研究背景
核子的内部结构
形状因子
加速器与探测器
BEPCII
BESIII
核子形状因子
质子形状因子
能量扫描法
初态辐射法
中子形状因子
超子形状因子
Λ 形状因子
Σ 形状因子
Σ^+ 和 Σ^- 的形状因子
Σ^0 形状因子
Ξ 形状因子
Λ_c 形状因子
总结与展望

北京谱仪 BESIII 上重子类时形状因子的最新结果

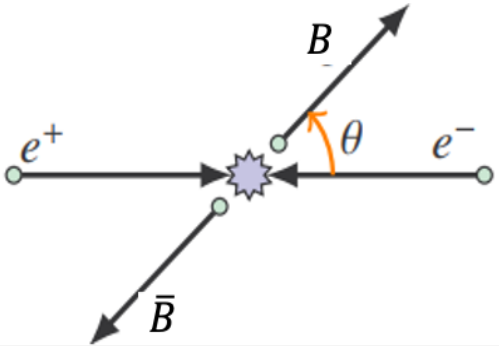
报告人：夏磊
xial@mail.ustc.edu.cn

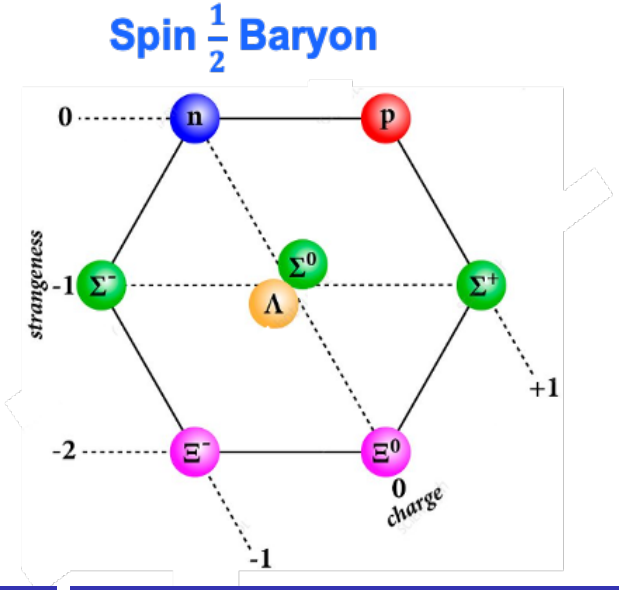
中国科学技术大学
核探测与核电子学国家重点实验室

BESIII 实验上粲强子、QCD 及新物理研讨会
2022 年 8 月 22 日 兰州大学

研究背景
核子的内部结构
形状因子
加速器与探测器
BEPCII
BESIII
核子形状因子
质子形状因子
能量扫描法
初态辐射法
中子形状因子
超子形状因子
Λ 形状因子
Σ 形状因子
Σ^+ 和 Σ^- 的形状因子
Σ^0 形状因子
Ξ 形状因子
Λ_c 形状因子
总结与展望

目录





1 研究背景

2 加速器与探测器

3 核子形状因子的最新结果

4 超子形状因子的最新结果

5 总结与展望

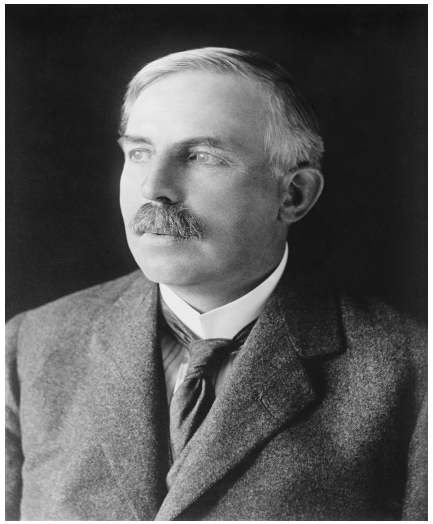
1 研究背景
- 核子的内部结构
- 形状因子

2 加速器与探测器
- 北京正负电子对撞机（BEPCII）
- 北京谱仪（BESIII）

3 核子形状因子的最新结果
- 质子形状因子
  - 能量扫描法
  - 初态辐射法
- 中子形状因子

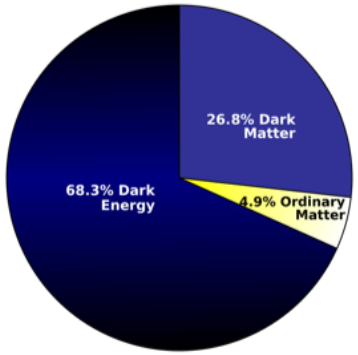
4 超子形状因子的最新结果
- Λ 形状因子及其相位
- Σ 形状因子
  - Σ^+ 和 Σ^- 的形状因子
  - Σ^0 形状因子
- Ξ 形状因子
- Λ_c 形状因子

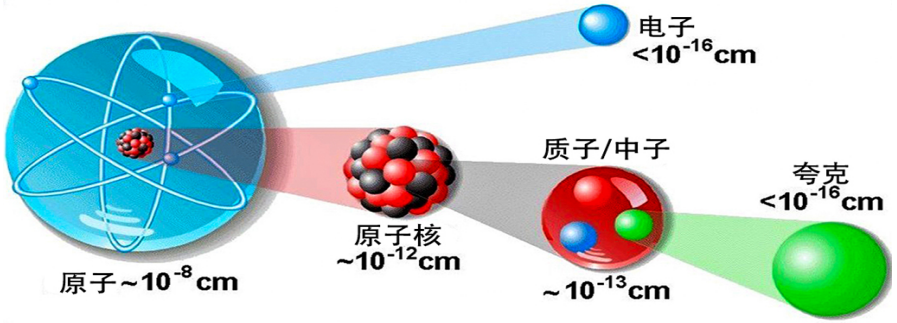
5 总结与展望



核子的内部结构：历史

- 核子是物质世界的主要组成部分。对核子的研究在上个世纪取得了重大突破。





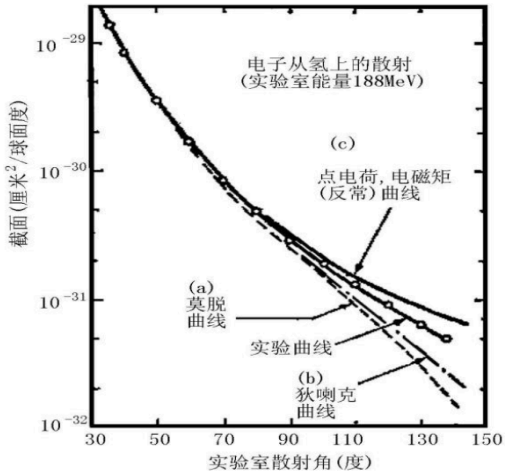
- 1896 年，发现 β 衰变（H. Becquerel，P. Curie 和 M. Curie，1903 年诺贝尔物理学奖）。
- 1919 年，发现质子，（E. Rutherford，1908 年诺贝尔化学奖得主）。
- 1932 年，发现中子，（J. Chadwick, Nature **129**, 312 (1932)，J. Chadwick，1935 诺贝尔物理学奖）。
- 1937 年，发现反常磁矩（I. Estermann *et al.*, PR **52**, 535 (1937)，O. Stern，1943 诺贝尔物理学奖）。
- 1955 年，通过电子-质子弹性散射发现质子具有内部结构（R. Hofstadter*et al.*, PR **98**, 217 (1955)，R. Hofstadter，1961 诺贝尔物理学奖）。
- 1969 年，通过核子深度非弹性散射发现质子内部存在有点状小核（E. D. Bloom *et al.*, PRL **23**, 930 (1969)，M. Breidenbach *et al.*, PRL **23**, 935 (1969)，J. R. Friedman，J. R. Kendall 和 R. Taylor，1990 诺贝尔物理学奖）。

核子的内部结构：非点结构

- 核子非点结构的重要证据：
  - 核子的反常磁矩（I. Estermann *et al.*, PR **52**, 535 (1937)）。
    - ✓ 在点状粒子假设下，质子和中子的磁矩分别是 μ_N 和 0。
    - ✓ 实验给出质子和中子的磁矩分别为：$2.79\mu_N$ 和$-1.91\mu_N$。
  - 核子弹性散射（R. Hofstadter *et al.*, PR **98**, 217 (1955)）。
    - ✓ 理论上，电子-质子弹性散射的微分截面：

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

    - ✓ 但实验中，在 188MeV 的电子和质子的弹性散射的微分截面与 (a)，(b)，(c) 偏离（R. W. McAllister *et al.*, PR **102**, 851 (1956)）。
    - ✓ 以上偏差体现质子具有内部结构。

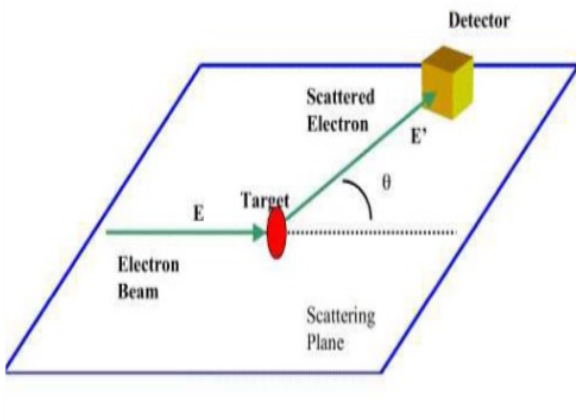


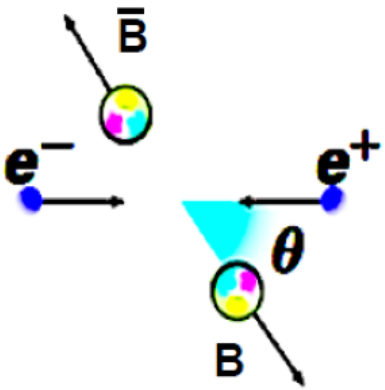
许咨宗《核与粒子物理导论》

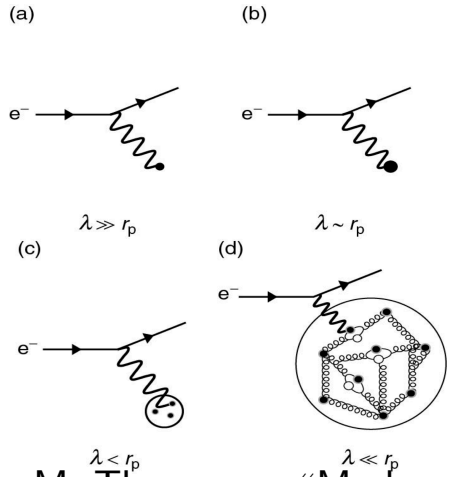
  - 核子深度非弹性散射（E. D. Bloom *et al.*, PRL **23**, 930 (1969)，M. Breidenbach *et al.*, PRL **23**, 935 (1969)）。
    - ✓ 在大 q^2 传递、大的末态强子系统不变质量区间的散射表现为电子与核子中的类点的小核心的散射。
    - ✓ 被质子散射的电子的行为表明，质子内部有点状小核。其后表明，这些点状小核和关于存在夸克的想法相一致。

