



兰州大学
LANZHOU UNIVERSITY

第十四届晨光杯青年优秀论文评选

BESIII实验上超子正反物质不对称性 精确测量

答 辩 人：张景旭

依托单位：兰州大学

目录

□ 研究背景

□ 成果介绍

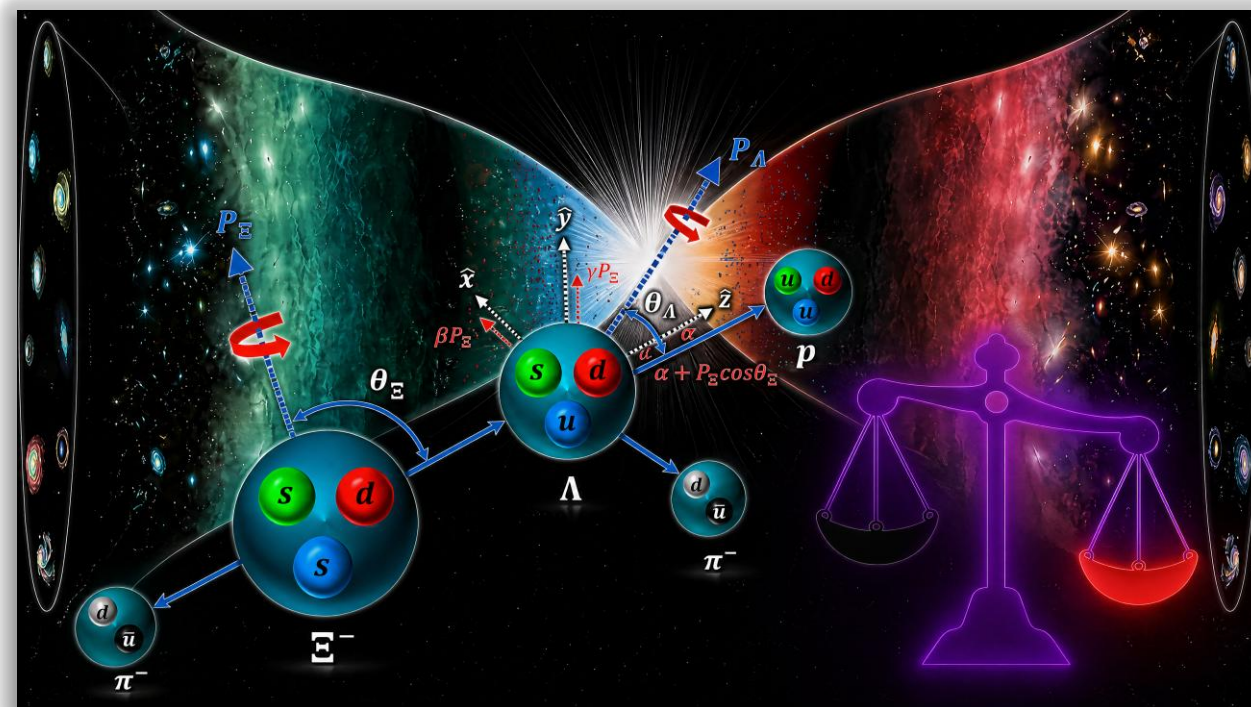
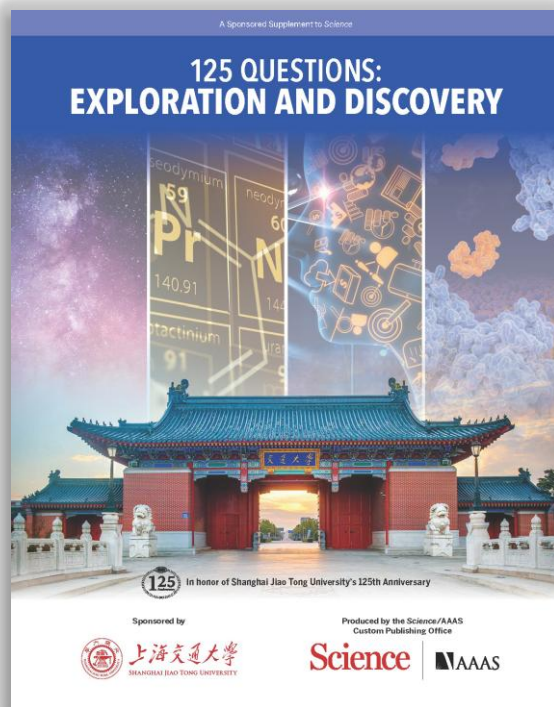
□ 文章影响



本人为该文章实际第一作者

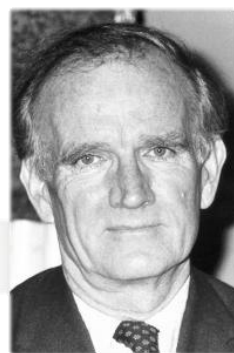
研究背景

理解正反物质不对称起源是当今物理学的重大前沿之一



《科学》杂志公布的125个挑战全球科学界的重要基础性问题，其中“**宇宙是怎样形成**”和“**物质基本结构是什么**”等，都与**正反物质不对称性起源相关**

正反物质不对称性研究现状



**Parity Violation
in weak decay**

T.D. Lee and C.N. Yang
C.S. Wu *et al.*

**CP Violation
in K meson decay**

J.W. Cronin and
V.L. Fitch *et al.*

**CP Violation
in B^0 meson decay**

[BABAR] and [Belle]

**CP Violation
in D^0 meson decay**

[LHCb]

**CP Violation
in Λ_b^0 baryon decay**

[LHCb]

Cabibbo Mixing

N. Cabibbo

CKM Matrix

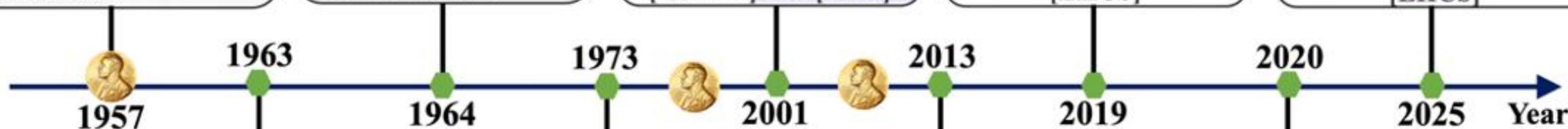
M. Kobayashi and
T. Maskawa

**CP Violation
in B_s^0 meson decay**

[LHCb]

