



北京谱仪 BESIII 上质子形状因子中的双光子 交换效应

夏磊^{1,2}, 胡继锋^{3,a}, 王雅迪⁴, Rinaldo Baldini Ferroli⁵,
Frank Maas⁶, 李海波^{7,8}, and 黄光顺^{2,3}

¹ 中国科学技术大学

² 核探测与核电子学国家重点实验室

³ 华南师范大学

⁴ 华北电力大学

⁵ INFN Laboratori Nazionali di Frascati

⁶ Helmholtz Institute Mainz

⁷ 中国科学院高能物理研究所

⁸ 中国科学院大学

^a 广东省核物质科学与技术重点实验室

2025 年 3 月 22 日, 第四届强子与重味物理理论与实验联合研讨会
兰州大学, 兰州



目录

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应



HIM

Helmholtz-Institut Mainz

核子的电磁结
构

重子形状因子

双光子交换的重
献

电荷不对称

角分布不对称的
分析

双光子交换

Γ_3 的研究

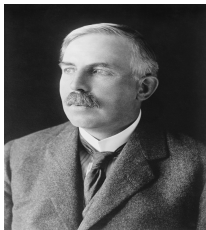
其他高阶效应
的排除

分离 IFI

分离效果

总结

- 1 核子的电磁结构
- 2 电荷不对称
- 3 其他高阶效应的排除
- 4 总结





核子的电磁结构

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构

重子形状因子

双光子交换的贡
献

电荷不对称

角分布不对称的
分析

双光子交换

G_3 的研究

其他高阶效应
的排除

分离 IFI

分离效果

总结

1 核子的电磁结构

- 重子形状因子
- 双光子交换的贡献

2 电荷不对称

- 角分布不对称的分析
- 双光子交换
- 质子电磁形状因子 G_3 的研究

3 其他高阶效应的排除

- 从 $OPE \otimes TPE$ 中分离 IFI
- 分离效果

4 总结



重子形状因子

- $e-p$ 弹性散射证明质子有内部结构 (R. Hofstadter and R. W. McAllister, Phys. Rev. **98**, 217 (1955) R. Hofstadter, 1961 年诺贝尔物理学奖)。

- 点状假设下, 理论上 $e-p$ 弹性散射微分截面为:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{ep} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}}(1 + 2\tau \tan^2 \frac{\theta}{2})F(q^2).$$

- 理论和实验上的差异体现了质子内部电磁结构。

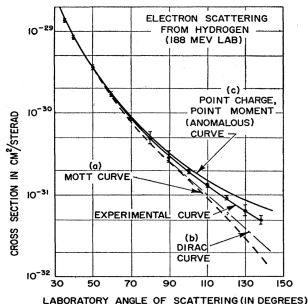
- 描述强子流的核子电磁顶点 Γ_μ 为:

$$\Gamma_\mu(p', p) = \gamma_\mu F_1(q^2) + \frac{i\sigma_{\mu\nu}q^\nu}{2m_p c} F_2(q^2).$$

- 电磁形状因子 (EMFFs) (F. J. Ernst, R. G. Sachs and PR **119**, 1105 (1960)):

$$\text{电形状因子: } G_E(q^2) = F_1(q^2) + \tau \kappa_p F_2(q^2),$$

$$\text{磁形状因子: } G_M(q^2) = F_1(q^2) + \kappa_p F_2(q^2).$$

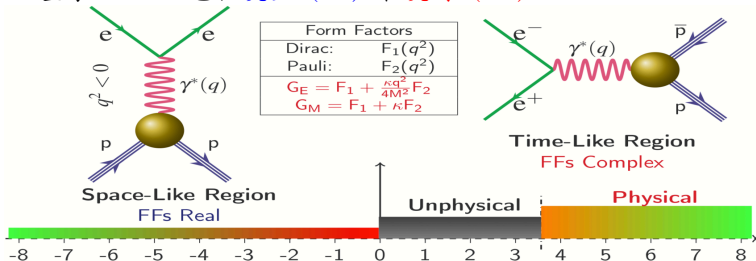


重子形状因子

■ 核子 EMFFs 是核子的基本性质：

- 与电荷分布和磁化分布相关；
- 测量核子 EMFFs 是检验核子内部结构模型的重要实验。

■ 重子 EMFFs 包括类空 (SL) 和类时 (TL)：



■ 描述强子流的核子电磁顶点 Γ_μ 为：

$$\Gamma_\mu(p', p) = \gamma_\mu F_1(q^2) + \frac{i\sigma_{\mu\nu} q^\nu}{2m_{pC}} F_2(q^2).$$

■ TL EMFFs 是复数 (N. Cabibbo and R. Gatto, PR 124, 1577 (1961))：

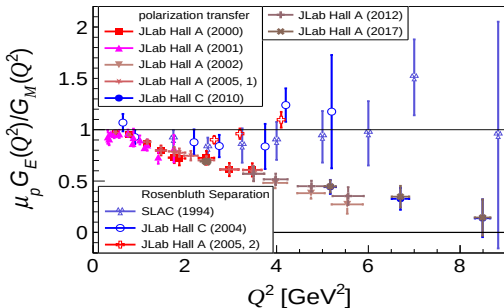
$$\text{电形状因子: } G_E(q^2) = e^{-i\theta_2} [F_1(q^2) + \tau \kappa_p F_2(q^2)],$$

$$\text{磁形状因子: } G_M(q^2) = e^{-i(\theta_1 + \theta_2)} [F_1(q^2) + \kappa_p F_2(q^2)].$$



双光子交换的贡献

- 当前，双光子交换 (TPE) 的研究琳琅满目，这是精确测量时代解决核子结构的一种具有指导意义的方案 (A. Schmidt *et al.*, arXiv:2308.0877 (2023))。