核子的内部结构

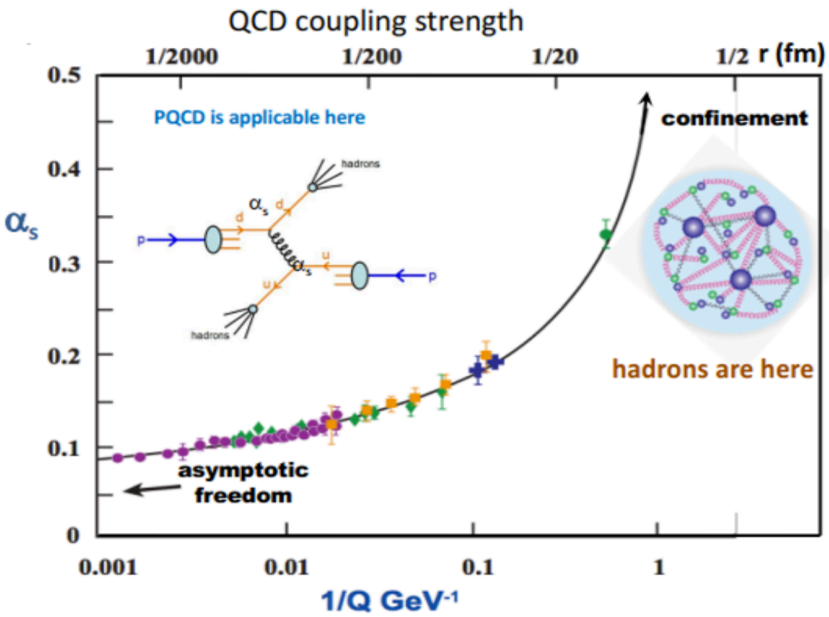
- 为了理解质子内部结构，可以将一个点粒子投射到质子上，比如 $e^- p$ 散射实验；或者采用 $e^+e^- \Leftrightarrow p\bar{p}$ 湮没实验。







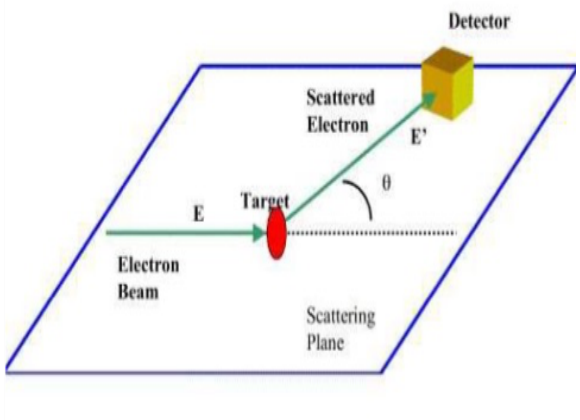
M. Thomson, 《Modern particle physics》

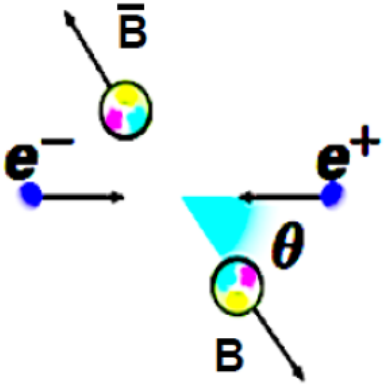


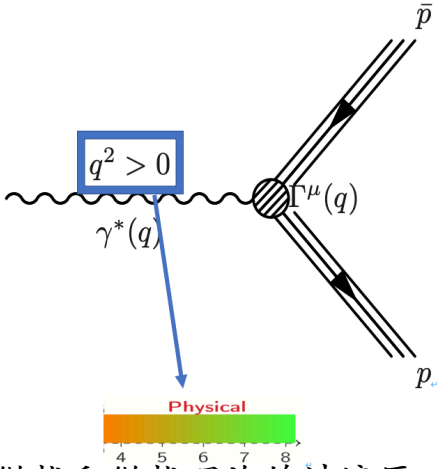
- 我们看到的质子形态取决于从探针到质子传递的动量 q^2 的大小。
- 核子是具有内部结构的复合物体，在传递低 q^2 时，微扰理论（展开 α_S）不起作用。
  - 核子结构必须在实验中测量！

核子的内部结构

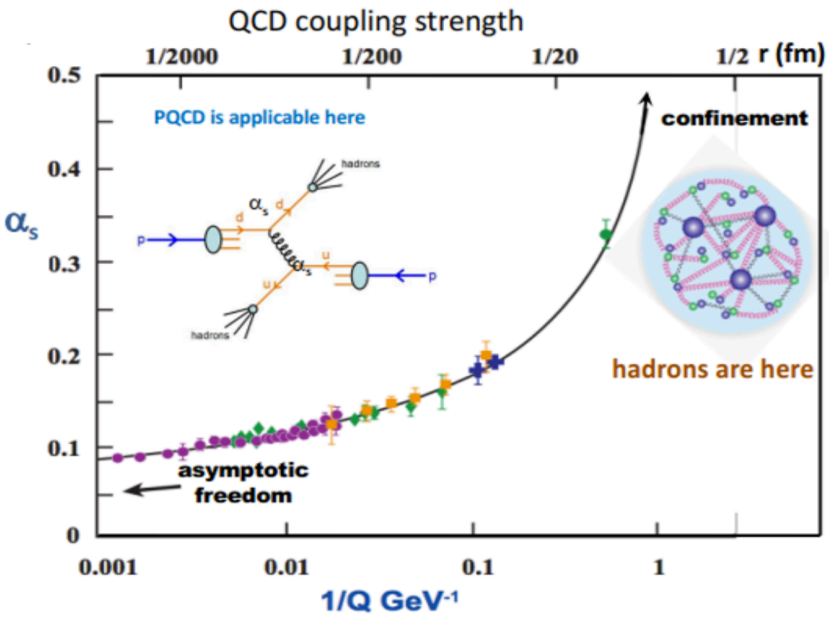
- 为了理解质子内部结构，可以将一个点粒子投射到质子上，比如 $e^- p$ 散射实验；或者采用 $e^+e^- \Leftrightarrow p\bar{p}$ 湮没实验。







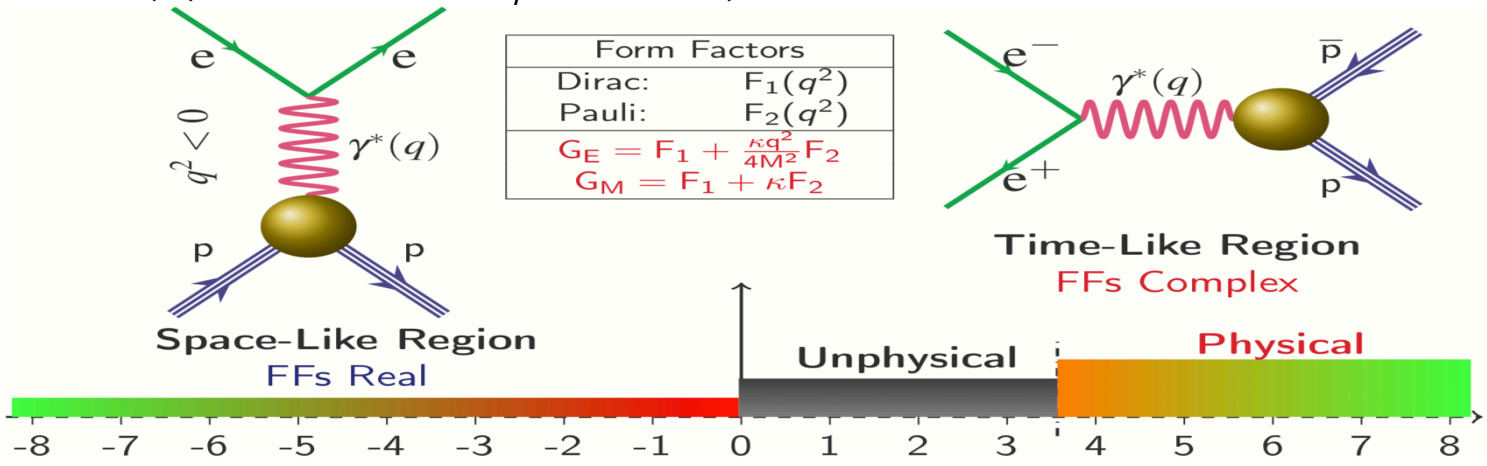
非微扰和微扰理论的过渡区



- 我们看到的质子形态取决于从探针到质子传递的动量 q^2 的大小。
- 核子是具有内部结构的复合物体，在传递低 q^2 时，微扰理论（展开 α_S）不起作用。
  - 核子结构必须在实验中测量！

核子形状因子

- 核子形状因子（FFs）是核子的最基本的可观测量之一，且和其内部结构和动力学密切相关。有助于描述电荷和电流的空间分布。
- 核子 FF由类空过程（SL）和类时过程（TL）测量得到。
  - 质子的电磁顶点 Γ_μ 描述强子流：



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

✓ $G_E(q^2) = F_1(q^2) + \tau\kappa_p F_2(q^2)$,

✓ $G_M(q^2) = F_1(q^2) + \kappa_p F_2(q^2)$,

✓ $\tau = \frac{q^2}{4m_p^2}$, $\kappa_p = \frac{g_p-2}{2} = \mu_p - 1$.

✓ $q^2 = 0$时：

质子：

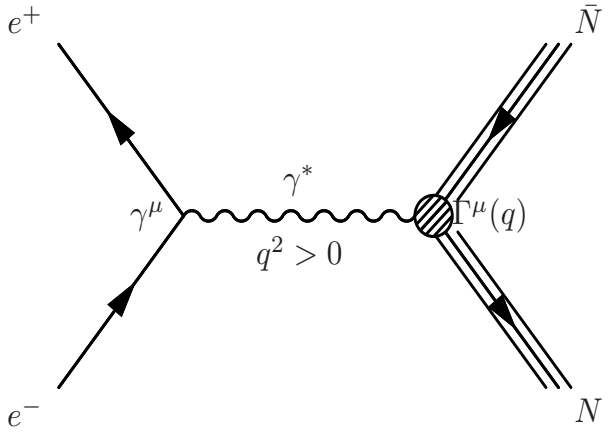
$F_1 = F_2 = 1$, $G_E = 1$, $G_M = \mu_p$,

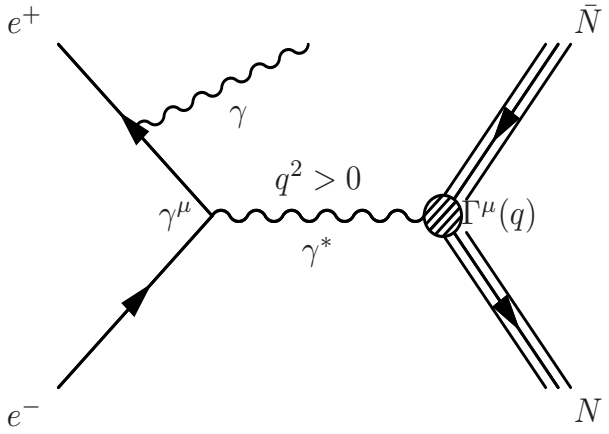
中子：

$F_1 = 0$, $F_2 = 1$, $G_E = 0$, $G_M = \mu_n$.

- Sachs FF：G_E 和 G_M，（F. J. Ernst *et al.*, PR **119**, 1105 (1960)，R. G. Sachs, PR **126**, 2256 (1962)），可以理解为核子电荷和磁化强度的空间分布在Breit frame的傅立叶变换：$\rho(\vec{r}) = \iiint \frac{d^3q}{2\pi^3} e^{-i\vec{q}\cdot\vec{r}} \frac{M}{E(\vec{q})} G_E(\vec{q}^2)$.