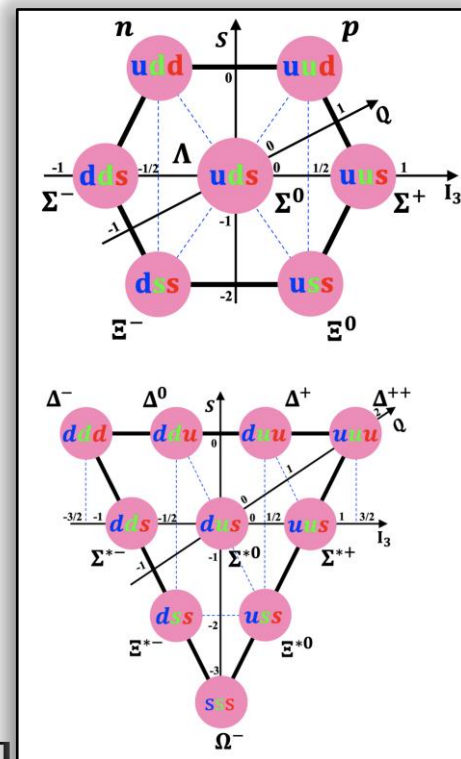
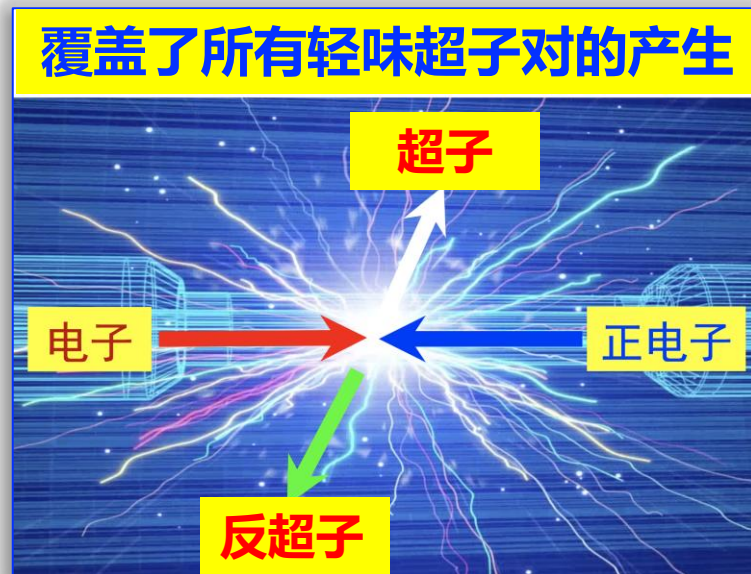
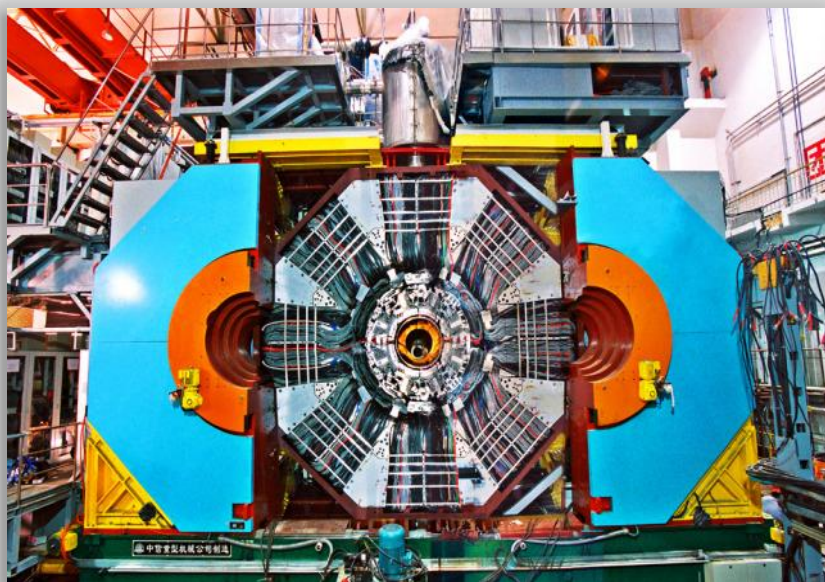
**CP Violation
in neutrino oscillation**

[T2T]



超子CP破坏迄今为止还没有被观测到！

□ 北京正负电子对撞机/BESIII实验是一个极好的产生具有**量子纠缠**正反超子对的理想场所，为研究正反物质不对称性提供了**绝佳的平台**



- 世界最大统计量的实验数据[100亿 J/ψ + 27亿 $\psi(3686)$]
- 产生具有**量子纠缠**正反超子对的理想场所
- 产额大、本底干净

如何探索超子衰变CP破坏

General Partial Wave Analysis of the Decay of a Hyperon of Spin $\frac{1}{2}$

T. D. LEE* AND C. N. YANG

Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey
(Received October 22, 1957)

Phys. Rev. 108, 1645 (1957)



◆ 李-杨参数: α 、 β 、 γ 。

◆ 比较超子和反粒子的参数差异来测量CP破坏

$\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$ 衰变振幅: $A = S + P \sigma \cdot \hat{n}$

$$\alpha = \frac{2\text{Re}(S^*P)}{|S|^2 + |P|^2}$$

$$\beta = \frac{2\text{Im}(S^*P)}{|S|^2 + |P|^2} = \sqrt{1 - \alpha^2} \sin \phi$$

$$\gamma = \frac{|S|^2 - |P|^2}{|S|^2 + |P|^2} = \sqrt{1 - \alpha^2} \cos \phi$$

如果CP守恒: $\alpha = \bar{\alpha}$ 、 $\beta = \bar{\beta}$

标准模型预言

$\sim 10^{-5}$

$\sim 10^{-4}$

$A_{CP} \sim$ 衰变不对称 $\rightarrow$ 对CP敏感、易测

$B_{CP} \sim$ 弱相位差 $\rightarrow$ 最敏感、需额外通过末态重子极化测量

$$A_{CP} \approx -\boxed{\tan(\delta_P - \delta_S)} \cdot B_{CP}$$

末态相互作用

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 34, NUMBER 3

1 AUGUST 1986

Hyperon decays and CP nonconservation

John F. Donoghue

Department of Physics and Astronomy, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts 01003

Xiao-Gang He and Sandip Pakvasa

Department of Physics and Astronomy, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, Hawaii 96822