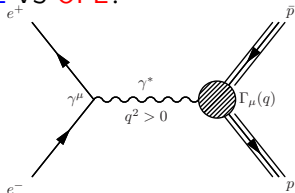
(A. J. R. Puckett *et al.*, PRC **96**, 055203 (2017), PRC **98**, 019907 (2018))

- 研究TPE过程对于理解质子结构至关重要，因为历史上只对单光子交换 (OPE) 的重子对产生过程进行研究，这并不足够“精确”。
- TL过程中，在OPE的描述下，出射重子对的角分布并没有电荷不对称 (Charge asymmetry)。

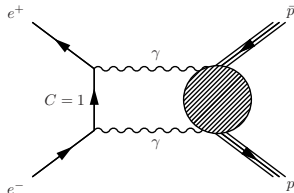


双光子交换

■ TPE VS OPE:



OPE.



TPE. 1970 年代提出。

(V. BoiPhytsov et al., Sov. J. Nucl. Phys. **16**, 287 (1972)).

(V. Franco, PRD **8**, 826 (1973)).

(F. Lev, Sov. J. Nucl. Phys. **21**, 145 (1975)).

(H. Q. Zhou, PRC **95**, 025203 (2017)).

- OPE近似下的顶点:

$$J_\mu = \frac{e^2}{q^2} \bar{u}(k_2) \gamma_\mu u(k_1) \bar{u}(p_2) [\gamma_\mu F_1(q^2) + \frac{i\sigma_{\mu\nu} q^\nu}{2m_p c} F_2(q^2)] u(p_1).$$

- TPE近似下的顶点:

$$J_\mu = \frac{e^2}{q^2} \bar{u}(k_2) \gamma_\mu u(k_1) \bar{u}(p_2) [\gamma_\mu \mathcal{F}_1(s, q^2) + \frac{i\sigma_{\mu\nu} q^\nu}{2m_p c} \mathcal{F}_2(s, q^2) + \hat{K} P_\mu \mathcal{F}_3(s, q^2)] u(p_1).$$

- 联系: 2 个复数振幅, 4 个参数 $\rightarrow$ 3 个复数振幅, 6 个参数。

$$\mathcal{F}_1(s, q^2) \rightarrow F_1(q^2), \mathcal{F}_2(s, q^2) \rightarrow F_2(q^2), \mathcal{F}_3(s, q^2) \rightarrow 0.$$

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构

重子形状因子
双光子交换的贡
献

电荷不对称
角分布不对称的
分析
双光子交换
 $\mathcal{F}_3$ 的研究

其他高阶效应
的排除

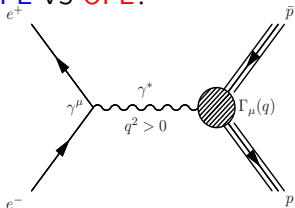
分离 IFI
分离效果

总结

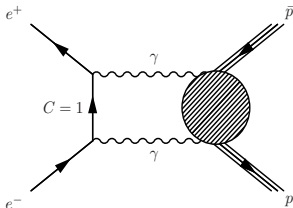


双光子交换

■ TPE VS OPE:



OPE.



TPE. 1970 年代提出。

(V. BoiPhytsov et al., Sov. J. Nucl. Phys. **16**, 287 (1972)).

(V. Franco, PRD **8**, 826 (1973)).

(F. Lev, Sov. J. Nucl. Phys. **21**, 145 (1975)).

(H. Q. Zhou, PRC **95**, 025203 (2017)).

OPE	TPE
$F_i(q^2)$	$\mathcal{F}_i(s, q^2)$
$J^{PC} = 1^{--}$	$J^{PC} \neq 1^{--}$, with only $C = +1$ known
$\frac{\sigma(e^+p)}{\sigma(e^-p)} = 1$	$\frac{\sigma(e^+p)}{\sigma(e^-p)} \neq 1$
$\frac{\mu_p G_E}{G_M} \sim 1$	$\frac{\mu_p G_E}{G_M}(q^2)$
$\frac{d\sigma_{p\bar{p}}}{d\Omega} = a(q^2) + b(q^2) \cos^2 \theta$	$\frac{d\sigma_{p\bar{p}}^{int}}{d\Omega} = \cos \theta [c_0(q^2) + c_1(q^2) \cos^2 \theta + c_2(q^2) \cos^4 \theta + \dots]$

■ 出射重子对的角分布是检测单双光子干涉的关键!

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构
重子形状因子
双光子交换的贡
献

电荷不对称
角分布不对称的
分析
双光子交换
 G_3 的研究

其他高阶效应
的排除
分离 IF1
分离效果

总结



类时区间双光子交换实验研究的初期探索

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构

重子形状因子

双光子交换的贡
献

电荷不对称

角分布不对称的
分析

双光子交换

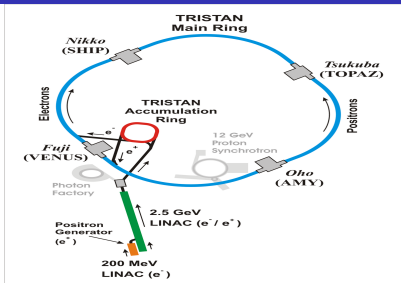
γ_3 的研究

其他高阶效应
的排除

分离 IFI

分离效果

总结



■ 背景:

- 20 世纪 70 年代标准模型初步建立, 中微子、粲夸克, τ 轻子陆续被发现。
- 20 世纪 80 年代, 试图寻找顶夸克, 认为质量在 $10 \sim 25$ GeV 之间, 但被 PEP 和 PETRA 加速器排除。
- TRISTAN 存储环是当时探索更高质量顶夸克的希望。