能量扫描法和初态辐射法





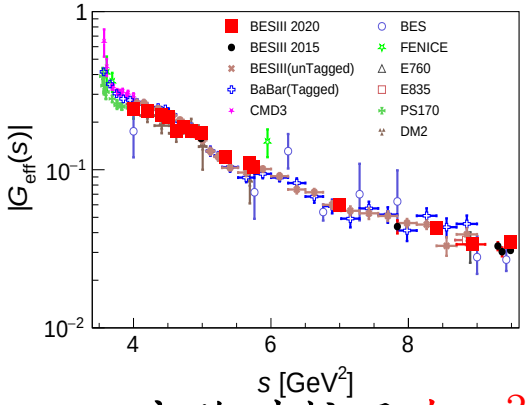
- TL过程包括能量扫描法和初态辐射（ISR），BESIII 都可以实现：

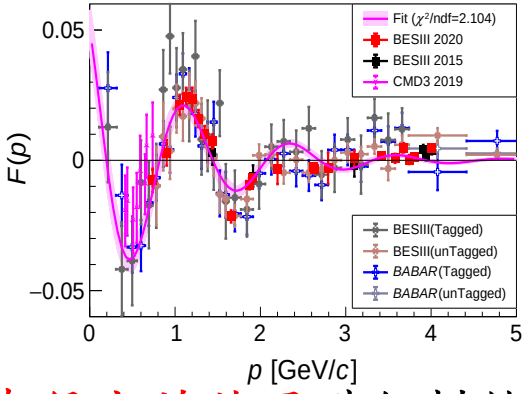
	能量扫描法	ISR 方法
E_{beam}	分立	固定
$\mathcal{L}$	每一个能量点的亮度不高	在一个能量点亮度很高
σ	$\frac{d\sigma_{p\bar{p}}}{d\cos\theta} = \frac{\pi\alpha^2\beta C}{2q^2}[\lvert G_M\rvert^2(1+\cos^2\theta) + \frac{4m_p^2}{q^2}\lvert G_E\rvert^2\sin^2\theta]$	$\frac{d\sigma_{p\bar{p}\gamma}}{dq^2 d\theta_\gamma} = \frac{1}{s}W(s,x,\theta_\gamma)\sigma_{p\bar{p}}(q^2)$ $W(s,x,\theta_\gamma) = \frac{\alpha}{\pi x}(\frac{2-2x+x^2}{\sin^2\theta_\gamma} - \frac{x^2}{2})$
q^2	单一于每个能量点	从阈值到 s
文章	M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PRL **124**, 042001 (2020) M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PRD **91**, 112004 (2015) M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), Nat. Phys. **17**, 1200 (2021)	M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PRD **99**, 092002 (2019) M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PLB **817**, 136328 (2021)

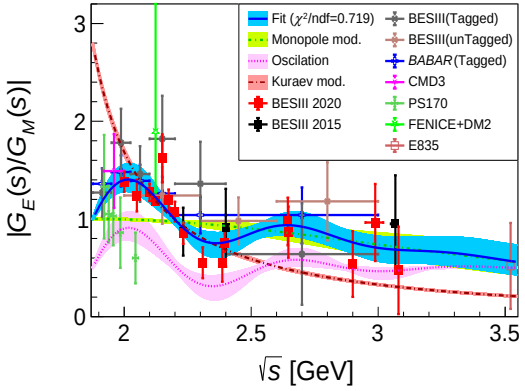
ISR 抑制因子：$\frac{\alpha}{\pi} \sim \frac{1}{400}$。

核子形状因子

- 在 e^-p 散射和 $e^+e^- \to p\bar{p}$ 湮没实验研究了许多现象：（JLAB，MAMI，FENICE，CMD3，PS170，BESIII，*BABAR*）
  - SL 的偶极定律；
  - SL 的标度无关性；
  - TL，在阈值附近，有效形状因子 $|G_{\rm eff}|$ 陡峭地上升；
  - TL，$|G_{\rm eff}|$ 的振荡...







- 实验对核子在 q^2 在很大的范围进行描绘。
- 目前核子 FF测量遗留的的问题：
  - 精度差（11%，43%）且能量覆盖有限。
  - *BABAR*（J. P. Lee *et al.* (*BABAR* Collaboration), PRD **87**, 092005 (2013)）和 PS170（G. Bardin *et al.* (PS170 Collaboration), Nucl. Phys. **B411** 3 (1994)）测量的电磁形状因子之比 $|G_E/G_M|$ 不符合。是TL研究的长期的困扰。
  - 以前测量的结果多是 $|G_{\rm eff}|$（假设 $|G_E| = |G_M|$），对 $|G_E|$ 和 $|G_M|$ 少有效区分。我们首次对 $|G_E|$ 和 $|G_M|$ 两个形状因子进行了独立测量。

加速器与探测器

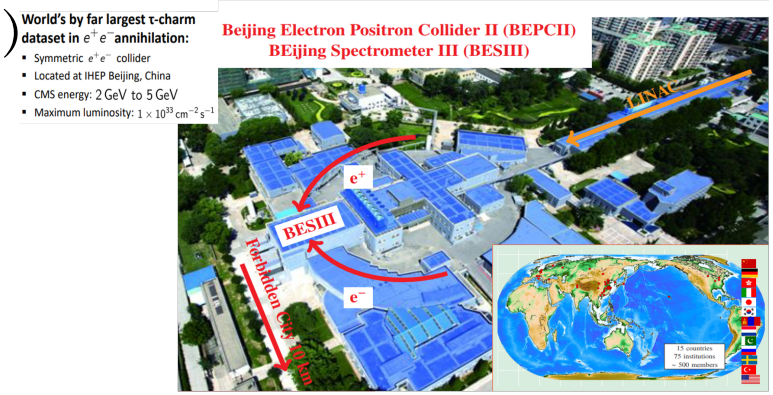
1 研究背景
- 核子的内部结构
- 形状因子

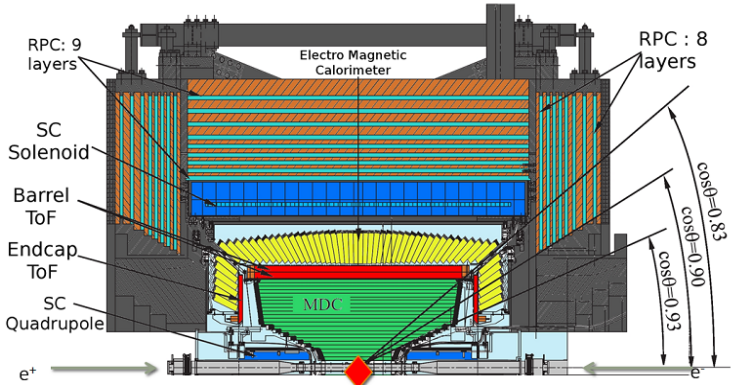
2 加速器与探测器
- 北京正负电子对撞机（BEPCII）
- 北京谱仪（BESIII）

3 核子形状因子的最新结果
- 质子形状因子
  - 能量扫描法
  - 初态辐射法
- 中子形状因子

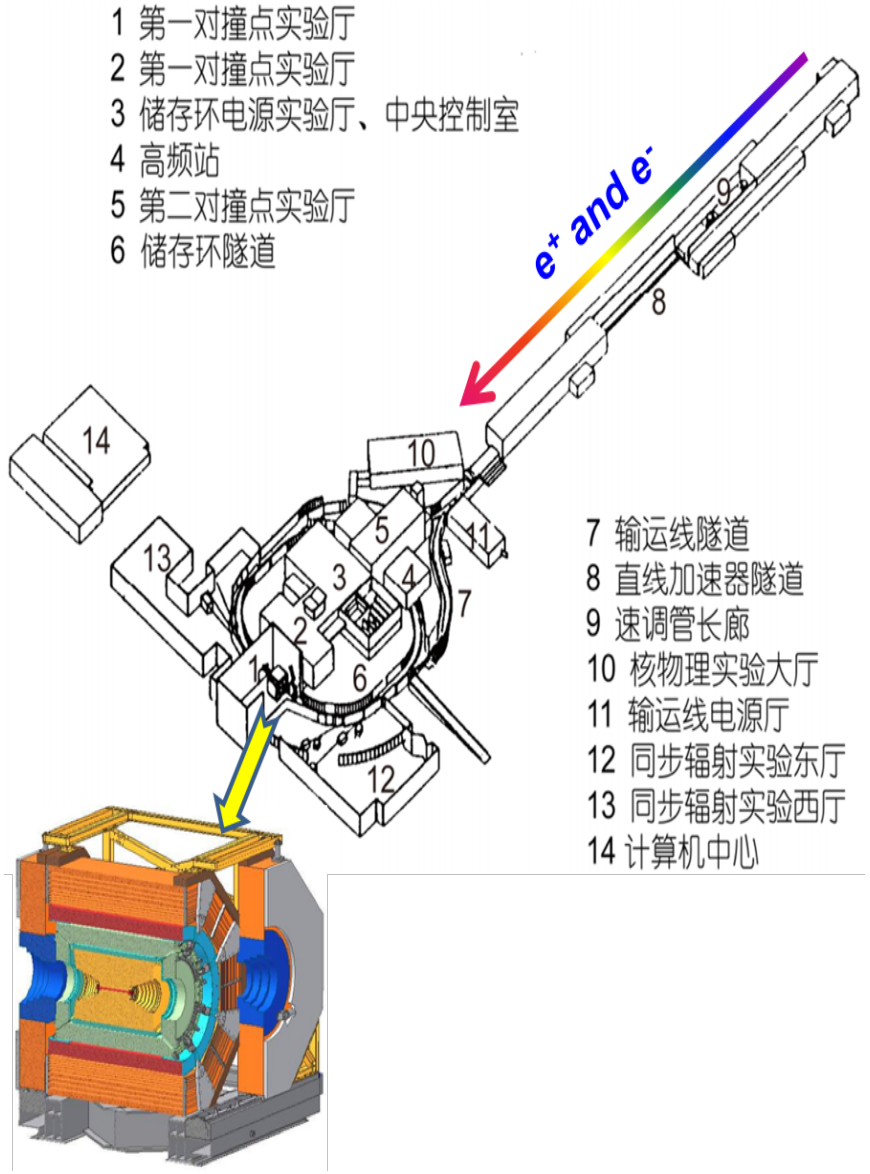
4 超子形状因子的最新结果
- Λ 形状因子及其相位
- Σ 形状因子
  - Σ^+ 和 Σ^- 的形状因子
  - Σ^0 形状因子
- Ξ 形状因子
- Λ_c 形状因子

5 总结与展望

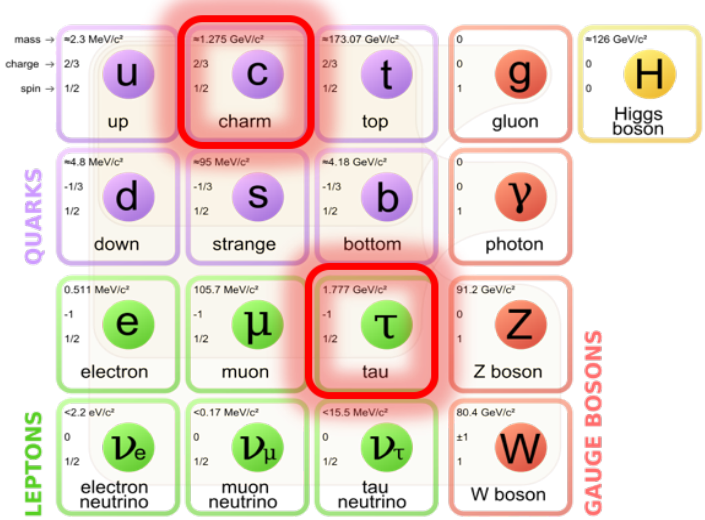




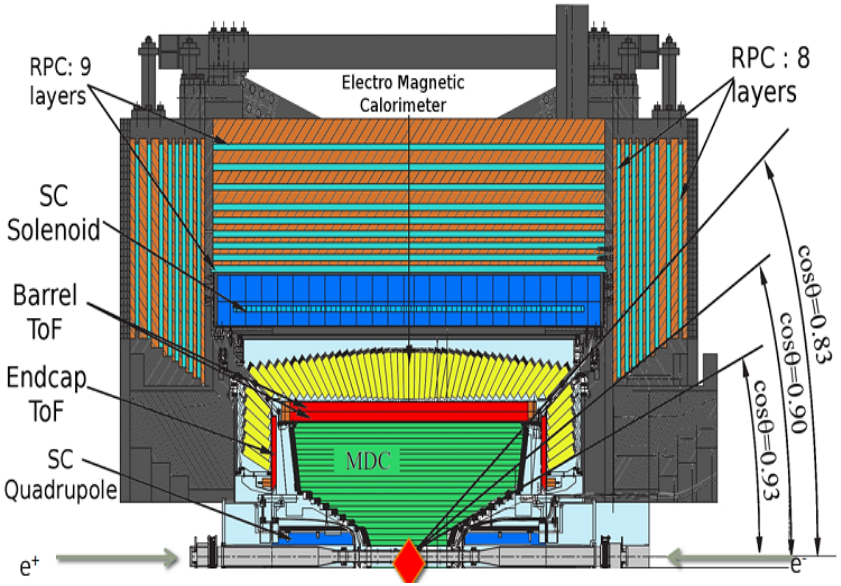
北京正负电子对撞机 II（BEPCII）



- E_{beam}：1.00∼2.50 GeV；
- 双储存环：e^+ 和 e^-；
- 束团数：93；
- 最高亮度：1.0×10^{33} cm^{-2}s^{-1} @3770 MeV。