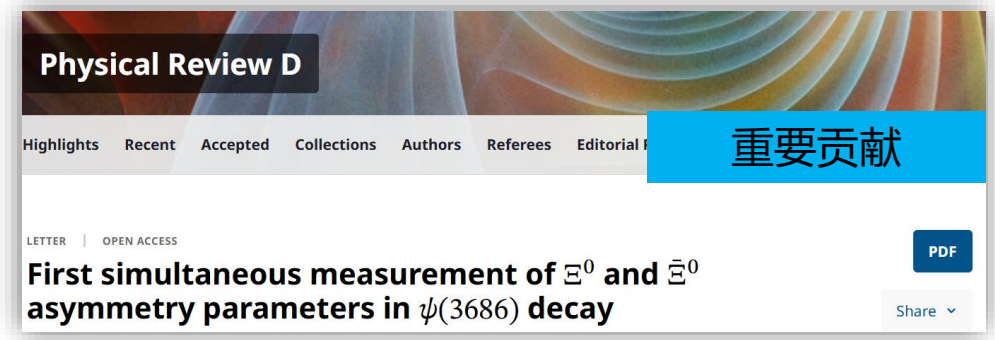
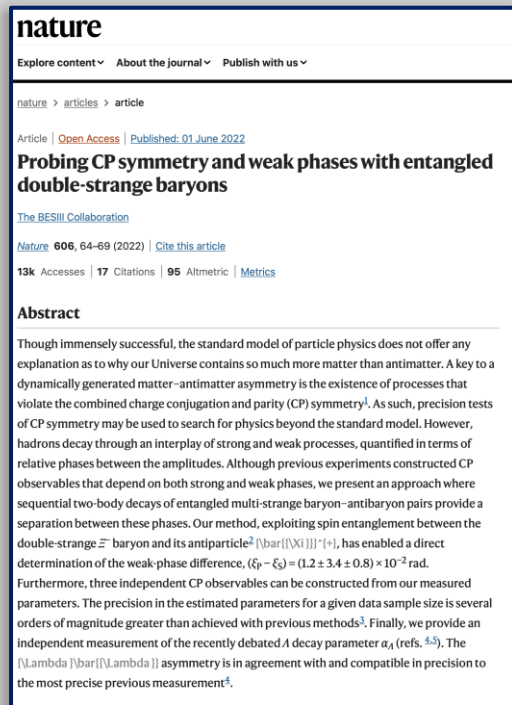
(Received 7 March 1986)



$$A_{CP} = \frac{\alpha + \bar{\alpha}}{\alpha - \bar{\alpha}}; \quad B_{CP} = \frac{\beta + \bar{\beta}}{\alpha - \bar{\alpha}}$$

研究基础

- 首次利用处于量子纠缠的 $\Xi^- \bar{\Xi}^+$ 级联衰变，把导致正反物质不对称性的弱作用从强作用里分离，实现了对超子衰变中最直接的CP破坏测量的可能
- 首次观测到 $\psi(3686) \rightarrow \Xi^- \bar{\Xi}^+$ 和 $\Xi^0 \bar{\Xi}^0$ 过程中的超子自旋极化

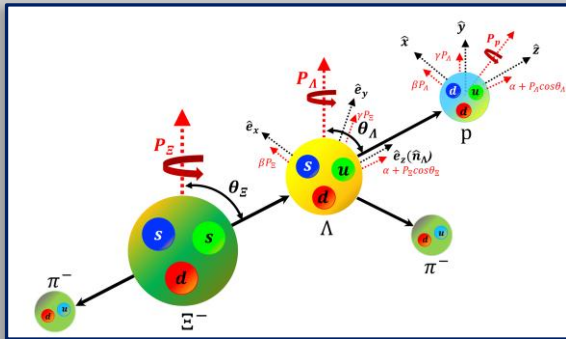
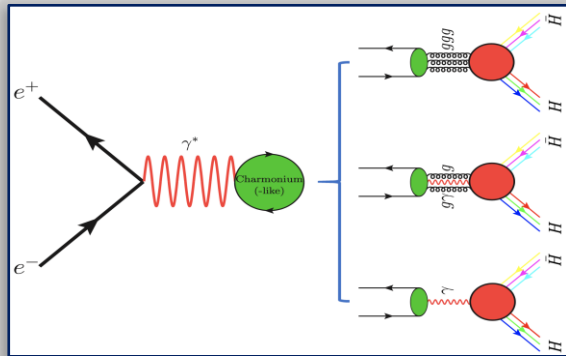


开创了BESIII实验上探索正反物质不对称性研究的新方法

成果介绍

研究方法

- 基于前期的研究，发现对于 $J/\psi \rightarrow \Xi\bar{\Xi}$ 过程，采用**全重建方案**，其**产额高、本底污染小、信息丰富**；正负电子对撞产生的 Ξ 超子及其反 Ξ 超子之间存在**量子纠缠**，为探索正反物质不对称性提供了**独特优势**



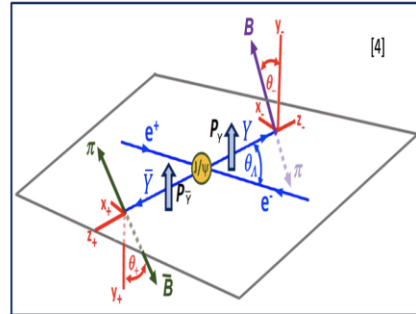
物理信息丰富，如何提取是关键

$$\mathcal{W}(\xi) = (1 + \alpha_\psi \cos^2 \theta) \sum_{\bar{\mu}\nu} C_{\bar{\mu}\nu}(\theta) \hat{n}_{\bar{\mu}} \hat{n}_\nu,$$

$$C_{\bar{\mu}\nu}(\theta) = 1/N \sum_i \hat{n}_{\bar{\mu}} \hat{n}_\nu,$$

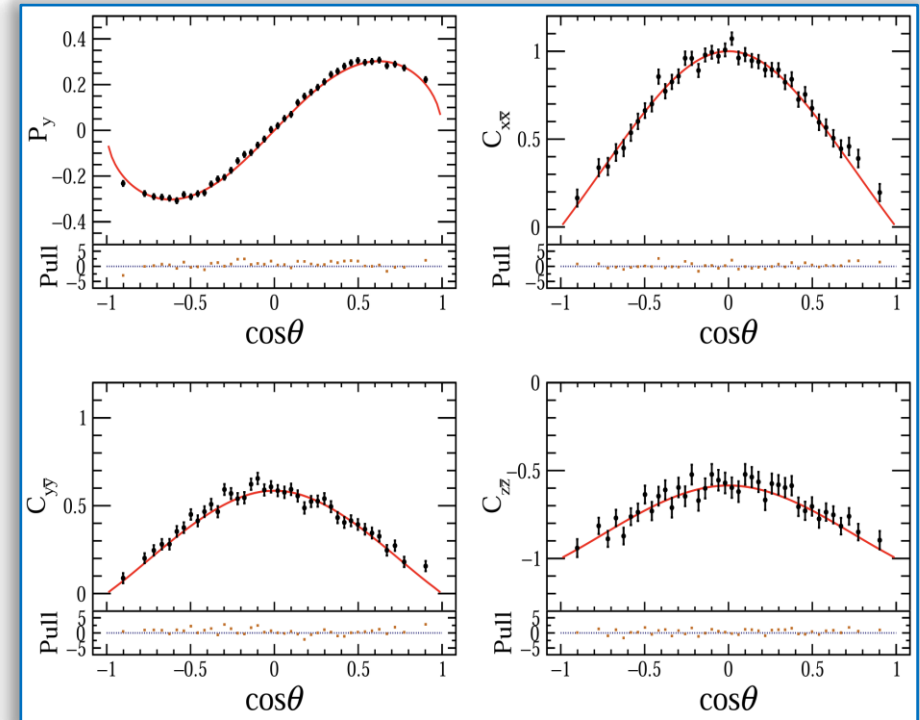
$$\hat{n}_\mu = (1, \sin \theta_\Lambda \cos \phi_\Lambda, \sin \theta_\Lambda \sin \phi_\Lambda, \cos \theta_\Lambda),$$

$$\hat{n}_{\bar{\nu}} = (1, \sin \theta_{\bar{\Lambda}} \cos \phi_{\bar{\Lambda}}, \sin \theta_{\bar{\Lambda}} \sin \phi_{\bar{\Lambda}}, \cos \theta_{\bar{\Lambda}}).$$