■ AMY 实验的创建:

- Stephen Olsen 与 Steve Schnetzer 共同提出了 AMY 实验建议。
- 初期因团队规模过小被实验委员会拒绝, 但在韩国大学和高能所的加入后获得批准。
- AMY 的目标是探测顶夸克以及相关物理现象。



类时区间双光子交换实验研究的初期探索

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构

重子形状因子

双光子交换的贡
献

电荷不对称

角分布不对称的
分析

双光子交换

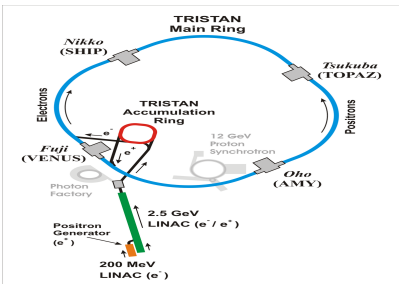
γ_3 的研究

其他高阶效应
的排除

分离 IFI

分离效果

总结



■ 叶铭汉先生的贡献:

- 在 1984 年起主持了高能所的 BES 实验，与 AMY 团队进行了跨国合作。
- 他通过外交手段解决了中国团队与韩国科学家合作的敏感问题。
- 在 AMY 实验中，领导了飞行时间计数器 (TOF) 和电磁量能器 (EMC) 的关键部件建造。

■ 科学成果:

- AMY 实验尽管未发现顶夸克，但在 QCD 的研究取得了诸多突破。
- 推动了 BEPC/BES 的建造和升级。



类时区间双光子交换实验研究的初期探索

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构

重子形状因子

双光子交换的贡
献

电荷不对称

角分布不对称的
分析

双光子交换
 $\mathcal{O}_9$ 的研究

其他高阶效应
的排除

分离 IFI

分离效果

总结



- 叶铭汉先生在 AMY 实验中认识到 A_{FB} 的重要性，提出通过研究这一效应，可以深入理解质子内部结构和 QED。
 - 提出在 e^+e^- 湮没过程中，**单双光子干涉**产生的 A_{FB} 与 Q_q^3 (夸克电荷三次方) 成正比。
 - 提供一种独立测量的新方法。
- 在 AMY 实验运行时期，叶铭汉先生投入大量精力，试图从实验数据中寻找 A_{FB} 。
- 然而，由于 TRISTAN 对撞机能量范围 (50~64 GeV)，**单双光子干涉**过程的振幅较小，未能达到足够的证据说明问题。
- 为 BESIII **双光子效应**的测量打下了基础。



电荷不对称

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构

重子形状因子

双光子交换的贡
献

电荷不对称

角分布不对称的
分析

双光子交换

$\mathcal{F}_3$ 的研究

其他高阶效应
的排除

分离 IFI

分离效果

总结

1 核子的电磁结构

- 重子形状因子
- 双光子交换的贡献

2 电荷不对称

- 角分布不对称的分析
- 双光子交换
- 质子电磁形状因子 $\mathcal{F}_3$ 的研究

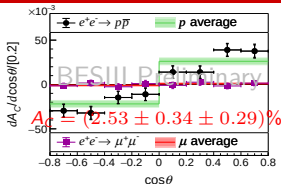
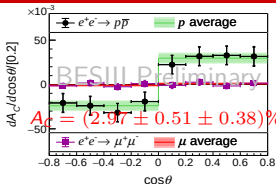
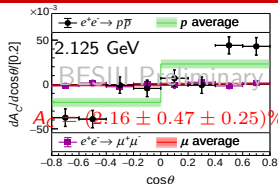
3 其他高阶效应的排除

- 从 $\text{OPE} \otimes \text{TPE}$ 中分离 IFI
- 分离效果

4 总结



电荷不对称



- 不对称性可以通过电荷不对称的角分布量化：

$$\frac{dA_C}{d\cos\theta} = \frac{d\sigma_p(\cos\theta) - d\sigma_{\bar{p}}(\cos\theta)}{d\sigma_p(\cos\theta) + d\sigma_{\bar{p}}(\cos\theta)},$$

其中 $d\sigma_p(\cos\theta)$ 和 $d\sigma_{\bar{p}}(\cos\theta)$ 分别代表 $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ 末态 p 和 $\bar{p}$ 的微分截面，由经过修正的 p 和 $\bar{p}$ 角分布得到。

- 电荷不对称的累计值：

$$A_C = \frac{\sigma_p(\cos\theta > 0) - \sigma_{\bar{p}}(\cos\theta > 0)}{\sigma_p(\cos\theta > 0) + \sigma_{\bar{p}}(\cos\theta > 0)},$$

质子的 A_C 如图中绿色直线和误差带表示， μ^+ 的 A_C 如图中红色直线和误差带表示。

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构

重子形状因子
双光子交换的重
献

电荷不对称
角分布不对称的
分析
双光子交换
 $\mathcal{O}_3$ 的研究

其他高阶效应
的排除

分离 IFI
分离效果

总结



不对称的来源?