北京谱仪（BESIII）



- 主漂移室（MDC）：（He/C_3H_8=40/60）
  - σ_{xy}=130 μm，dE/dx ~6%；
  - σ_p/p=0.5% 在 1 GeV。
- 飞行时间探测器（TOF）：（桶部：塑料闪烁体，端盖：MRPC）
  - σ_{time}(桶部)=80 ps；
  - σ_{time}(端盖)=110 ps；
  - 端盖更新为 MRPC 后，σ_{time}(端盖)=65 ps。
- 电磁量能器（EMC）：（碘化铯 CsI（铊 Tl））
  - σ_E/E(桶部)=2.5% 在 1 GeV；
  - σ_E/E(端盖)=5% 在 1 GeV。
- 超导磁体：B = 1 T。
- μ 子探测器（RPC）：
  - 桶部：9 层；
  - 端盖：8 层；
  - σ_{spatial}=2 cm.

核子形状因子的最新结果

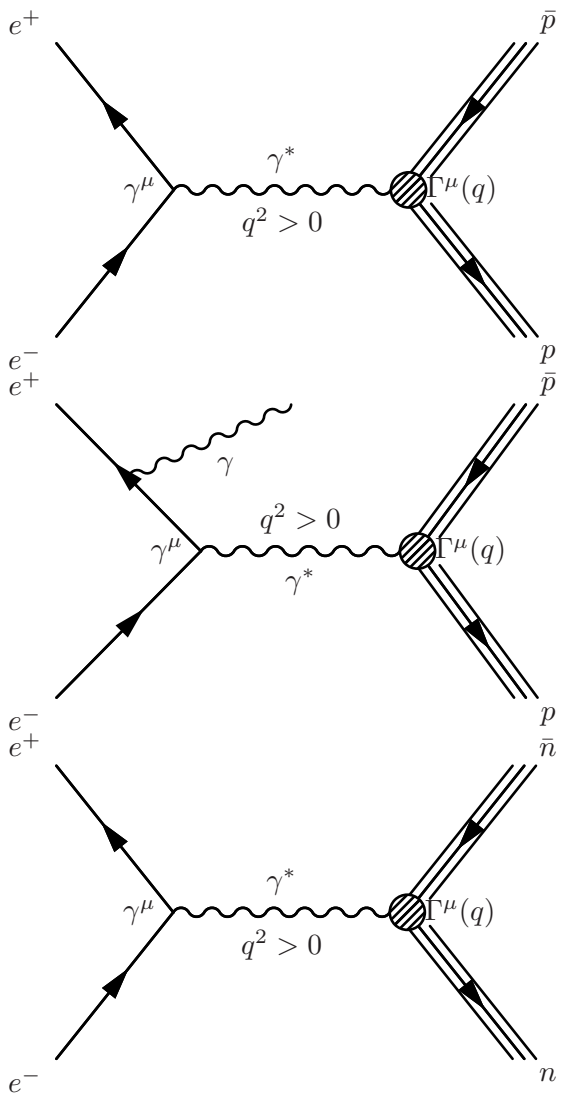
1 研究背景
- 核子的内部结构
- 形状因子

2 加速器与探测器
- 北京正负电子对撞机（BEPCII）
- 北京谱仪（BESIII）

3 核子形状因子的最新结果
- 质子形状因子
- 中子形状因子

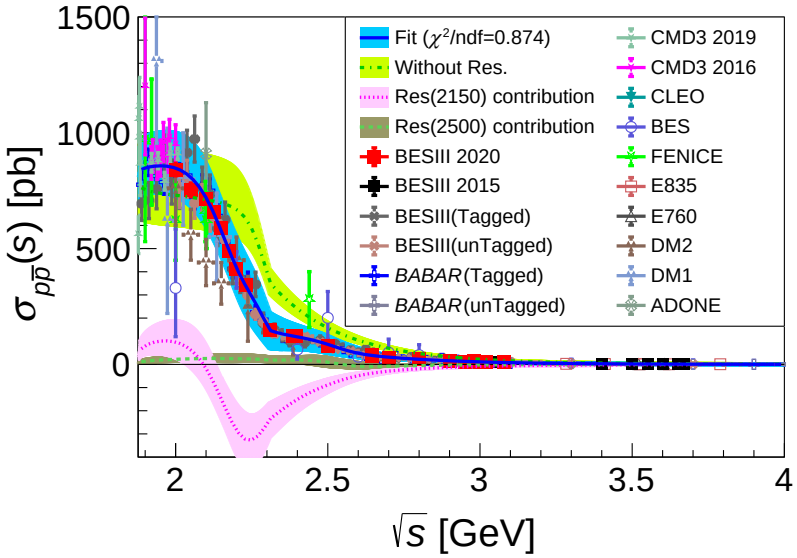
4 超子形状因子的最新结果
- Λ 形状因子及其相位
- Σ 形状因子
- Ξ 形状因子
- Λ_c 形状因子

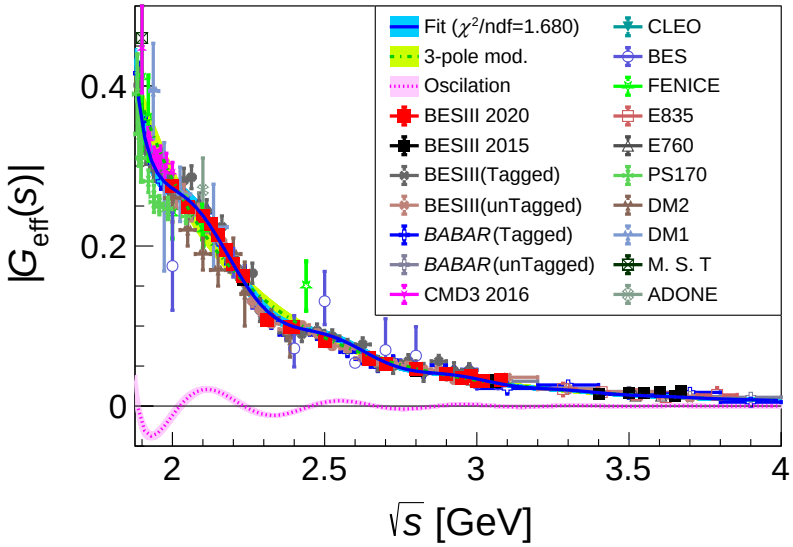
5 总结与展望



质子形状因子：能量扫描法

M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PRL **124**, 042001 (2020)。



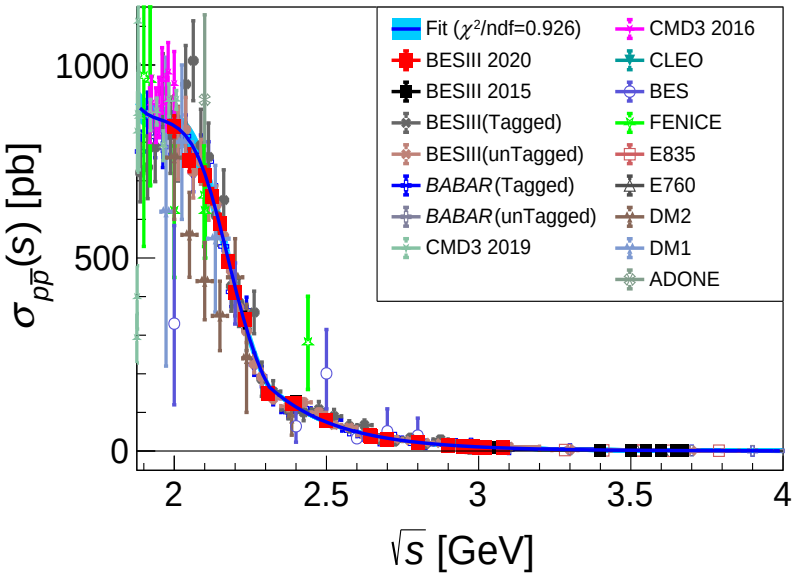


- 能量扫描法利用 688 pb^{-1}，2.00~3.08 GeV 的 22 个能量点的数据，对每一个质心能量点的$\sigma_{p\bar{p}}^{\rm Born}$和$|G_{\rm eff}|$进行了迄今最精确测量。
- 2.00~3.08 GeV 是非微扰和微扰的过渡区，没有一个唯象理论可以解释这一能量段的$\sigma_{p\bar{p}}^{\rm Born}$。本实验是在本能量段最精确的结果，是对质子性质的最直观的认识，是最重要的理论输入。
  - 引入库伦修正因子以描述末态 $p\bar{p}$ 的库伦相互作用，通过在库伦修正因子中引入强相互作用耦合，可以解释$\sigma_{p\bar{p}}^{\rm Born}$的性质。
  - 靠近阈值根据$|G_{\rm eff}|$渐近行为的有效场论，提出的 $\sigma^{\rm Born}$ 引入了对于强相互作用的胶子交换的考虑，成功地解释了$\sigma_{p\bar{p}}^{\rm Born}$的性质。

质子形状因子：能量扫描法

- Rinaldo 模型（O. P. Solovtsova and Yu. D. Chernichenko, Phys. Atom. Nucl. **73**, 1612 (2010)），Bianconi 模型（A. Bianconi *et al.*, PRL **114**, 232301 (2015)）拟合 σ^{Born}：

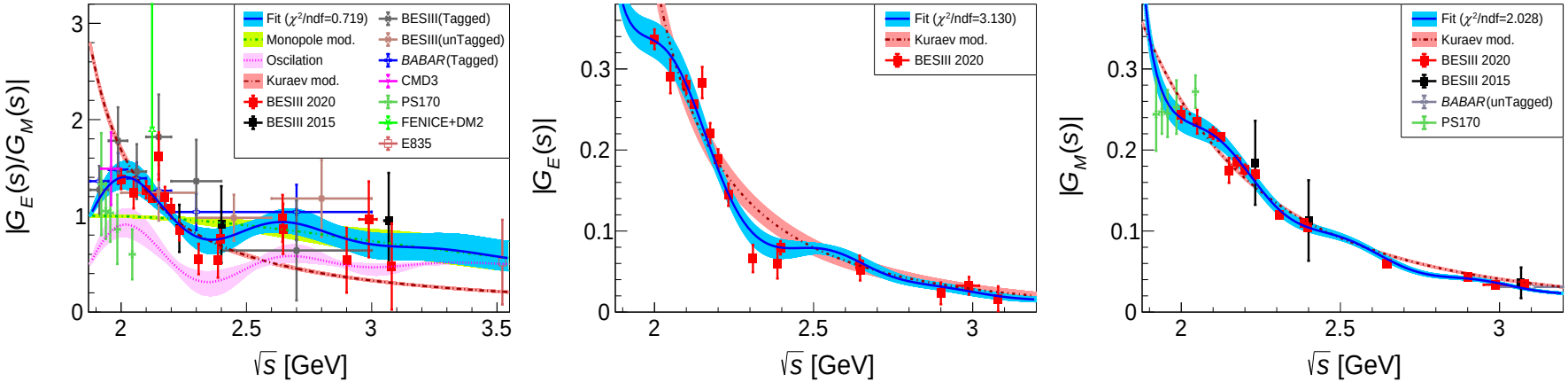
$$\sigma_{p\bar{p}}(s) = \begin{cases} \dfrac{e^{a_c}\pi^2\alpha^3}{s\left[1-e^{-\frac{\pi\alpha_s(s)}{\beta(s)}}\right]\left[1+\left(\frac{\sqrt{s}-2m_pc^2}{a_0}\right)^{a_1}\right]}, & \sqrt{s}\le 2.3094\ \text{GeV}, \\ \dfrac{2\pi\alpha^2\beta(s)C\left[2+\left(\frac{2m_pc^2}{\sqrt{s}}\right)^2\right]e^{2a_2}}{3s^5\left[4\ln^2\left(\frac{\sqrt{s}}{a_0}\right)+\pi^2\right]^2}, & \sqrt{s}>2.3094\ \text{GeV}, \end{cases}$$