9个角度参数: $\theta_\Xi, \theta_\Lambda, \phi_\Lambda, \theta_{\bar{\Lambda}}, \phi_{\bar{\Lambda}}, \theta_p, \phi_p, \theta_{\bar{p}}, \phi_{\bar{p}}$

8个未知参数: $\alpha_\psi, \Delta\Phi, \alpha_\Xi, \Phi_\Xi, \alpha_\Lambda, \alpha_{\bar{\Xi}}, \Phi_{\bar{\Xi}}, \alpha_{\bar{\Lambda}}$



基于9维角分布联合拟合方案，**完成了**关键物理参数的最精确更新

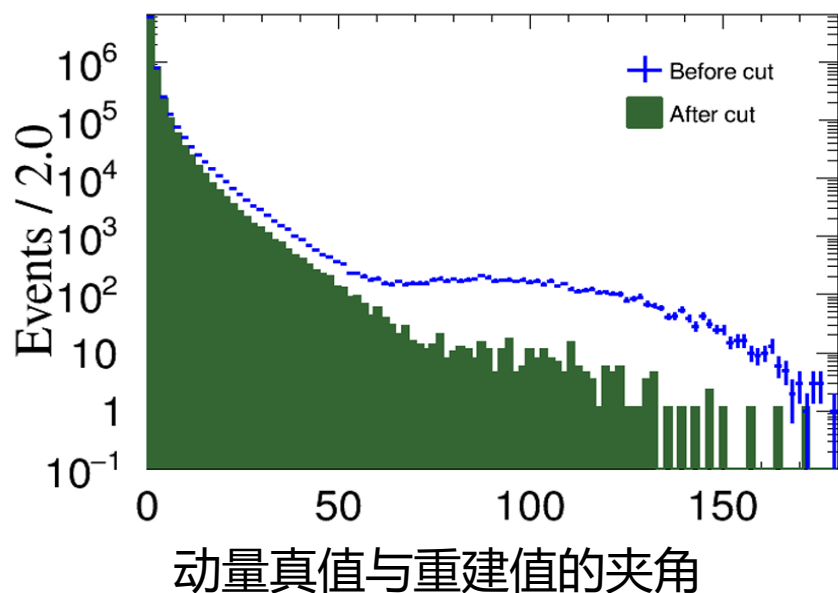
研究方法创新性

□ 事例筛选方法

- 约束 Λ 与 Ξ 联合质量差值
- 压低误组合本底

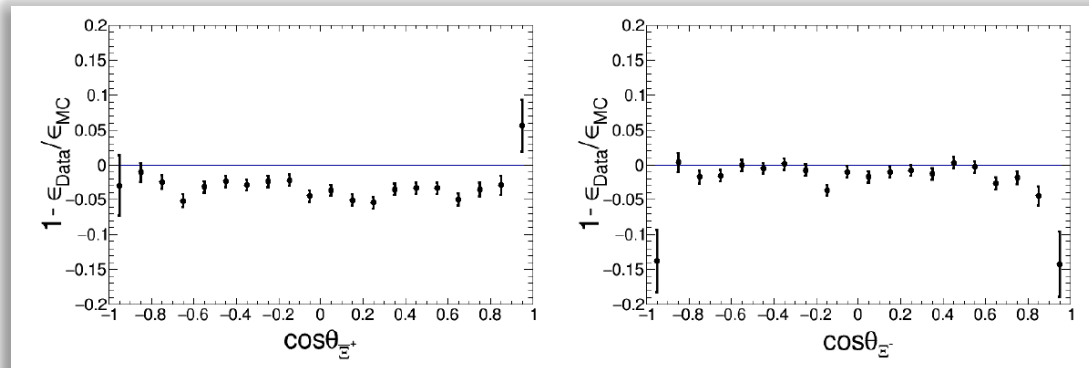
考虑质量分辨

$$\begin{aligned}\delta &= \sqrt{(m_{\Lambda\pi^-} - m_{\Xi^-})^2 + R^2(m_{p\pi^-} - m_{\Lambda})^2}, \\ \bar{\delta} &= \sqrt{(m_{\bar{\Lambda}\pi^+} - m_{\bar{\Xi}^+})^2 + R^2(m_{\bar{p}\pi^+} - m_{\bar{\Lambda}})^2}.\end{aligned}$$



□ 系统误差评估

- 引入 Ξ 重建效率修正降低系统误差



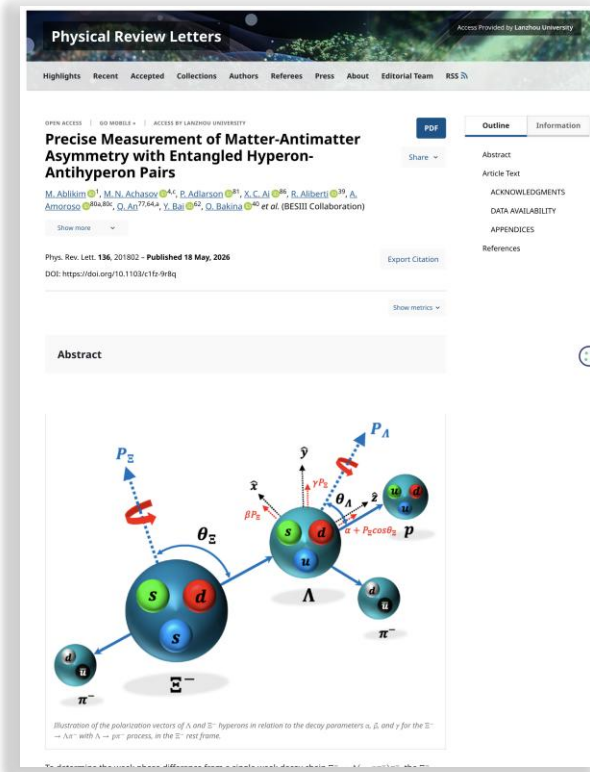
- 系统误差有效控制

Parameter	Nature (2022)	Phys. Rev. Lett. (2026)
α_ψ	0.010	0.0034
$\Delta\Phi$ (rad)	0.016	0.0056
α_Ξ	0.003	0.0005
$\bar{\alpha}_\Xi$	0.002	0.0006
ϕ_Ξ (rad)	0.009	0.0010
$\bar{\phi}_\Xi$ (rad)	0.007	0.0006
α_Λ	0.008	0.0015
$\bar{\alpha}_\Lambda$	0.007	0.0015