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构

重子形状因子

双光子交换的重
献

电荷不对称

角分布不对称的
分析

双光子交换

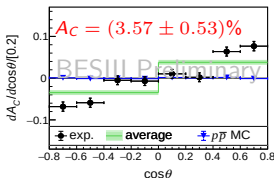
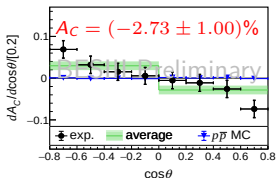
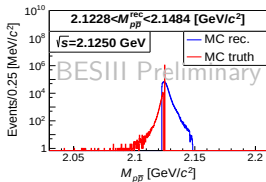
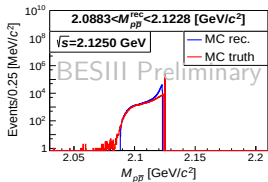
$\mathcal{F}_3$ 的研究

其他高阶效应
的排除

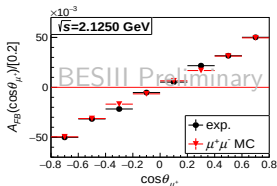
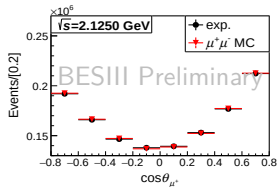
分离 IFI

分离效果

总结



(a) 从 OPE $\otimes$ TPE 分离出 IFI。



(b) $M_{\mu^+\mu^-}$ 分析。

■ 源自于物理:

- $\gamma\text{-}Z^0$ 干涉: $< 10^{-4}$ 因远离 $\sqrt{s} \ll M_Z$ 区域, 所以不可能!
- 真空极化 (VP) + 初态辐射 (ISR) + 末态辐射 (FSR)? 不可能!
- 初末态辐射干涉 (IFI)? 通过研究 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 和在不同重建的 $M_{p\bar{p}}$, $M_{\mu^+\mu^-}$ 的区间, 不同 IFI 类事例比率分析。
- 单双光子干涉?



电荷不对称

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构

重子形状因子

双光子交换的重
贡献

电荷不对称

角分布不对称的
分析

双光子交换

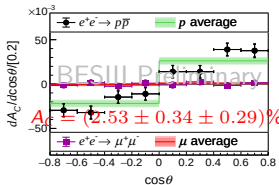
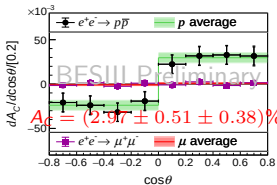
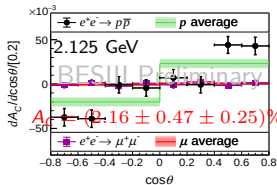
$\mathcal{O}_3$ 的研究

其他高阶效应
的排除

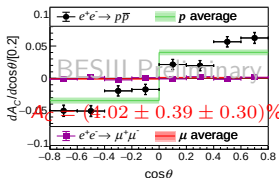
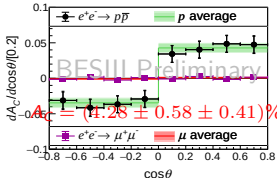
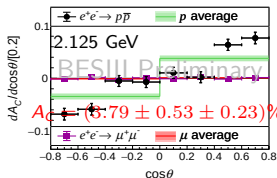
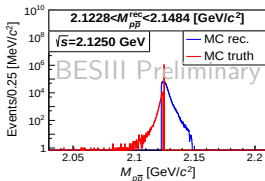
分离 IFI

分离效果

总结

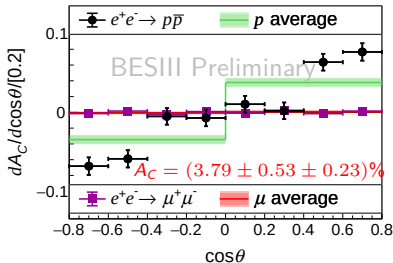
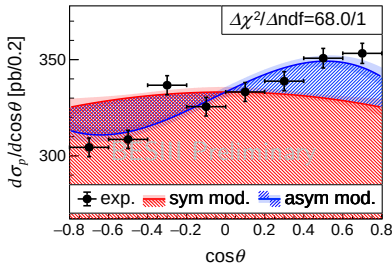


通过 $M_{p\bar{p}}$ 把类
Born 事例分离
出来。





双光子交换



- 出射 p 的角分布的对称模型:

$$\frac{d\sigma_{p\bar{p}}^{\text{OPE}}}{d\cos\theta} = a_0^{\text{OPE}}(q^2) + a_2^{\text{OPE}}(q^2) \cos^2\theta,$$

其中,

$$a_0^{\text{OPE}}(q^2) = \frac{\pi\alpha_{\text{EM}}^2\beta C}{2q^2} \left[|G_M^{\text{OPE}}(q^2)|^2 + \frac{4m_p^2 c^2}{q^2} |G_E^{\text{OPE}}(q^2)|^2 \right],$$

$$a_2^{\text{OPE}}(q^2) = \frac{\pi\alpha_{\text{EM}}^2\beta C}{2q^2} \left[|G_M^{\text{OPE}}(q^2)|^2 - \frac{4m_p^2 c^2}{q^2} |G_E^{\text{OPE}}(q^2)|^2 \right],$$

是OPE近似下的 $|G_E(q^2)|^2$ 和 $|G_M(q^2)|^2$ 的线性组合。

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构
重子形状因子
双光子交换的重
献

电荷不对称
角分布不对称的
分析
双光子交换
 G_A 的研究

其他高阶效应
的排除
分离 IFI
分离效果

总结



双光子交换

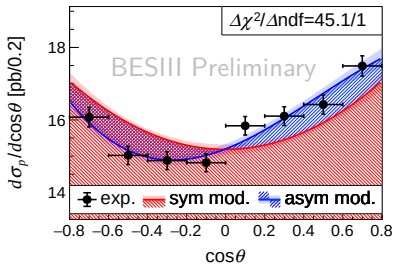
- 右图是除了2.125 GeV的 16 个能量点数据的累计：
- 不对称模型：

$$\frac{d\sigma_{p\bar{p}}}{d\cos\theta} = a_0(q^2) + a_1(q^2)\cos\theta + a_2(q^2)\cos^2\theta - a_1(q^2)\cos^3\theta.$$

