $m_{p\pi^-} < 1.7$<br>$0.8 < m_{\pi^+K^-} < 1.0$<br>or $1.1 < m_{\pi^+K^-} < 1.6$ | $(2.7 \pm 0.8 \pm 0.1)\%$ |
| $\Lambda_b^0 \rightarrow R(p\pi^+\pi^-)K^-$    | $m_{p\pi^+\pi^-} < 2.7$                                                           | $(5.4 \pm 0.9 \pm 0.1)\%$ |
| $\Lambda_b^0 \rightarrow R(K^-\pi^+\pi^-)p$    | $m_{K^-\pi^+\pi^-} < 2.0$                                                         | $(2.0 \pm 1.2 \pm 0.3)\%$ |

➤ 在  $\Lambda_b^0 \rightarrow N^{*+}(\rightarrow p\pi^+\pi^-)K^-$  衰变中测得:

➤  $\mathcal{A}_{CP} = (5.4 \pm 0.9 \pm 0.1)\%$   
(显著性  $6.0\sigma$ )

❖ 所选的  $N^{*+}$  共振态区域



➤  $\Lambda_b^0 \rightarrow N^{*+}(\rightarrow p\pi^+\pi^-)K^-$  衰变的  $CP$  破坏测量结果与基于标准模型的初步预言一致

| decay processes                                 | Scenarios | global CPV | CPV of $\cos\theta < 0$ | CPV of $\cos\theta > 0$ |
|-------------------------------------------------|-----------|------------|-------------------------|-------------------------|
| $\Lambda_b^0 \rightarrow (\Delta^{++}\pi^-)K^-$ | S1        | 5.9%       | 8.0%                    | 3.6%                    |
|                                                 | S2        | 5.8%       | 6.3%                    | 5.3%                    |
|                                                 | S3        | 5.6%       | 4.3%                    | 7.0%                    |

J.P. Wang, F.S. Yu,  
CPC 48 (2024) 101002

- ❖ 多体衰变的计算难度较大
- ❖ 大量共振态进一步增加了计算复杂度

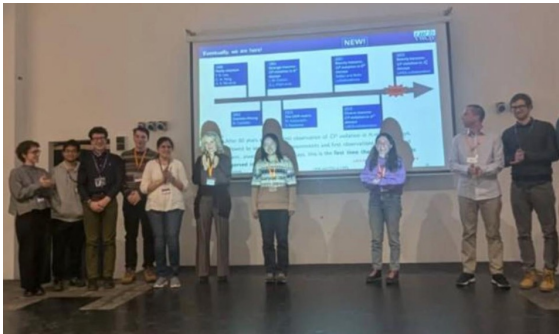
# 申请人贡献

- 该研究由北京大学、中国科学院大学、华中师范大学及法国克莱蒙费朗大学等LHCb成员单位合作完成
- 申请人系统地完成了信号筛选、背景建模、系统误差评估、统计检验等核心工作，并参与论文主体撰写

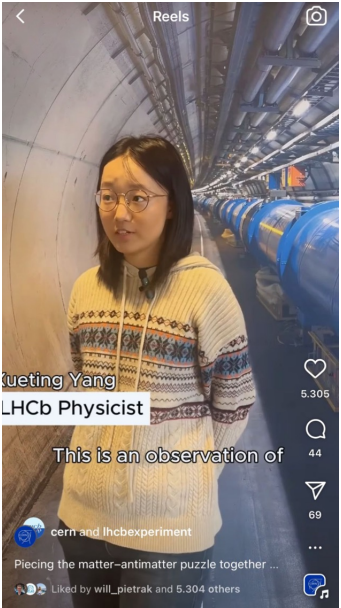
❖ 申请人代表 LHCb 实验组在 EPS-HEP 2025 (欧洲物理学会高能物理分会) 汇报该成果



❖ 参与LHCb成果发布 (Moriond 2025)



❖ 受邀参与媒体采访，撰写科普内容，向公众普及相关科学知识



# 报告大纲

- 研究背景
- 研究内容
- 成果影响

# 论文发表情况

- 该论文于2025年7月16日发表于《自然》杂志 [[Nature 643, 1223–1228 \(2025\)](#)]
  - 截至2026年7月14日，INSPIRE 数据库显示该论文已被引用 91 次

## Observation of charge–parity symmetry breaking in baryon decays

LHCb Collaboration • [Roel Aaij \(Nikhef, Amsterdam\)](#) [Show All\(1167\)](#)

Mar 21, 2025

6 pages

Published in: *Nature* 643 (2025) 8074, 1223–1228

Published: Jul 16, 2025

e-Print: [2503.16954](#) [hep-ex]

DOI: [10.1038/s41586-025-09119-3](#)

Report numbers: LHCb-PAPER-2024-054, CERN-EP-2025-031

Experiments: [CERN-LHC-LHCb](#)

View in: [CERN Document Server](#), [HAL Science Ouverte](#), [ADS Abstract Service](#)

 pdf

 links

 cite

 claim

 reference search

 91 citations

## A new piece in the matter-antimatter puzzle

2025.03.25

The LHCb experiment at CERN has revealed a fundamental asymmetry in the behaviour of particles called baryons

25 MARCH, 2025

Yesterday, at the annual [Rencontres de Morion](#)

collaboration at CERN reported a new milestone in our understanding of the subtle yet profound differences between matter and antimatter. In its [analysis](#) of large quantities of data produced by the Large Hadron Collider ([LHC](#)), the international team found overwhelming evidence that particles known as baryons, such as the protons and neutrons that make up atomic nuclei, are subject to a mirror-like asymmetry in nature's fundamental laws that causes matter and antimatter to behave differently. The discovery provides new ways to address why the elementary particles that make up matter fall into the neat patterns described by the Standard Model of particle physics, and to explore why matter apparently prevailed over antimatter after the Big Bang.