- Rinaldo 模型考虑了接近阈值的强相互作用；
  - ✓ a_0：QCD 尺度因子 Λ_{QCD}；
  - ✓ a_1：与价夸克数目相关的衰减指数；
  - ✓ a_2：定标因子。
- Bianconi 模型是大 q^2 转移的pQCD模型。

质子形状因子：能量扫描法

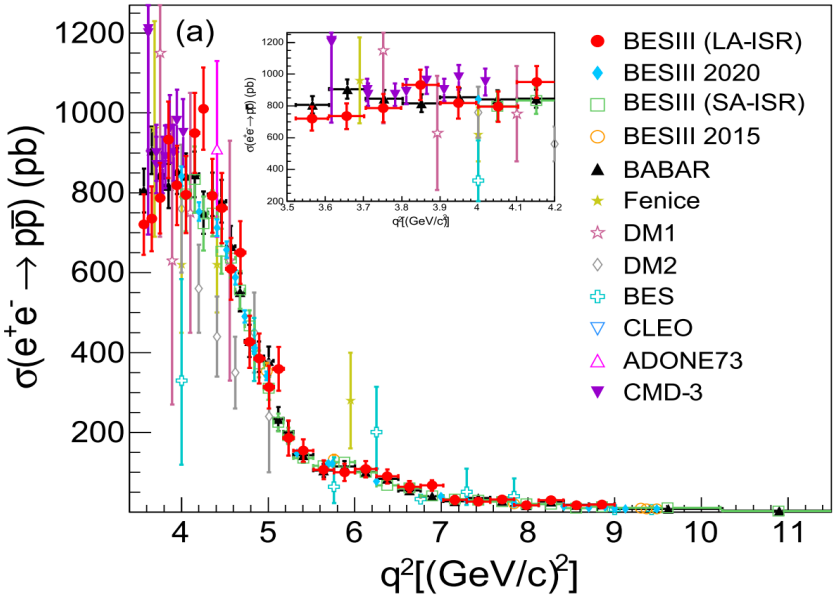
M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PRL **124**, 042001 (2020),
M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PRD **91**, 112004 (2015)。

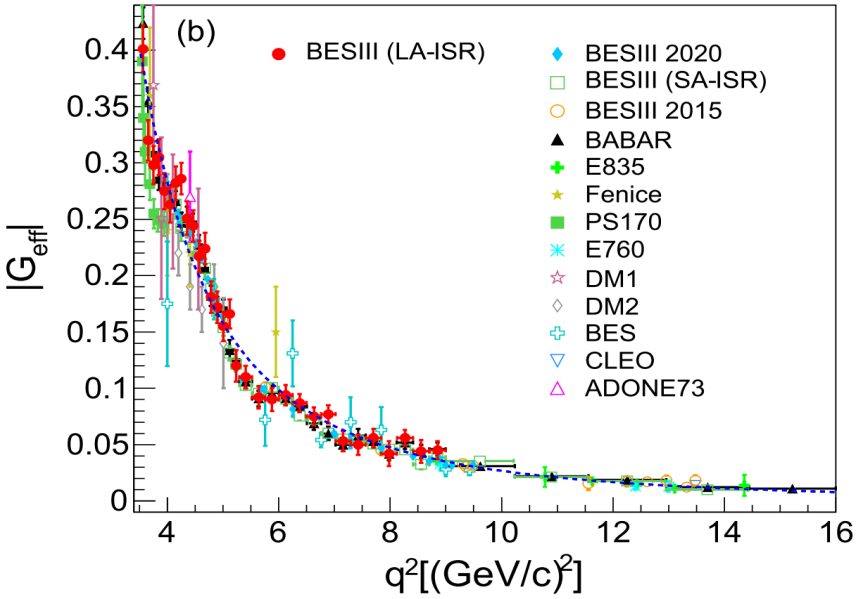


- 质子 $|G_E/G_M|$ 最佳精度在 3.5%，给出了精度可以和SL相媲美的结果。
- $|G_E|$ 和 $|G_M|$ 首次可以分离测量。
- $|G_E|$ 是历史上首次测量。
- 相比于 PS170（G. Bardin *et al.* (PS170 Collaboration), Nucl. Phys. **B411** 3 (1994)），我们给出的结果与 *BABAR* 实验组的结果（J. P. Lee *et al.* (*BABAR* Collaboration), PRD **87**, 092005 (2013)）更为接近。解决了TL研究的长期困扰。

质子形状因子：初态辐射法

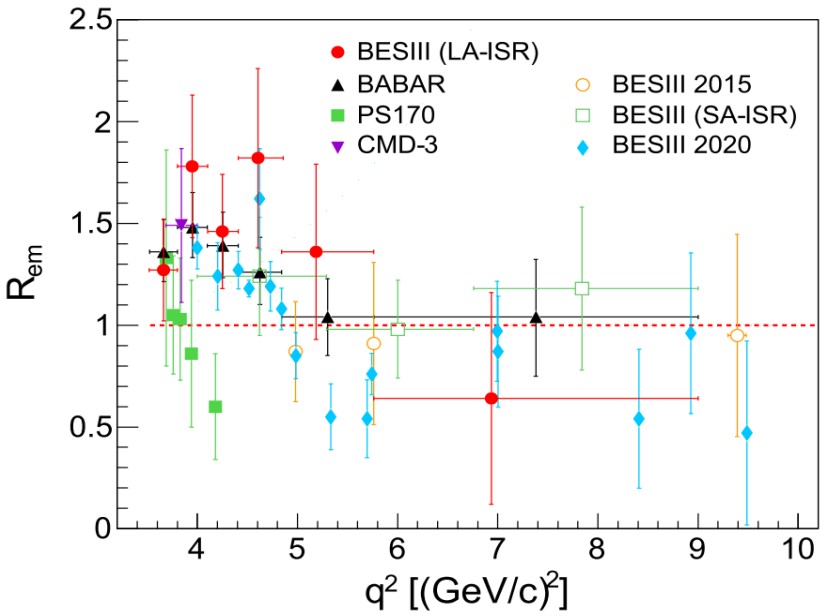
M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PRD **99**, 092002 (2019),
M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PLB **817**, 136328 (2021)。





- 利用 7.5 fb^{-1} 的数据，使用ISR 方法，包括标记光子法和未标记光子法，进行质子电磁形状因子（EMFF）测量。
- 相比于能量扫描法，ISR 方法在较大的 q^2 范围进行EMFF测量。
- 结果和能量扫描法相符合。
- 从阈值到 $q^2 = 4.0$ GeV^2，平均 σ^{Born} 在 840 pb 左右。
- 阈值附近点状粒子假设下 σ^{Born}：$\sigma_{\text{point}} = \frac{4\pi\alpha^2}{3s}[1+\frac{2m^2}{s}] = 845$ pb。

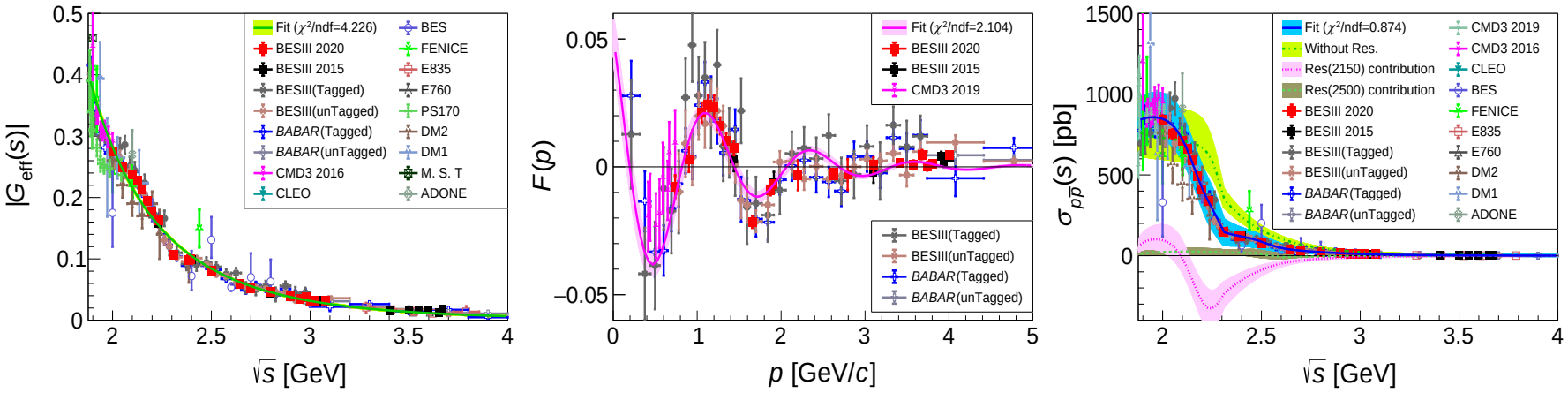
质子形状因子：初态辐射法



- $|G_E/G_M|$ 测量精度：
  - *BABAR*：10.8%∼15.4%；
  - BESIII：18.1%∼27.2%。
- $|G_E/G_M|$ 从 $p\bar{p}$ 阈值到 3 GeV/c^2 提取。
- 与能量扫描法测量的结果互相佐证。
- 需要更多的数据提高精度。

$M_{p\bar{p}}^{inv}$ [GeV/c^2]	N_{obs}	$\frac{\Delta N_{obs}}{N_{obs}}$	$\frac{\Delta\lvert G_E/G_M\rvert}{\lvert G_E/G_M\rvert}$	比较	实验
2.025 ∼ 2.100	1328	2.74%	10.79%	3.9	*BABAR* LA-ISR
2.025 ∼ 2.100	560	4.23%	18.49%	4.4	BESIII LA-ISR
2.0 ∼ 2.3	4283	1.53%	∼ 23.39%	...	BESIII SA-ISR
2.125	50312	0.45%	3.39%	7.6	BESIII Scan
1.92 ∼ 2.00	2577	1.97%	15.44%	7.8	CMD-3 (combined)

质子形状因子：振荡行为



- $|G_{\rm eff}|$ 中的周期性行为由 *BABAR* 实验观察到（A. Bianconi *et al.*, PRL **114**, 232301 (2015)），由 BESIII 实验确定。
- 拟合 $|G_{\rm eff}|$（E. Tomasi-Gustafsson *et al.*, PLB **504**, 291 (2001)）：

$$|G_{\rm eff}(s)| = \frac{\mathcal{A}}{(1+\frac{s}{m_a^2})[1-\frac{s}{0.71\ ({\rm GeV}/c)^2}]^2},$$