其中：

$$\begin{aligned} a_0(q^2) &= \frac{\pi\alpha_{\text{EM}}^2\beta C}{2q^2} \left[|G_M(q^2)|^2 + 2\text{Re}[G_M(q^2)\Delta G_M(q^2)] + \frac{4m_p^2 c^2}{q^2} \{|G_E(q^2)|^2 + 2\text{Re}[G_E(q^2)\Delta G_E(q^2)]\} \right], \\ &= \frac{\pi\alpha_{\text{EM}}^2\beta C}{2q^2} \left[|\tilde{G}_M(q^2)|^2 + \frac{4m_p^2 c^2}{q^2} |\tilde{G}_E(q^2)|^2 \right] = a_0^{\text{OPE}}(q^2) + \Delta a_0(q^2), \\ a_2(q^2) &= \frac{\pi\alpha_{\text{EM}}^2\beta C}{2q^2} \left[|G_M(q^2)|^2 + 2\text{Re}[G_M(q^2)\Delta G_M(q^2)] - \frac{4m_p^2 c^2}{q^2} \{|G_E(q^2)|^2 + 2\text{Re}[G_E(q^2)\Delta G_E(q^2)]\} \right], \\ &= \frac{\pi\alpha_{\text{EM}}^2\beta C}{2q^2} \left[|\tilde{G}_M(q^2)|^2 - \frac{4m_p^2 c^2}{q^2} |\tilde{G}_E(q^2)|^2 \right] = a_2^{\text{OPE}}(q^2) + \Delta a_2(q^2), \end{aligned}$$

是 $|\tilde{G}_E(q^2)|^2$ 和 $|\tilde{G}_M(q^2)|^2$ 的线性组合。其中 $|\tilde{G}_E(q^2)| \approx |G_E(q^2)|$, $|\tilde{G}_M(q^2)| \approx |G_M(q^2)|$ 。





双光子交换

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构

重子形状因子

双光子交换的重
献

电荷不对称

角分布不对称的
分析

双光子交换

$\mathcal{F}_3$ 的研究

其他高阶效应
的排除

分离 IFI

分离效果

总结

- 右图是包含 2.125 GeV 的 17 个能量点累计:

- 不对称模型:

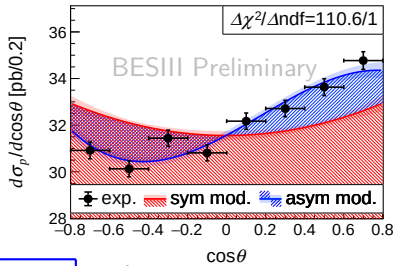
$$\frac{d\sigma_{p\bar{p}}}{d\cos\theta} = a_0(q^2) + a_1(q^2)\cos\theta + a_2(q^2)\cos^2\theta - a_1(q^2)\cos^3\theta.$$

其中 $a_0(q^2) = a_0^{\text{OPE}}(q^2) + \Delta a_0(q^2)$, $a_2(q^2) = a_2^{\text{OPE}}(q^2) + \Delta a_2(q^2)$,

$$a_1(q^2) = \frac{\pi\alpha_{\text{EM}}^2\beta^2 C}{q^2(1-\beta^2)} \text{Re} \left\{ \left[\frac{4m_p^2 c^2}{q^2} G_E(q^2) - G_M(q^2) \right] \mathcal{F}_3(q^2) \right\},$$

$$= \frac{\pi\alpha_{\text{EM}}^2\beta^2 C}{q^2(1-\beta^2)} A(q^2).$$

$a_1(q^2)$ 是反对称项。





电荷不对称的结果

- 我们**确定**了 $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ 过程末态 $p\bar{p}$ 角分布的**不对称**。
- **确定**了单双光子干涉的截面及其比率和**电荷不对称**。