研究成果

100亿 J/ψ

❑ 利用处于量子纠缠的 $\Xi^- \bar{\Xi}^+$ 级联衰变，实现了奇异超子 Ξ 衰变中最精确的正反物质不对称性检验



Parameter	This Letter
α_ψ	$0.5851 \pm 0.0044 \pm 0.0034$
$\Delta\Phi$ (rad)	$1.2205 \pm 0.0159 \pm 0.0056$
α_Ξ	$-0.3813 \pm 0.0026 \pm 0.0005$
$\bar{\alpha}_\Xi$	$0.3873 \pm 0.0026 \pm 0.0006$
ϕ_Ξ (rad)	$-0.0008 \pm 0.0072 \pm 0.0010$
$\bar{\phi}_\Xi$ (rad)	$0.0020 \pm 0.0072 \pm 0.0006$
α_Λ	$0.7434 \pm 0.0039 \pm 0.0015$
$\bar{\alpha}_\Lambda$	$-0.7478 \pm 0.0038 \pm 0.0015$
$(\xi_P - \xi_S) \times 10^{-2}$ (rad)	$-0.2 \pm 1.2 \pm 0.1$
$(\delta_P - \delta_S) \times 10^{-2}$ (rad)	$0.3 \pm 1.2 \pm 0.2$
$A_{CP}^\Xi \times 10^{-3}$	$-7.8 \pm 4.8 \pm 0.8$
$\Delta\phi_{CP}^\Xi \times 10^{-3}$ (rad)	$0.6 \pm 5.1 \pm 0.2$
$A_{CP}^\Lambda \times 10^{-3}$	$-2.9 \pm 4.3 \pm 0.7$
$\langle\alpha_\Xi\rangle$	$-0.3843 \pm 0.0018 \pm 0.0005$
$\langle\phi_\Xi\rangle$ (rad)	$-0.0014 \pm 0.0050 \pm 0.0008$
$\langle\alpha_\Lambda\rangle$	$0.7456 \pm 0.0022 \pm 0.0014$

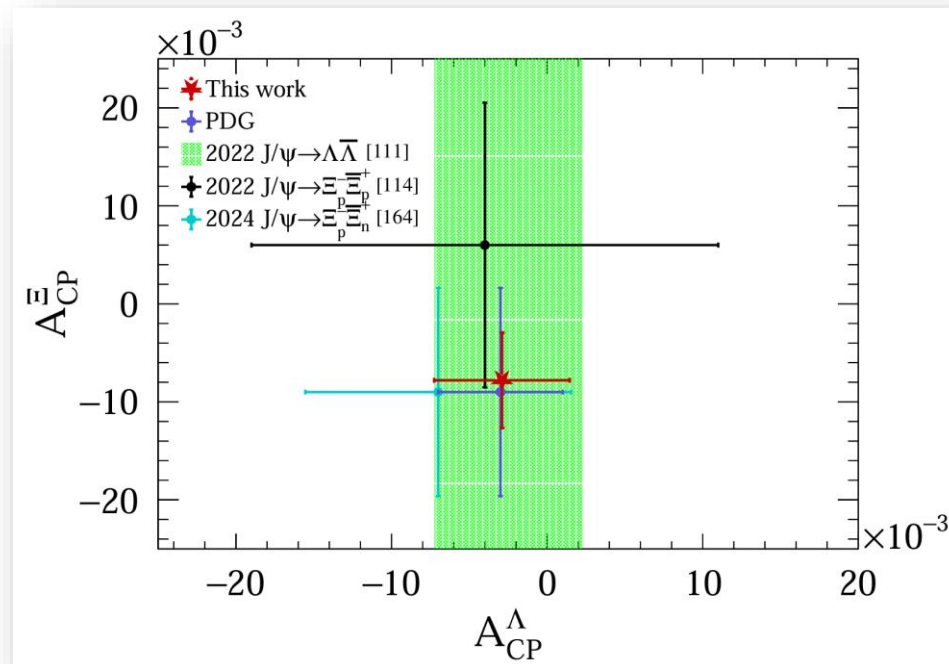
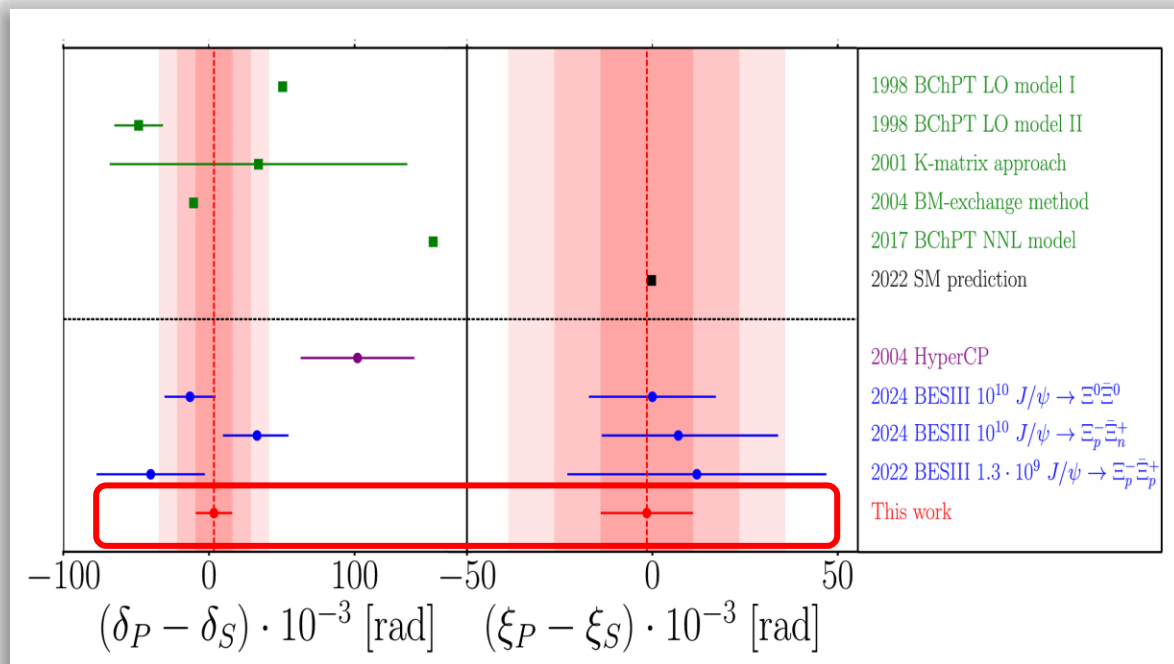
- ① 8个关键参数的精确测量(1%)
- ② 2个强弱相角差的最精确测量 (10^{-2} rad)
- ③ 3个表征正反物质不对称性特征量的最精确测量 (10^{-3})