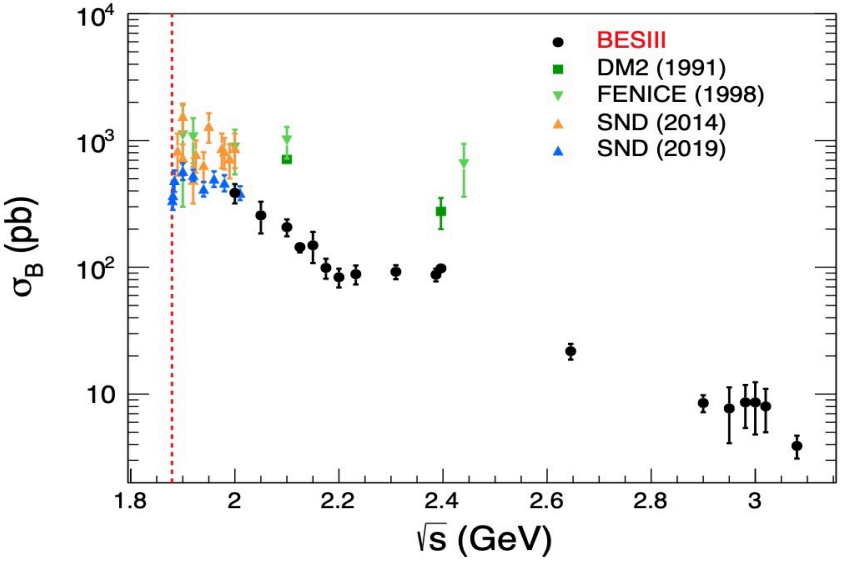
- 振荡模型拟合 $|G_{\rm eff}|$ 的残差（A. Bianconi *et al.*, PRC **93**, 035201 (2016)）：

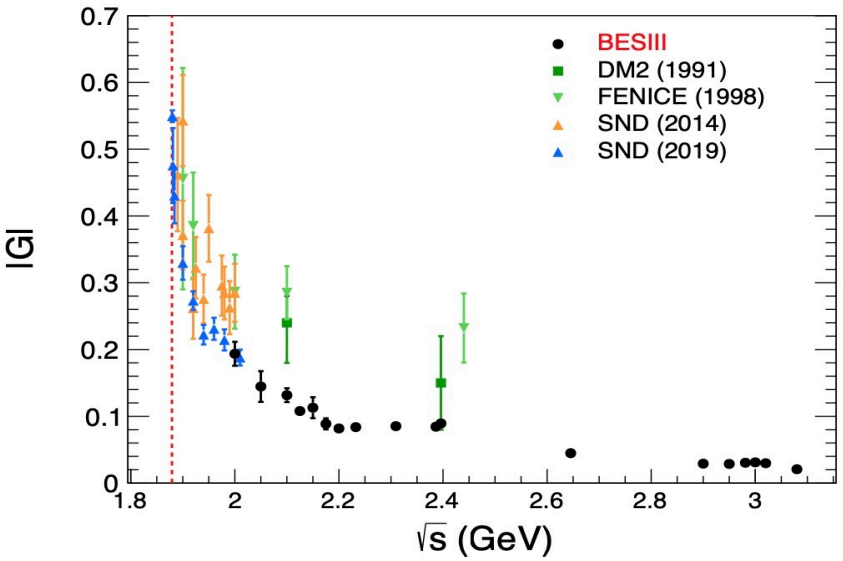
$$F(p) = b_0^{\rm osc} e^{-b_1^{\rm osc} p} \cos(b_2^{\rm osc} p + b_3^{\rm osc}).$$

- 对于振荡效应的解释：
  - 末态再散射的干涉效应；
  - 可能的共振态。

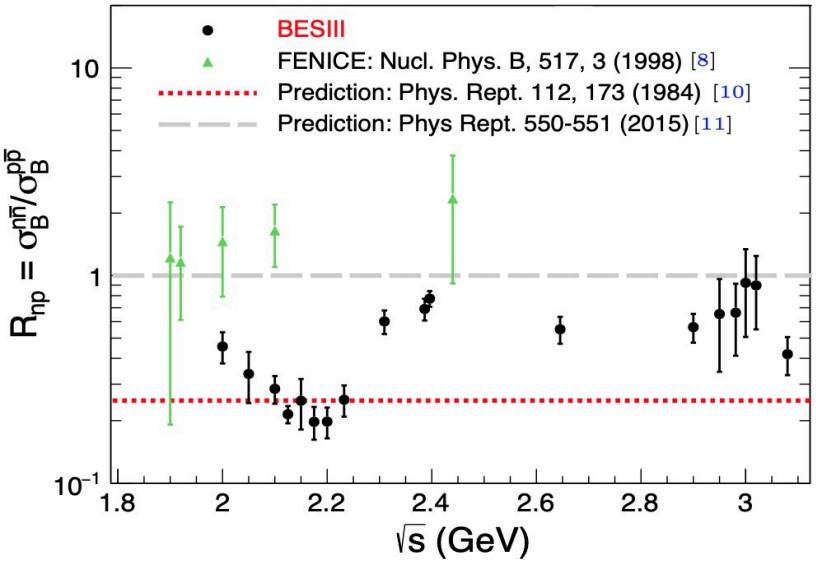
中子形状因子

M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), Nat. Phys. **17**, 1200 (2021).

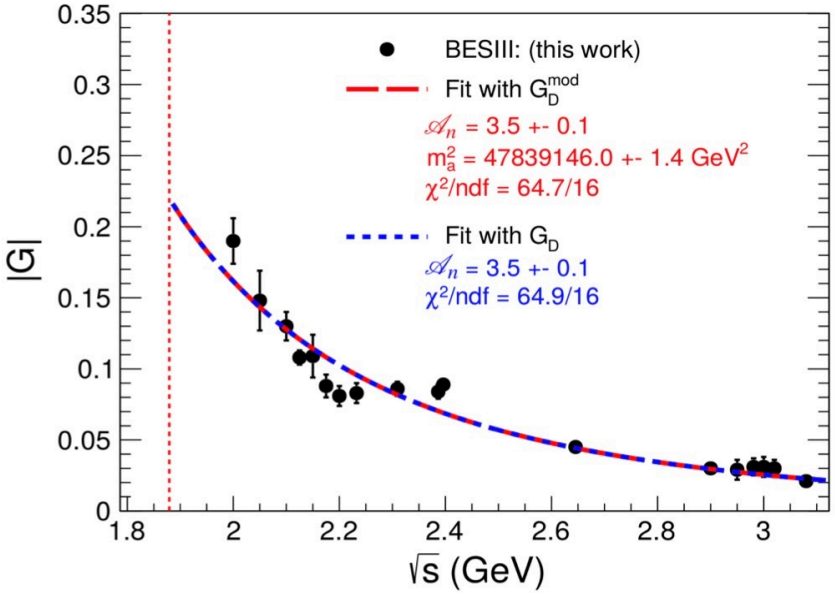


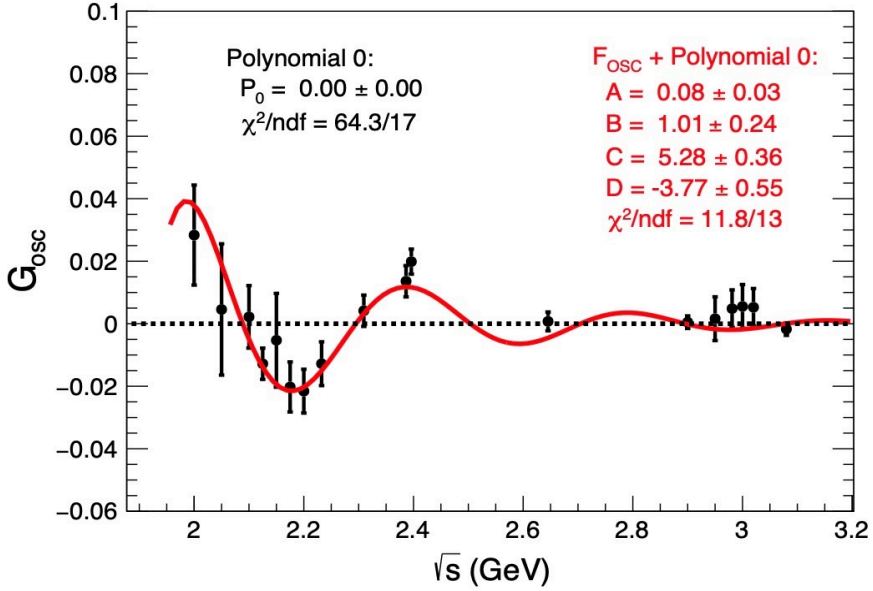


- 能量扫描法，利用 647.9 pb^{-1}，2.00~3.08 GeV 的 18 个能量点的数据，对每一个质心能量点的$\sigma_{n\bar{n}}$和$|G_{\rm eff}|$进行了迄今最精确测量。
- 验证了“光子-中子”的耦合强于于“光子-质子”耦合的“谜题”（V. L Chernyak *et al.*, Phys. Rept. **112**, 173 (1984)）：$\sigma^{\rm Born}_{B\bar{B}} \propto |\sum_{q\in B} Q_q a^B_q(s)|$，$\frac{\sigma^{\rm Born}_{p\bar{p}}}{\sigma^{\rm Born}_{n\bar{n}}} \to \frac{Q_u^2}{Q_d^2} = 4$。

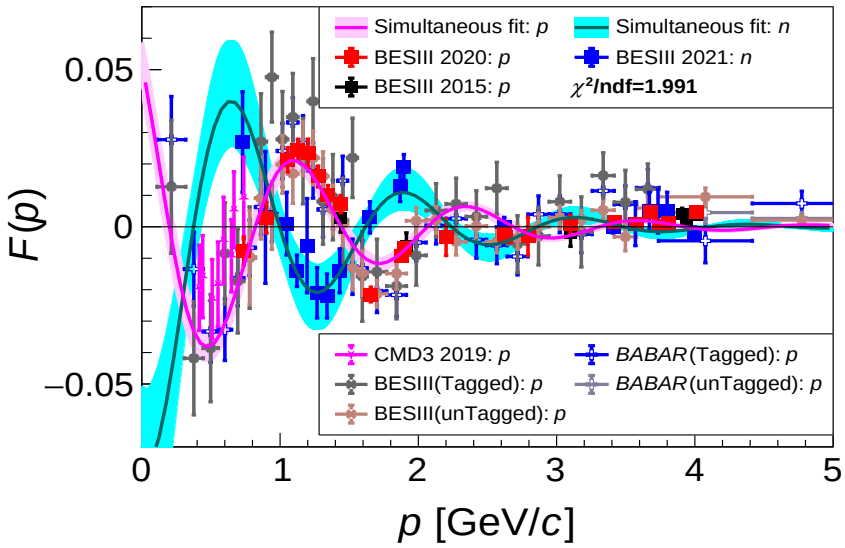


中子形状因子





- 中子的 $|G_{\text{eff}}|$ 也发现了类似的振荡效应。
- 同时拟合质子和中子的 $|G_{\text{eff}}|$，得到共同的周期：$b_2^{\text{osc, shared}} = (5.05^{+0.10}_{-0.09})\ (\text{GeV}/c)^{-1}$。
- 接近于正交，最大相位角为：$\Delta b_3^{\text{osc}} = |b_{3(p)}^{\text{osc}} - b_{3(n)}^{\text{osc}}| = (129^{+11}_{-10})^\circ$。