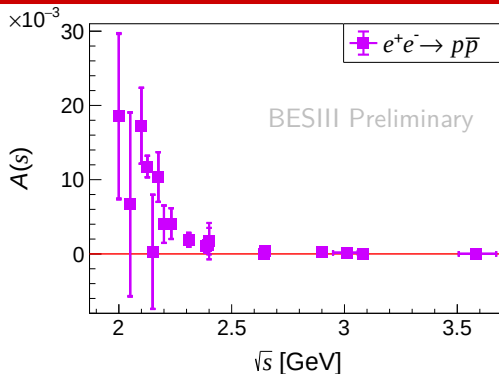
$\sqrt{s}$ [GeV]	σ_{pp}^{OPE}	$\sigma_{pp}^{\text{OPE} \otimes \text{TPE}}$	$\sigma_{pp}^{\text{OPE} \otimes \text{TPE}} / \sigma_{pp}^{\text{OPE}}$ [%]	Significance	A_C [%]
2.0000	$769.7 \pm 11.7 \pm 2.1$	$18.5 \pm 11.1 \pm 1.7$	$2.41 \pm 1.44 \pm 0.28$	1.7	$2.45 \pm 1.53 \pm 0.36$
2.0500	$647.6 \pm 18.0 \pm 2.7$	$9.0 \pm 16.6 \pm 2.0$	$1.39 \pm 2.57 \pm 0.36$	0.5	$1.56 \pm 2.75 \pm 0.48$
2.1000	$625.7 \pm 9.2 \pm 0.9$	$28.9 \pm 8.5 \pm 0.9$	$4.61 \pm 1.37 \pm 0.23$	3.4	$4.95 \pm 1.46 \pm 0.27$
2.1250	$529.9 \pm 2.8 \pm 1.1$	$21.6 \pm 2.6 \pm 0.6$	$4.08 \pm 0.50 \pm 0.21$	8.2	$3.79 \pm 0.53 \pm 0.23$
2.1500	$486.9 \pm 16.9 \pm 2.1$	$0.5 \pm 15.2 \pm 1.0$	$0.11 \pm 3.11 \pm 0.27$	0.0	$0.10 \pm 3.37 \pm 0.37$
2.1750	$404.1 \pm 7.8 \pm 5.5$	$21.9 \pm 7.1 \pm 0.5$	$5.42 \pm 1.76 \pm 0.21$	3.1	$7.14 \pm 1.88 \pm 0.61$
2.2000	$334.5 \pm 6.2 \pm 4.6$	$9.0 \pm 5.7 \pm 0.4$	$2.70 \pm 1.70 \pm 0.21$	1.6	$3.69 \pm 1.82 \pm 0.62$
2.2324	$272.5 \pm 5.3 \pm 3.7$	$9.9 \pm 5.0 \pm 0.6$	$3.64 \pm 1.85 \pm 0.28$	2.0	$3.53 \pm 1.95 \pm 0.64$
2.3094	$114.7 \pm 2.7 \pm 1.8$	$5.3 \pm 2.6 \pm 0.2$	$4.63 \pm 2.31 \pm 0.25$	2.0	$5.31 \pm 2.43 \pm 0.63$
2.3864	$104.8 \pm 2.9 \pm 1.5$	$3.2 \pm 2.8 \pm 0.6$	$3.09 \pm 2.64 \pm 0.60$	1.2	$3.08 \pm 2.78 \pm 0.90$
2.3960	$101.8 \pm 1.6 \pm 1.6$	$4.0 \pm 1.6 \pm 0.2$	$3.95 \pm 1.56 \pm 0.28$	2.5	$5.81 \pm 1.63 \pm 0.65$
2.4000	$98.0 \pm 7.1 \pm 1.1$	$9.3 \pm 6.9 \pm 0.9$	$9.48^{+7.11}_{-7.09} \pm 0.93$	1.3	$10.61 \pm 7.37 \pm 0.94$
2.6444	$17.74 \pm 0.97 \pm 0.34$	$-0.04 \pm 0.94 \pm 0.13$	$-0.24 \pm 5.31 \pm 0.76$	0.0	$0.30 \pm 5.55 \pm 0.92$
2.6464	$27.77 \pm 1.24 \pm 0.43$	$1.70 \pm 1.16 \pm 0.27$	$6.11 \pm 4.20 \pm 0.97$	1.5	$8.54 \pm 4.39 \pm 1.14$
2.9000	$11.72 \pm 0.45 \pm 0.17$	$1.08 \pm 0.43 \pm 0.04$	$9.19 \pm 3.74 \pm 0.34$	2.5	$11.13 \pm 3.88 \pm 0.69$
3.0091	$6.51 \pm 0.35 \pm 0.11$	$0.76 \pm 0.34 \pm 0.04$	$11.65 \pm 5.30 \pm 0.58$	2.2	$9.78 \pm 5.48 \pm 0.87$
3.0800	$6.39 \pm 0.20 \pm 0.10$	$-0.03 \pm 0.20 \pm 0.02$	$-0.43^{+3.07}_{-3.07} \pm 0.34$	0.1	$-1.06 \pm 3.22 \pm 0.66$
3.5843	$1.14 \pm 0.04 \pm 0.02$	$0.03 \pm 0.04 \pm 0.01$	$2.68 \pm 3.60 \pm 0.72$	0.7	$3.90 \pm 3.76 \pm 0.93$
Average ¹	$25.32 \pm 0.15 \pm 0.23$	$0.93 \pm 0.14 \pm 0.03$	$3.66 \pm 0.55 \pm 0.20$	6.7	$4.28 \pm 0.58 \pm 0.41$
Average ²	$51.31 \pm 0.20 \pm 0.22$	$1.98 \pm 0.19 \pm 0.05$	$3.85 \pm 0.37 \pm 0.20$	10.5	$4.02 \pm 0.39 \pm 0.30$

¹Denotes average of all the $dN(\cos \theta)$, excluding the data at $\sqrt{s} = 2.125$ GeV.

²Denotes average of all the $dN(\cos \theta)$, including the data at $\sqrt{s} = 2.125$ GeV. ↻ ↺ ↻



$\mathcal{F}_3$ 相关项的研究



- A 和有效形状因子 $\mathcal{F}_3$ 相关。
- $\mathcal{F}_3$ 是描述核子电磁结构描述TPE相关的高阶修正。

$$A(q^2) = \text{Re} \left\{ \left[\frac{4m_p^2 c^2}{q^2} G_E(q^2) - G_M(q^2) \right] \mathcal{F}_3(q^2) \right\},$$

- MAMI 合作组曾经测量SL的 $A_{\perp}^{ep}$, 不仅和 G_E , G_M , $\mathcal{F}_3$ 相关, 还和 $\mathcal{F}_4$, $\mathcal{F}_5$ 相关 (B. X. Gou et al., PR 124, 122003 (2020))。



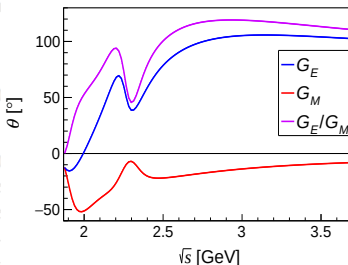
色散关系

- David Gross 的建议。
- 通过色散关系得到的模型计算出 G_E 和 G_M 的相位，进而知道实部 (Eur. Phys. J. A . 57, 255 (2021))。

Dispersion relations (DRs) are based on unitarity and analyticity. Here, DRs relate the real and imaginary parts of the electromagnetic nucleon form factors. Let $F(t)$ be a generic symbol for any one of the four independent nucleon form factors. We write down an unsubtracted dispersion relation of the form

$$F(t) = \frac{1}{\pi} \int_{t_0}^{\infty} \frac{\text{Im } F(t')}{t' - t - i\epsilon} dt', \quad (26)$$