Phys. Rev. Lett. **136** (2026) 201802

为后继进一步在实验上开展超子衰变中正反物质不对称研究奠定基础

研究成果

目前超子领域最精确的正反物质不对称性参数测量

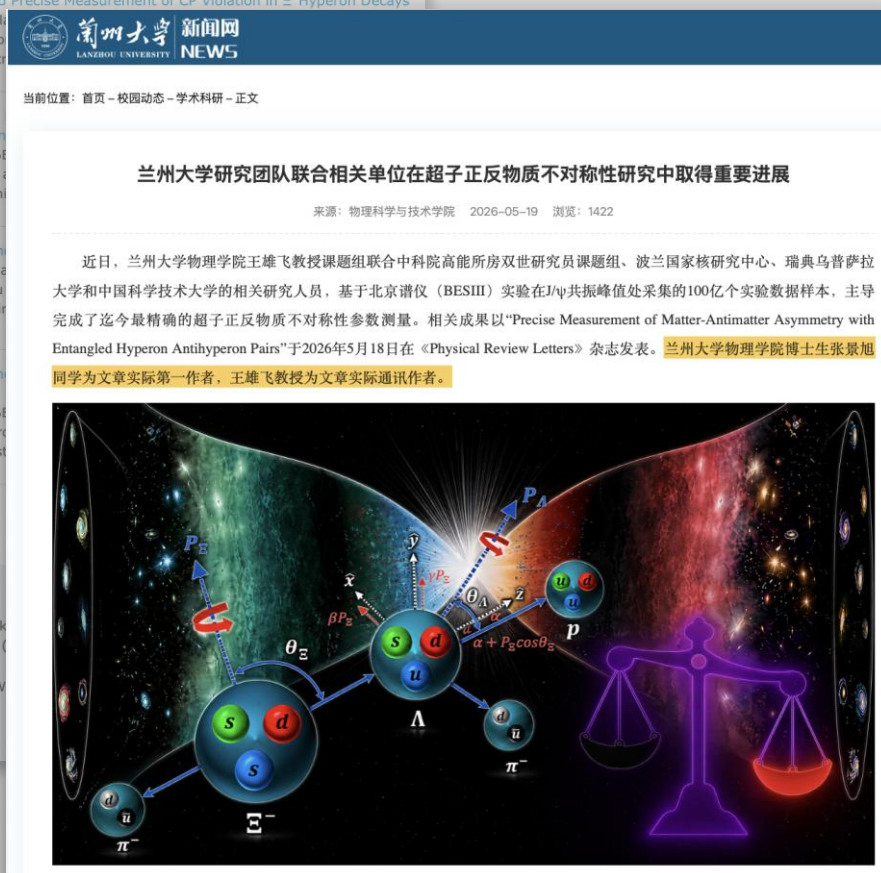
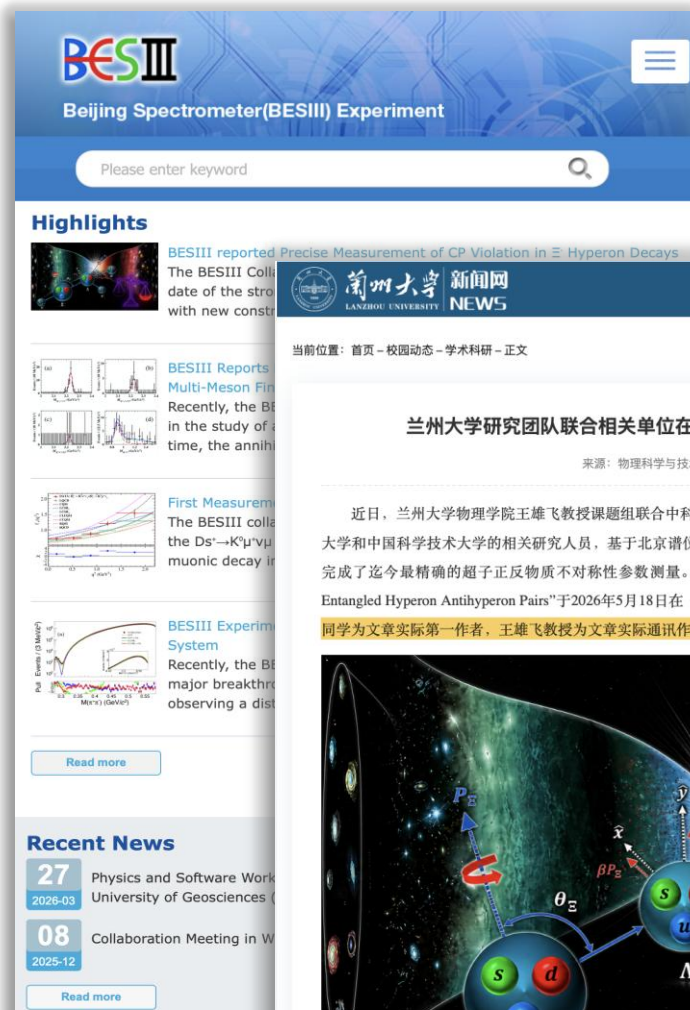


超子领域最精确**弱相位差**测量，在 10^{-2} 精度未发现CP破坏

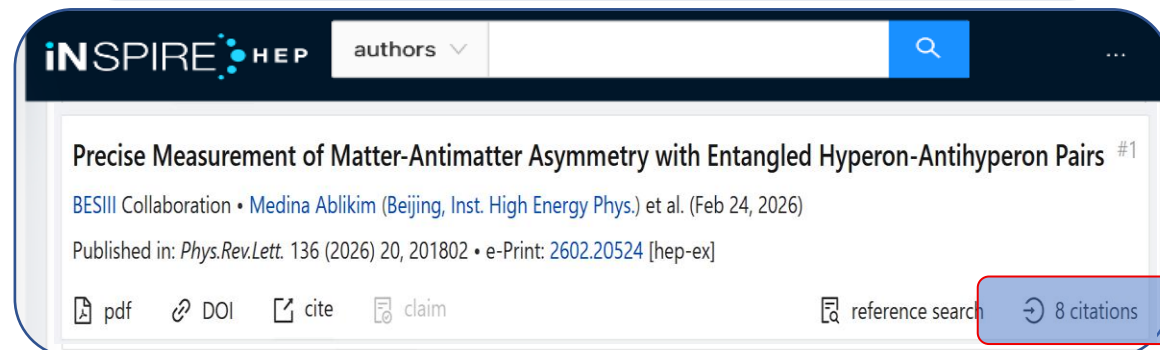
Ξ/Λ **CP观测量**独立测量、 Ξ/Λ **衰变参数平均值**直接测量

文章影响力

被PRL评审认为是出色的实验数据分析范例



...
> **This is one very fine example of experimental data analysis.** My comments are
> concerned primarily with some aspects of typesetting, notation and clarity,
> however, in my opinion, this manuscript could also be published as-is. I have no
> concerns about scientific content, methodology and how the results were
> obtained.
...