超子形状因子的最新结果

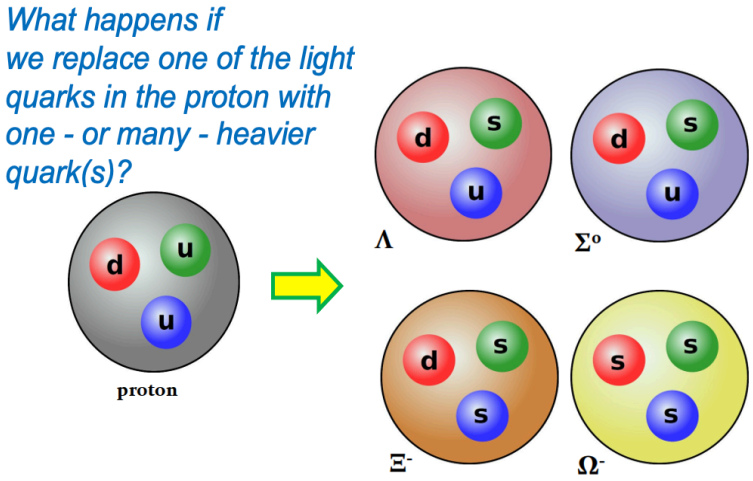
1 研究背景
- 核子的内部结构
- 形状因子

2 加速器与探测器
- 北京正负电子对撞机（BEPCII）
- 北京谱仪（BESIII）

3 核子形状因子的最新结果
- 质子形状因子
- 中子形状因子

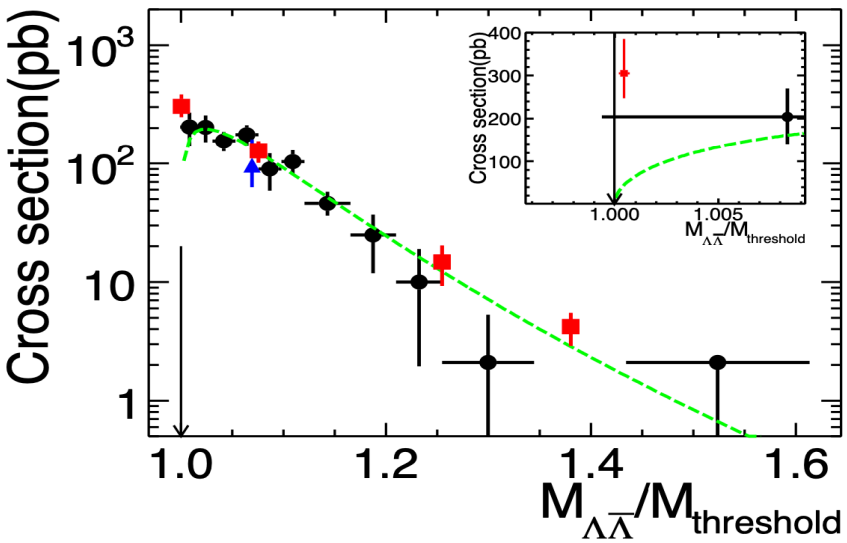
4 超子形状因子的最新结果
- Λ 形状因子及其相位
- Σ 形状因子
- Ξ 形状因子
- Λ_c 形状因子

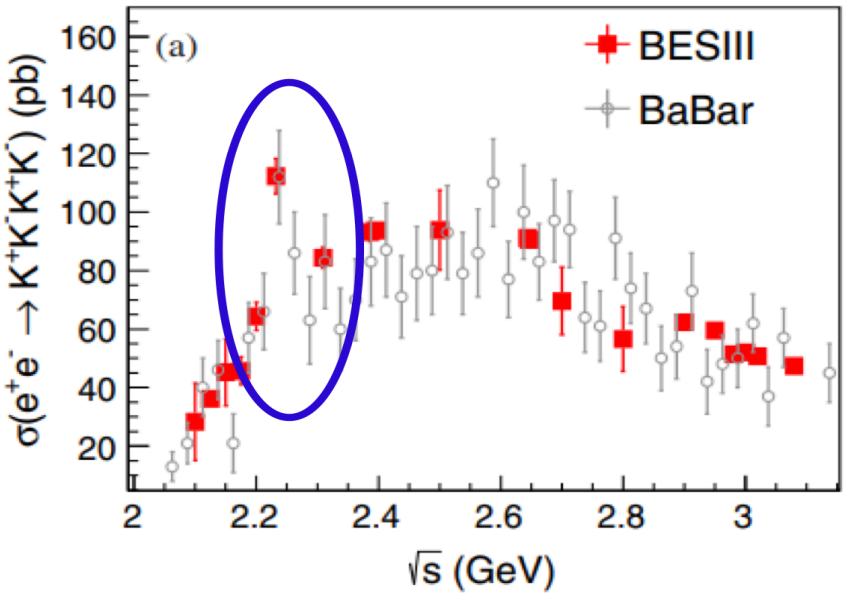
5 总结与展望



$e^+e^- \to \Lambda\bar{\Lambda}$

M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PRD **97**, 032013 (2018),
M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PRD **100**, 032009 (2019)。

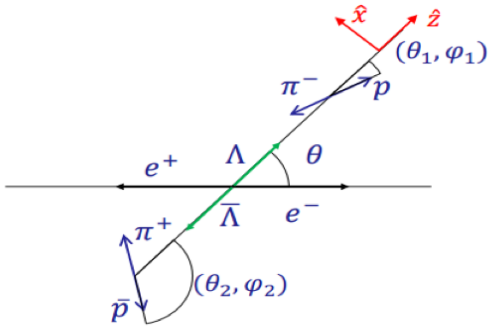




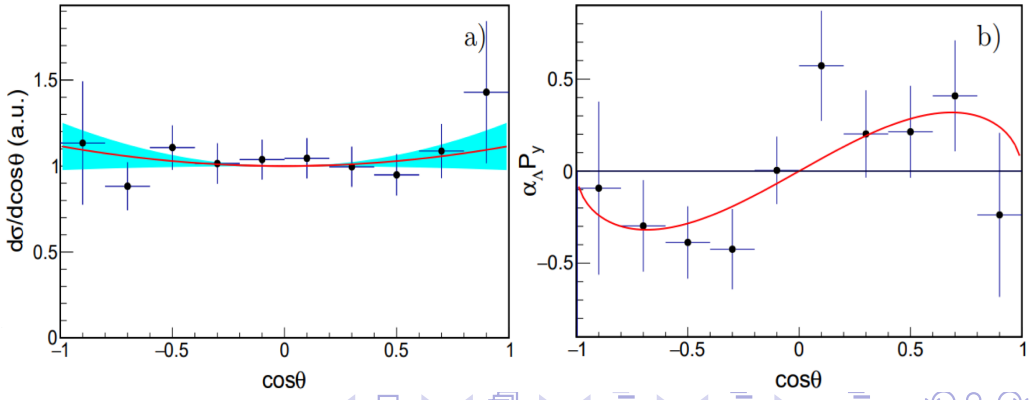
- 观察到阈值附近 σ^{Born} 反常于 pQCD 的预测的行为。
- 在 $e^+e^- \to K^+K^-K^+K^-$ 的 σ^{Born} $\Lambda\bar{\Lambda}$ 阈值附近得到共振结构的迹象。
  - $m_R = 2232 \pm 3.5$ MeV;
  - $\Gamma_R < 20$ MeV;

Λ 电磁形状因子的复数形式

M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PRL **123**, 122003 (2019)。



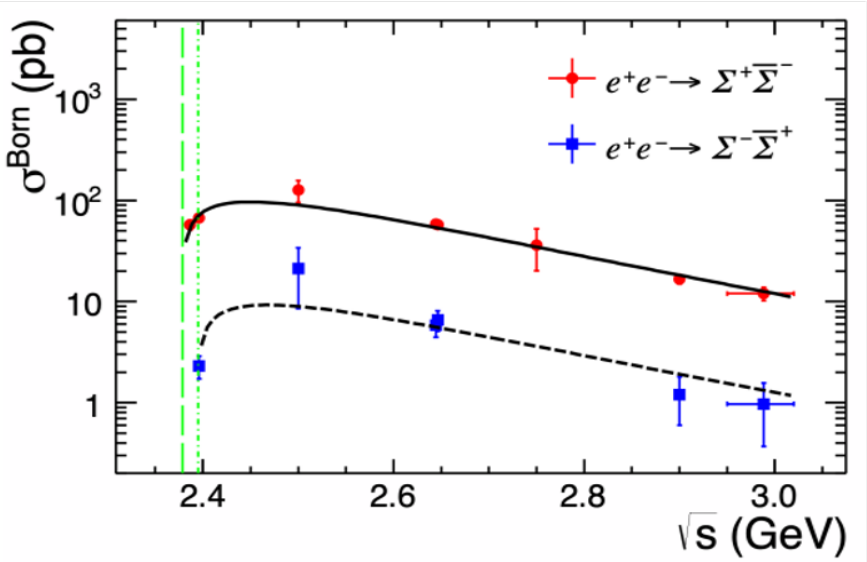
- EMFFs 的复数形式：
  - $G_E = |G_E|e^{i\phi_E}$, $G_M = |G_M|e^{i\phi_M}$
  - 相对相位：$\Delta\phi = \phi_E - \phi_M$。
- 非零相位对于重子有极化效应：$P_y \propto \sin\Delta\phi$。
- 超子弱衰变到 $B+P$，可以测量超子极化，也可以测量 G_E 和 G_M 之间的相位！
- 来自超子弱衰变的重子角分布为：
  - $\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto 1 + \alpha_\Lambda \mathbf{P_y} \cdot \hat{\mathbf{q}}$,
  - α_Λ：不对称参数；
  - $\hat{\mathbf{q}}$：超子静止系中沿重子的单位矢量。
- $|G_E/G_M|$ =0.94±0.16 ±0.03±0.02, $\Delta\phi$=42°±16°±8°±6°.



$e^+e^- \to \Sigma^+\bar{\Sigma}^-$ 和 $e^+e^- \to \Sigma^-\bar{\Sigma}^+$

M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PLB **814**, 136110 (2021)。

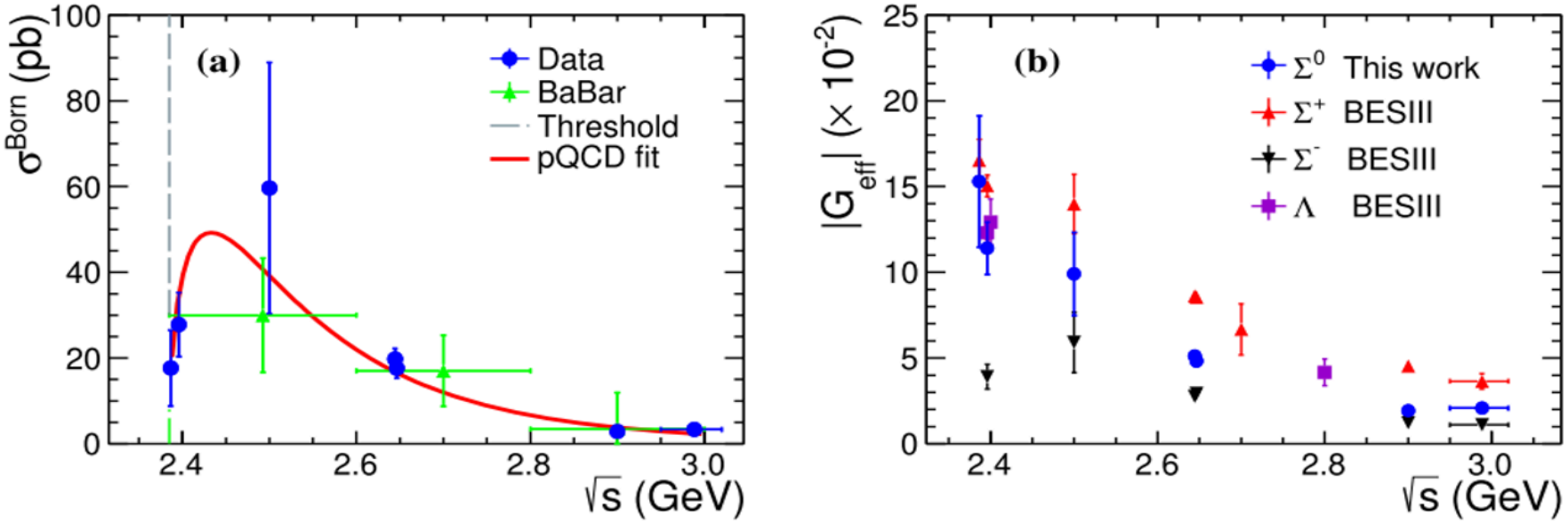
- $e^+e^- \to \Sigma^+\bar{\Sigma}^-$ 和 $e^+e^- \to \Sigma^-\bar{\Sigma}^+$ $\sigma^{\rm Born}$ 的研究：
  - 能量范围：$\sqrt{s} = 2.3864 \sim 3.0200$ GeV，330 pb^{-1}；
  - 在阈值附近观察到非零截面，但没有显著增强；
  - 接近阈值的 $\sigma^{\rm Born}$ 与质子所观测到的点状预期不一致；
  - 首次测量非共振区的 $\sigma^{\rm Born}$，为理解重子结构提供精准的实验输入。
- Σ^+ 的 $|G_E/G_M|$ 通过研究三个高统计量点的角分布首次确定；
- $|G_E/G_M| = 1.83 \pm 0.26$ 在阈值显著高于 1，和 p, Λ 类似；
- 在高能区趋近于 1。
- $\dfrac{\sigma^{\rm Born}_{e^+e^-\to\Sigma^+\bar{\Sigma}^-}}{\sigma^{\rm Born}_{e^+e^-\to\Sigma^-\bar{\Sigma}^+}} = 9.7 \pm 1.3$。