理解物质与反物质之间差异的一个新里程碑

为解释构成物质的基本粒子的味结构，以及探索为何大爆炸后物质显著多于反物质，提供了新的研究途径

nature

Explore content ▾ About the journal ▾ Publish with us ▾ Subscribe

[nature](#) > [news](#) > article

## Why is there more matter than antimatter? CERN result offers tantalizing new clue

**Physicists have spotted a difference in the way matter and antimatter baryons decay, which could help to explain a major cosmic mystery.**

Physicists have, for the first time, seen a matter particle from the proton family behave in a fundamentally different way from its [antimatter](#) twin. The finding – which fits with behaviours predicted by the standard model of particle physics – could help researchers in their struggle to explain why matter is so abundant compared with antimatter, something that current theories cannot do.

帮助理解为什么物质远多于反物质

2025.03.26

In the latest work, researchers observed subtle differences between the decay rates of a particle called the beauty-lambda baryon and its antimatter counterpart. The team analysed data from 2009 to 2018 for a certain decay of these baryons into a proton and three mesons – light, unstable particles comprising two quarks.

The evidence for a difference in decay rate between the matter and antimatter versions of the beauty-lambda baryon was overwhelming. Physicists calculate that the odds of such a discrepancy occurring by chance is less than 1 in 3 million.

The discovery is “a major milestone”, says Tim Gershon, a particle physicist at the University of Wa

重子CP破坏的发现是一个重要里程碑

### Long-sought phenomenon

The finding could offer fresh insight into why there is a dominance of matter over antimatter – “one of the main mysteries in particle physics”, says Tara Shears, a particle physicist at the University of Liverpool, UK, who also works on the LHCb experiment.

# 其他主流媒体报道

The New York Times

### New Clue to How Matter Outlasted Antimatter at the Big Bang Is Found

Physicists working at the CERN particle physics lab said they detected a slight but significant difference in how particles of matter and antimatter decay.

- 《纽约时报》

symmetry

follow

topics

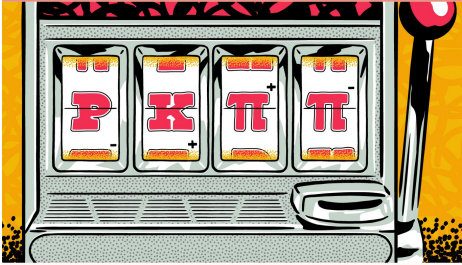


Illustration by Sandbox Studio, Chicago with Steve Shanabroch

### Spot the difference

04/29/25 | By Sarah Charley

LHCb's discovery of proton-like particles behaving differently than their antimatter counterparts brings scientists one step closer to finding out why antimatter disappeared in the early universe.

- 科普杂志《Symmetry》

SCI AM

JULY 16, 2025 | 4 MIN READ

### Mysterious Antimatter Physics Discovered at the Large Hadron Collider

The LHCb experiment has observed a new difference between matter and antimatter in particles called baryons

BY CLARA MOSKOWITZ EDITED BY LEE BILLINGS & SARAH LEWIN FRASIER

- 《科学美国人》

PBS



### LHC ANTIMATTER BREAKTHROUGH

Why Didn't Antimatter Destroy The Universe? | LHC Breakthrough

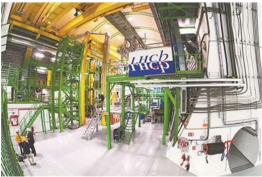
PBS Space Time

- YouTube 热门科普频道 PBS Space Time

## 重子CP破坏现象获观测

2025年03月27日07:38 | 来源：科技日报

Tv 小字号



LHCb合作组首次在重子衰变中观测到CP破坏现象，不仅填补了重子CP破坏研究的空白，也为进一步探究CP破坏机制奠定了坚实基础。图片来源：欧洲核子研究中心官网

科技日报北京3月26日电（记者刘霞）据欧洲核子研究中心官网26日报道，在意大利举行的莫里翁年度会议上，该机构的大型强子对撞机上的底夸克实验（LHCb）合作组宣布，以压倒性证据观测到了重子的“电荷共轭-宇称联合变换对称性破坏”（以下简称“CP破坏”）现象。这一里程碑式进展为破解正反物质不对称之谜提供了新思路。

- 《科技日报》

鳳凰網 财经 财经 > 财经滚动新闻 > 正文

## 重子CP破坏现象获观测 有助理解正反物质不对称问题

C 财联社 关注

2025年03月27日 07:18:04 来自北京

0人参与 0评论

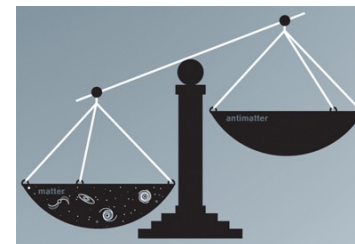
分享 收藏 评论

【重子CP破坏现象获观测 有助理解正反物质不对称问题】财联社3月27日电，据欧洲核子研究中心官网26日消息，在意大利举行的莫里翁年度会议上，该机构的大型强子对撞机上的底夸克实验（LHCb）合作组宣布，以压倒性证据观测到了重子的“电荷共轭-宇称联合变换对称性破坏”（以下简称“CP破坏”）现象。这一里程碑式进展为破解正反物质不对称之谜提供了新思路。

- 凤凰网

# 总结

- $CP$ 破坏是理解标准模型、寻找新物理的重要研究方向
- 首次观测到重子衰变中的 $CP$ 破坏
  - 对称性研究历程中的重要里程碑
  - 进一步检验标准模型，并为探索新物理开辟新的路径



# 谢谢!