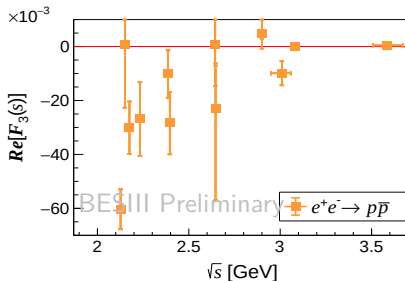
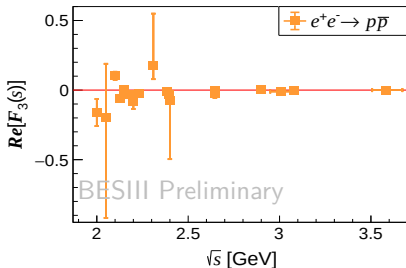
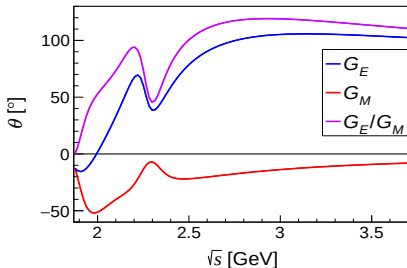
where t_0 is the threshold of the lowest cut of $F(t)$ (see below) and the $i\epsilon$ defines the integral for values of t on the cut. The convergence of an unsubtracted dispersion relation for the form factors has been assumed. For proofs of such a representation in perturbation theory, see Ref. [69] (and references





首次确定了电磁形状因子 $\mathcal{F}_3$ 的性质

- 色散关系计算出 G_E 和 G_M 的实部。
- 拟合得到 $\mathcal{F}_3$ 的实部。
- 未来通过更精确的色散关系计算、横向束流极化实验和 $e^+e^- \rightarrow \gamma p \bar{p}$ 等方法得到 $\text{Re}(G_E)$ 和 $\text{Re}(G_M)$ ，进而研究 $\mathcal{F}_3$ 形状因子的测量。





其他高阶效应的排除

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构

重子形状因子

双光子交换的贡
献

电荷不对称

角分布不对称的
分析

双光子交换

$\mathcal{F}_3$ 的研究

其他高阶效应
的排除

分离 IFI

分离效果

总结

1 核子的电磁结构

- 重子形状因子
- 双光子交换的贡献

2 电荷不对称

- 角分布不对称的分析
- 双光子交换
- 质子电磁形状因子 $\mathcal{F}_3$ 的研究

3 其他高阶效应的排除

- 从 $\text{OPE} \otimes \text{TPE}$ 中分离 IFI
- 分离效果

4 总结



从单双光子干涉分离出初末态辐射干涉

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构

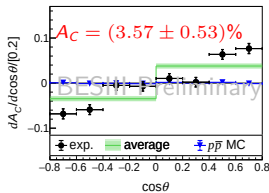
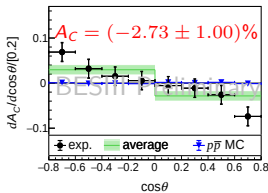
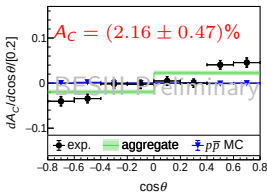
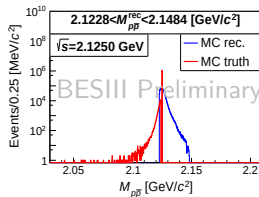
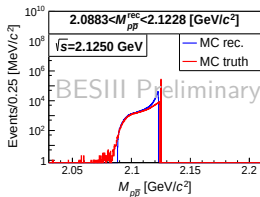
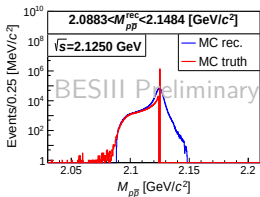
重子形状因子
双光子交换的贡
献

电荷不对称
角分布不对称的
分析
双光子交换
 $\mathcal{M}_2$ 的研究

其他高阶效应
的排除

分离 IFI
分离效果

总结

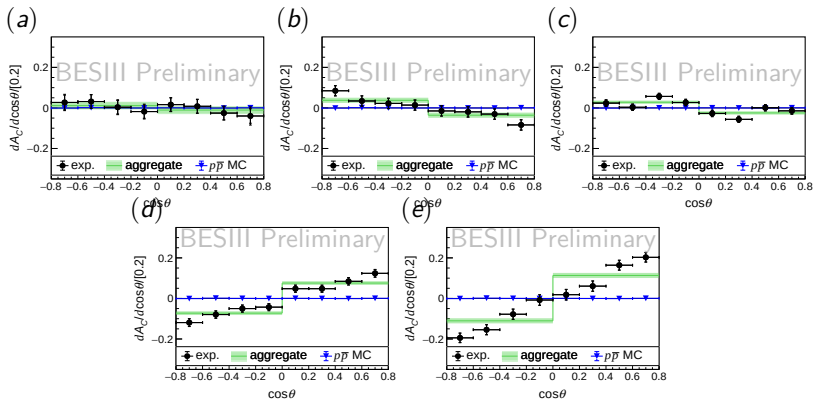


■ 2.125 GeV 上不同的重建能量范围的 A_C :

- 通过 MC truth 溯源实例的类别;
- 发现有两种不对称形式。



从单双光子干涉分离出初末态辐射干涉



■ 5 个能量区间 $dA_C/d\cos\theta$ 的行为:

- 较低 $M_{p\bar{p}}$ 的 $dA_C/d\cos\theta$ 是负斜率, 较高 $M_{p\bar{p}}$ 的 $dA_C/d\cos\theta$ 是正斜率, 中间部分较平。
- (d) 和 (e) 显示以 $\text{OPE} \otimes \text{TPE}$ 类事例为主, 特征是较小能量损失; 相反地, (a) 和 (b) 显示以硬 IFI-like 类事例为主。



分离效果

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

粒子的电磁结
构

重子形状因子

双光子交换的贡
献

电荷不对称

角分布不对称的
分析

双光子交换

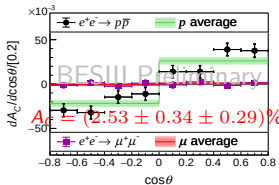
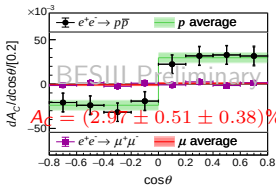
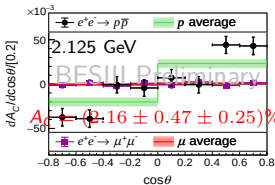
$\mathcal{M}_3$ 的研究

其他高阶效应
的排除

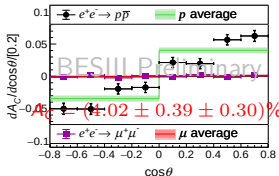
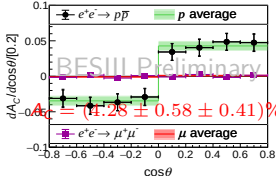
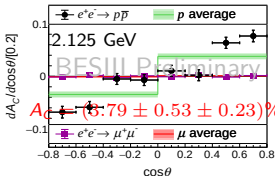
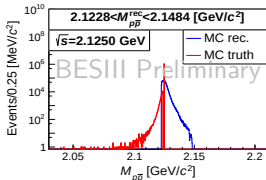
分离 IFI

分离效果

总结



通过 $M_{p\bar{p}}$ 把类
Born 事例分离
出来。





总结

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中
的双光子交换
效应

核子的电磁结
构

重子形状因子

双光子交换的贡
献

电荷不对称

角分布不对称的
分析

双光子交换

$\mathcal{F}_3$ 的研究

其他高阶效应
的排除

分离 IFI

分离效果

总结

1 核子的电磁结构

- 重子形状因子
- 双光子交换的贡献

2 电荷不对称

- 角分布不对称的分析
- 双光子交换
- 质子电磁形状因子 $\mathcal{F}_3$ 的研究

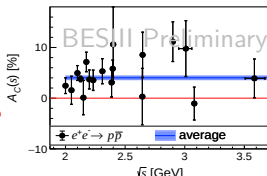
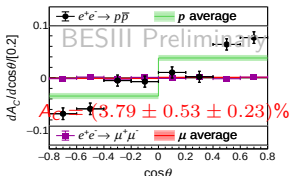
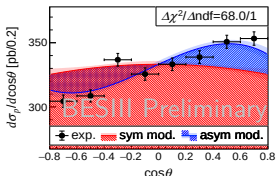
3 其他高阶效应的排除

- 从 $\text{OPE} \otimes \text{TPE}$ 中分离 IFI
- 分离效果

4 总结



总结



■ 在**TL**区间首次发现**TPE**效应：

- 发现 $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ 过程末态角分布的**不对称**， 8.2σ ；
- **电荷不对称TPE**效应导致。

■ 使得对质子 **FFs** 的认识更深入一步：

- 在**TL**区间，对 2.000 – 3.671 GeV 的质子 FFs 进行了最精确的测量；

■ 理论和实验，直接与间接证明**电荷不对称TPE**效应导致。

- 通过和 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 过程的对比确定是**OPE** ⊗ **TPE**造成的**不对称**。
- 通过分离出**IFI**事例确定**OPE** ⊗ **TPE**造成的**不对称**。



总结

北京谱仪
BESIII 上质
子形状因子中的
双光子交换
效应

核子的电磁结
构

重子形状因子

双光子交换的贡
献

电荷不对称

角分布不对称的
分析

双光子交换

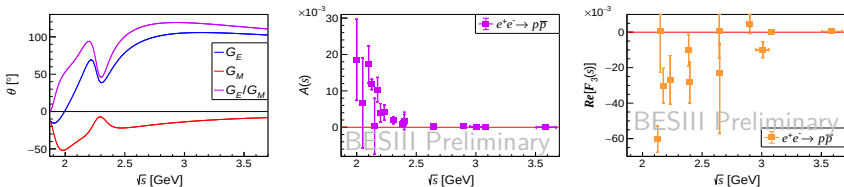
$\mathcal{F}_3$ 的研究

其他高阶效应
的排除

分离 IFI

分离效果

总结



■ 对于质子内部电磁结构和动力学更加深入的认识:

- 为质子内部结构和 QED 的深入理解提供了实验结果;
- BESIII 对于 $\mathcal{F}_3$ 完成首次最直接的研究, 也是首次 TL 区域的研究。
- TL 区域中 $Re(G_E)$ 和 $Re(G_M)$ 尚未直接测量, 估计 $Re(\mathcal{F}_3)$ 为负, 量级在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$, 进一步反映了 $\mathcal{F}_3$ 在质子电磁结构中的重要作用。
- 未来通过更精确的色散关系计算、横向束流极化实验和 $e^+e^- \rightarrow \gamma p \bar{p}$ 等方法得到 $Re(G_E)$ 和 $Re(G_M)$, 进而研究 $\mathcal{F}_3$ 形状因子的测量。为子 TLFFs 的复数形式的研究奠定了基础。

意义: 首次在 TL 区间, 明确观测到 TPE 的效应, 为 QED 和质子结构提供了新的见解。

Thanks for your attention!