相关工作-迄今最精确粲夸克色电偶极矩的测量

Physical Review Letters



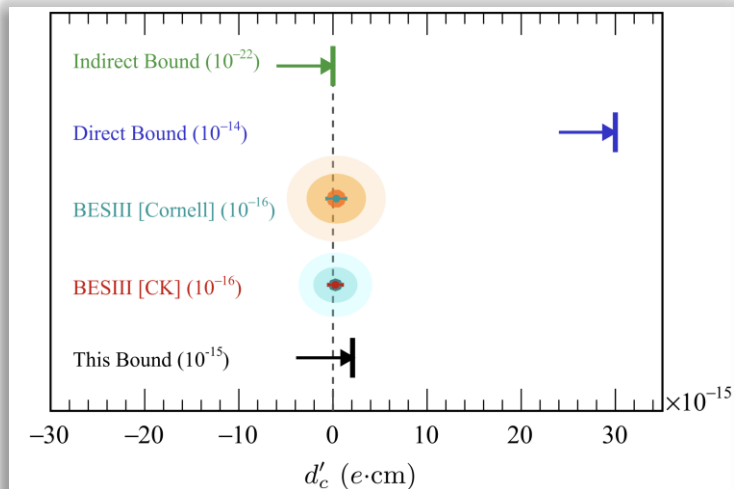
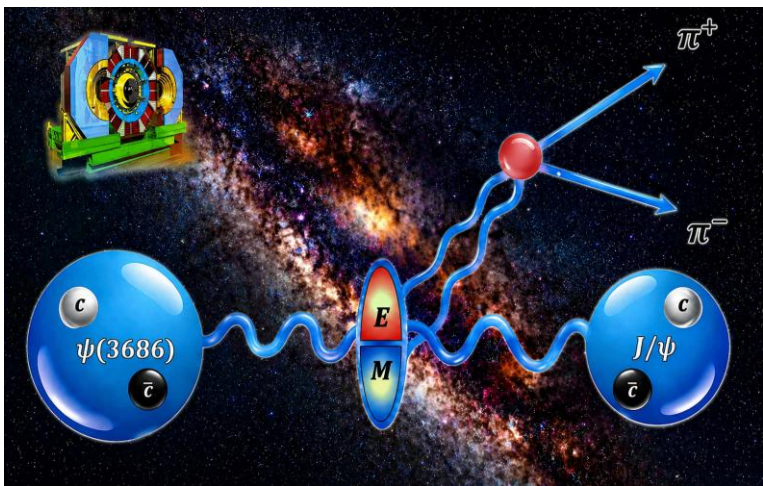
Highlights Recent Accepted Collections Authors Referees Editorial Policies Press About Editorial Team RSS

Phys. Rev. Lett. **136**, 231903 – Published 11 June, 2026

OPEN ACCESS | GO MOBILE » | ACCESS BY LANZHOU UNIVERSITY

强相互作用电荷宇称破缺的首次探索，为新物理现象的理论研究设置更严格的限制

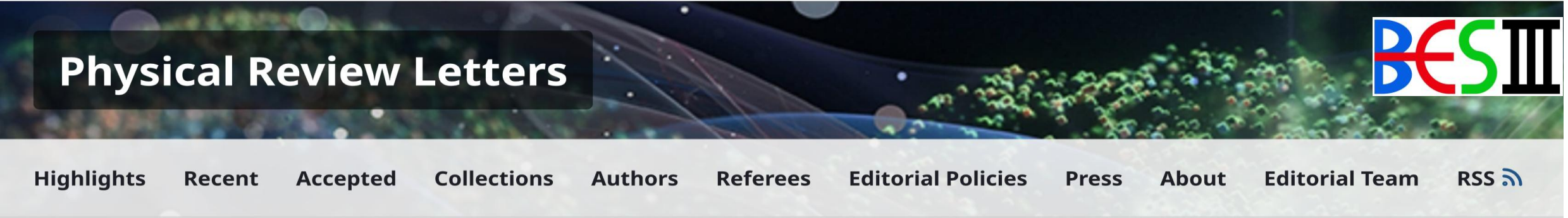
Precise Measurement of the Chromoelectric Dipole Moment of the Charm Quark



**兰州大学**
LANZHOU UNIVERSITY

**新闻网**
NEWS

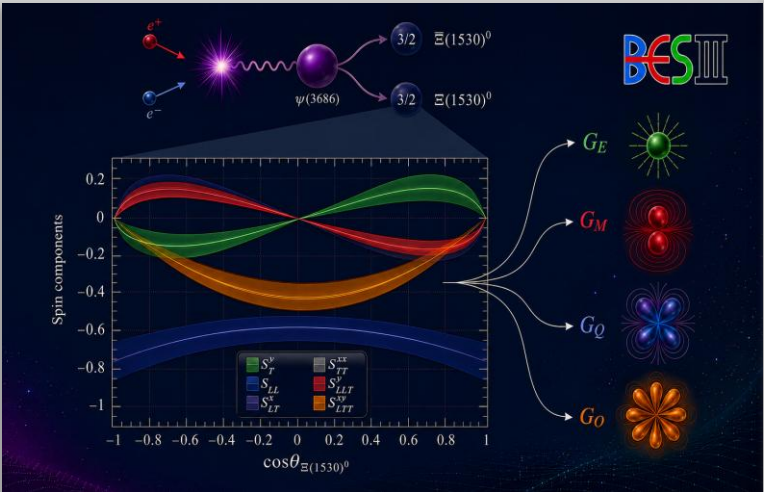
相关工作-超子激发态极化和电磁矩的首次测量



Phys. Rev. Lett. **137**, 011901 – Published 11 June, 2026

为理解物质起源和强子内部精细结构提供了关键实验数据，
填补了当前该领域研究的空白

Observation of $\Xi(1530)^0$ Polarization and Determination of Its Electric and Magnetic Moments in $\psi(3686) \rightarrow \Xi(1530)^0 \bar{\Xi}(1530)^0$



Parameter	Value	Parameter	Value
α_ψ	$0.02 \pm 0.06 \pm 0.06$	h_1	$0.69 \pm 0.05 \pm 0.05$
α_1	$-0.42 \pm 0.08 \pm 0.05$	h_3	$0.43 \pm 0.04 \pm 0.04$
α_2	$0.75 \pm 0.06 \pm 0.06$	h_4	$0.43 \pm 0.03 \pm 0.03$
ϕ_1 (rad)	$-1.81 \pm 0.13 \pm 0.07$	ϕ'_1 (rad)	$0.56 \pm 0.11 \pm 0.06$
ϕ_3 (rad)	$2.37 \pm 0.08 \pm 0.05$	ϕ'_3 (rad)	$2.37 \pm 0.08 \pm 0.05$
ϕ_4 (rad)	$1.02 \pm 0.15 \pm 0.08$	ϕ'_4 (rad)	$-2.90 \pm 0.13 \pm 0.08$
$ G_E $	$0.0035 \pm 0.0006 \pm 0.0004$	$ G_M/G_E $	$1.61 \pm 0.33 \pm 0.22$
$ G_M $	$0.0056 \pm 0.0006 \pm 0.0003$	$ G_Q/G_E $	$3.71 \pm 0.63 \pm 0.38$
$ G_Q $	$0.0129 \pm 0.0007 \pm 0.0005$	$ G_O/G_E $	$1.13 \pm 0.20 \pm 0.13$
$ G_O $	$0.0039 \pm 0.0002 \pm 0.0001$		

兰州大学

LANZHOU UNIVERSITY

新闻网

NEWS

当前位置： 首页 - 校园动态 - 学术科研 - 正文

兰州大学研究团队在科西超子激发态极化和电磁矩研究中取得重要进展

来源：物理科学与技术学院 2026-07-01 浏览：294

近日，兰州大学物理学院王雄飞教授课题组基于北京谱仪（BESIII）实验在 $\psi(3686)$ 共振峰值处采集的27亿的实验数据样本，主导完成了科西超子激发态 $\Xi(1530)^0$ 的极化和电磁矩的首次测量。相关成果“Observation of $\Xi(1530)^0$ Polarization and Determination of its Electric and Magnetic Moments in $\psi(3686) \rightarrow \Xi(1530)^0 \bar{\Xi}(1530)^0$ ”于2026年7月1日在物理学国际知名期刊《物理评论快报（Physical Review Letters）》在线发表。博士生张若愚和张景旭同学做出了重要贡献，其中张若愚为文章实际第一作者，王雄飞教授为文章实际通讯作者。

优秀博士学位论文

2025-2026学年兰州大学优秀博士、硕士学位论文评选结果公示

日期：2026-07-06

兰州大学优秀博士 学位论文

在个人申报、经研究生院审核、专家组评审，共评选2025-2026学年兰州大学优秀博士学位论文41篇(见附件1)、优秀硕士学位论文80篇(见附件2)，现将评审结果予以公示，公示期为2026年7月7日至7月9日。

公示期间，如有异议，可通过电话、邮件等形式向研究生院实名反映。

7	物理科学与技术学院	张景旭	物理学	BESIII实验上超子CP破坏与粲夸克色电偶极矩的研究	王雄飞
---	-----------	-----	-----	-----------------------------	-----

附件：

- 1.2025-2026学年兰州大学优秀博士学位论文公示名单
- 2.2025-2026学年兰州大学优秀硕士学位论文公示名单

2025-2026学年我校推荐甘肃省优秀博士、硕士学位论文评选结果

日期：2026-07-06

甘肃省优秀博士 学位论文

在个人申报、经研究生院审核、专家组评审，拟推荐30篇博士学位论文(见附件1)、45篇硕士学位论文(见附件2)，参加甘肃省优秀学位论文评选，现将评审结果予以公示，公示期为2026年7月7日至7月9日。

公示期间，如有异议，可通过电话、邮件等形式向研究生院实名反映。

附件：

- 1.2025-2026学年我校推荐甘肃省优秀博士学位论文公示名单
- 2.2025-2026学年我校推荐甘肃省优秀硕士学位论文公示名单

总结

□ 基于 BESIII 100亿 J/ψ 数据，利用量子关联的超子反超子对，精确测量了正反 Ξ^- 和 Λ 超子的衰变参数及其CP不对称性[1]

- 世界上最精确的超子弱相位差、强相位差测量 (10^{-2} rad)
- 超子领域对CP破坏最精确的检验之一 (10^{-3})
- Ξ^- 和 Λ 超子衰变参数精确测量，为其它超子研究提供最精确的输入
- $\psi(3686) \rightarrow \Xi^- \bar{\Xi}^+$ 与 $\Xi^0 \bar{\Xi}^0$ 过程超子自旋极化的首次观测 [2-4]

□ 相关研究

- 开展了超子激发态 $\Xi(1530)^0$ 极化和电磁矩的首次测量[5]
- 确定了粲夸克色电偶极矩新上限，强相互作用CP不对称性探索[6]

[1] Phys. Rev. Lett. **136**, 201802 (2026). [2] Phys. Rev. D (Letter) **106**, L091101 (2022). [3] Phys. Rev. D(Letter) **108**, L011101 (2023).
[4] Symmetry **15**, 214 (2023). [5] Phys. Rev. Lett. **137**, 011901 (2026). [6] Phys. Rev. Lett. **136**, 231903 (2026).

感谢各位专家 敬请批评指正

张景旭 兰州大学

研究成果	1. 完成了超子领域最精确正反物质不对称性参数测量 2. 完成了粲夸克色电偶极矩的精确测量 3. 完成了超子激发态极化和电磁矩的首次测量
发表论文	3篇PRL + 2篇PRD(Letter)+1篇Symmetry



Institute of High Energy Physics

Chinese Academy of Sciences

● Telephone: +86-10-88233203 ● Fax: +86-10-88233083 ● Secretary: +86-10-882336054

Address: 19B Yuquanlu Road, Shijingshan District, Beijing 100049, CHINA

证 明

北京谱仪BESIII实验合作组发表论文，基于在北京正负电子对撞机上的BESIII探测器获取的实验数据完成。遵循高能物理领域大型实验合作组国际通用署名规则，论文作者按字母顺序排列。BESIII实验依托单位中国科学院高能物理研究所在单位排列中为第一，其他单位按字母顺序。作者及单位次序不表明贡献大小，作者对发表论文的贡献以合作组内部的物理分析文档记录为准。

兰州大学物理科学与技术学院博士研究生张景旭，学号：120220908951，以BESIII实验合作组名义在 Physical Review Letters 期刊上发表论文：“Precise Measurement of Matter-Antimatter Asymmetry with Entangled Hyperon-Antihyperon Pairs”，文章期刊号为：Phys. Rev. Lett. 136, 201802 (2026)，相应内部文档号为BAM00873。张景旭在导师王雄飞教授的指导下，主导完成了论文的物理分析工作，对发表论文的报道结果和论文撰写做出了重要贡献，是发表论文的实际第一作者，王雄飞教授是论文通讯作者。

特此证明。



BESIII 实验国际合作组 联合发言人

2026. 05. 19