- 与下列理论模型不符合：
  V .L. Chernyak *et al.*, Phys. Rept **112**, 173 (1984)，V. L. Chernyak *et al.*, Z. Phys. C **42**, 569 (1989)，M. Anselmino *et al.*, RMP **65**, 1199 (1993)，R. Jaffe *et al.*, PRL **91**, 232003 (2003)，R. L. Jaffe, Phys. Rept **409**, 1 (2005)。
- 与下列理论模型符合：
  G. Ramalho *et al.*, PRD **101**, 014014 (2020)。

$e^+e^- \to \Sigma^0\bar{\Sigma}^0$

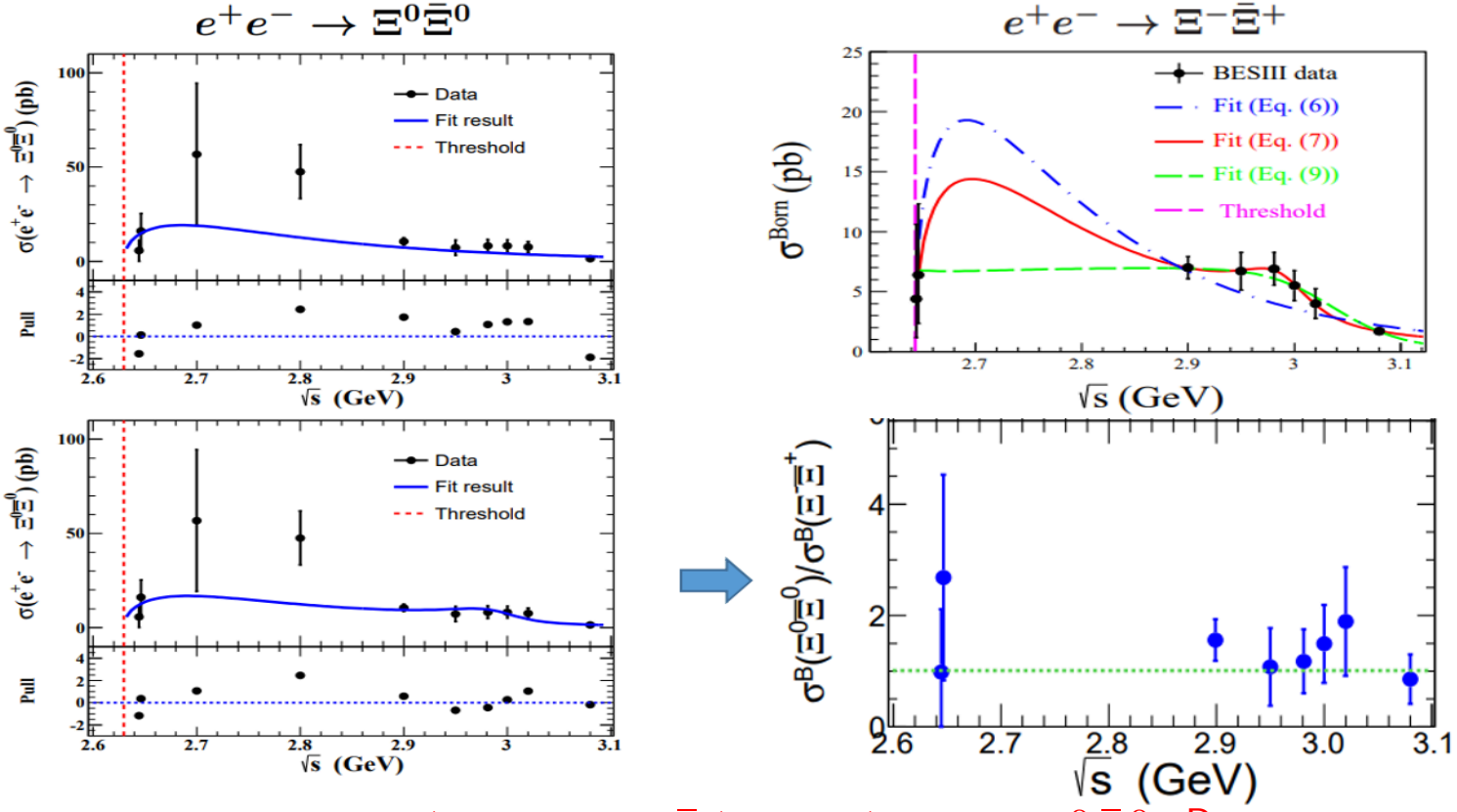
M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PLB **831**, 137187 (2022)。



- $e^+e^- \to \Sigma^0\bar{\Sigma}^0\sigma^{Born}$ 的研究：
  - 能量范围：$\sqrt{s} = 2.3864 \sim 3.0200$ GeV，329 pb^{-1}；
  - 在在阈值附近的$\sqrt{s} = 2.3864$ 和 2.3960 GeV 使用了新方法；
  - 没有观察到类似于$e^+e^- \to \Sigma^\pm\bar{\Sigma}^\mp$的显着阈值效应；
  - 在$\sqrt{s} = 2.3960 \sim 3.0200$ GeV使用了单标方法；
  - 结果与*BABAR* 符合得很好，精度显着提高；
  - 观察到 Σ 三重态的 $|G_{eff}|$ 的不对称性；
  - 为 $|G_{eff}|$ 结果提供实验输入：$Y\bar{Y}$势模型，以及对 di-quark 相关性的理解。

$e^+e^- \to \Xi^-\bar{\Xi}^+$ 和 $e^+e^- \to \Xi^0\bar{\Xi}^0$

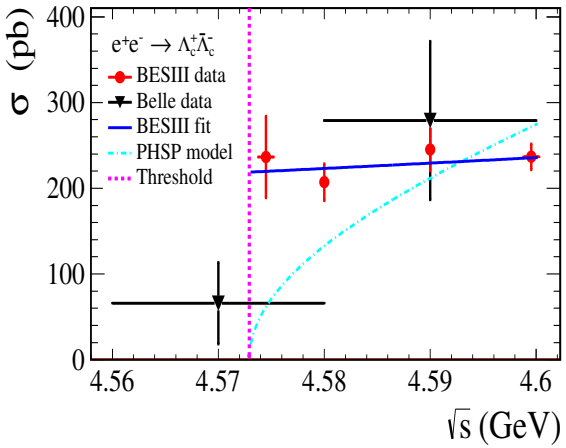
M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PRD **103**, 012005 (2021),
M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PLB **820**, 136557 (2021)。

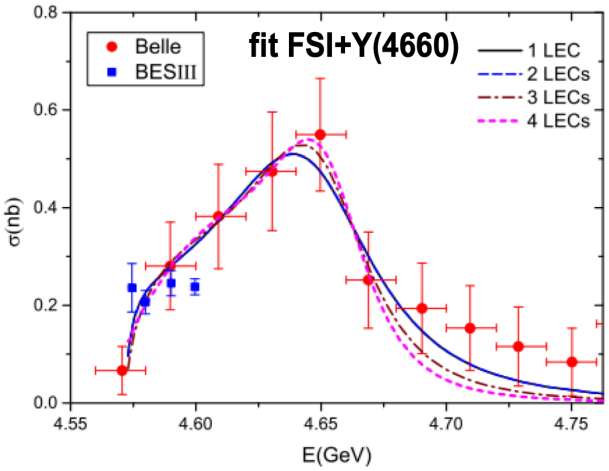


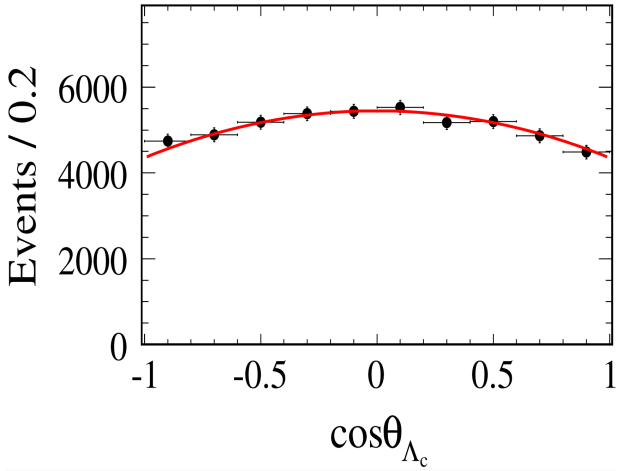
- 首次在近阈对 $e^+e^- \to \Xi^-\bar{\Xi}^+$ 和 $e^+e^- \to \Xi^0\bar{\Xi}^0$ σ^{Born} 的研究：
  - 能量范围：$\sqrt{s} = 2.6444 \sim 3.0800$ GeV，360 pb^{-1}；
- 没有观察到明显的 $\Xi^-\bar{\Xi}^+$ 和 $\Xi^0\bar{\Xi}^0$ 过程的阈值增强。
- 中性道和带电道的σ^{Born} 之比和同位旋对称的预期一致。

Λ_c 形状因子

M. Ablikim *et al.* (BESIII collaboration), PRL **120**, 132001 (2018)。







- BESIII 的测量结果表明在 $e^+e^- \to \Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$ 的阈值附近的 σ^{Born} 存在陡峭上升，和 $e^+e^- \to p\bar{p}$ 过程类似。
- 很难同时拟合 BESIII 和 Belle 的结果（L. Y. Dai *et al.*, PRD **96**, 116001 (2017)）。

$\sqrt{s}$ [GeV]	$\alpha_{\Lambda_c^+}$	$\lvert G_E/G_M\rvert$
4.5475	$-0.13 \pm 0.12 \pm 0.08$	$1.14 \pm 0.14 \pm 0.07$
4.5995	$-0.20 \pm 0.04 \pm 0.02$	$1.23 \pm 0.05 \pm 0.03$

- Λ_c^+ 的 $|G_E/G_M|$ 是历史首次测量。
  - $|G_E/G_M|$ 近阈趋近于 1。

研究背景
核子的内部结构
形状因子
加速器与探测器
BEPCII
BESIII
核子形状因子
质子形状因子
能量扫描法
初态辐射法
中子形状因子
超子形状因子
Λ 形状因子
Σ 形状因子
Σ^+ 和 Σ^- 的形状因子
Σ^0 形状因子
Ξ 形状因子
Λ_c 形状因子
总结与展望

总结与展望

1 研究背景
- 核子的内部结构
- 形状因子

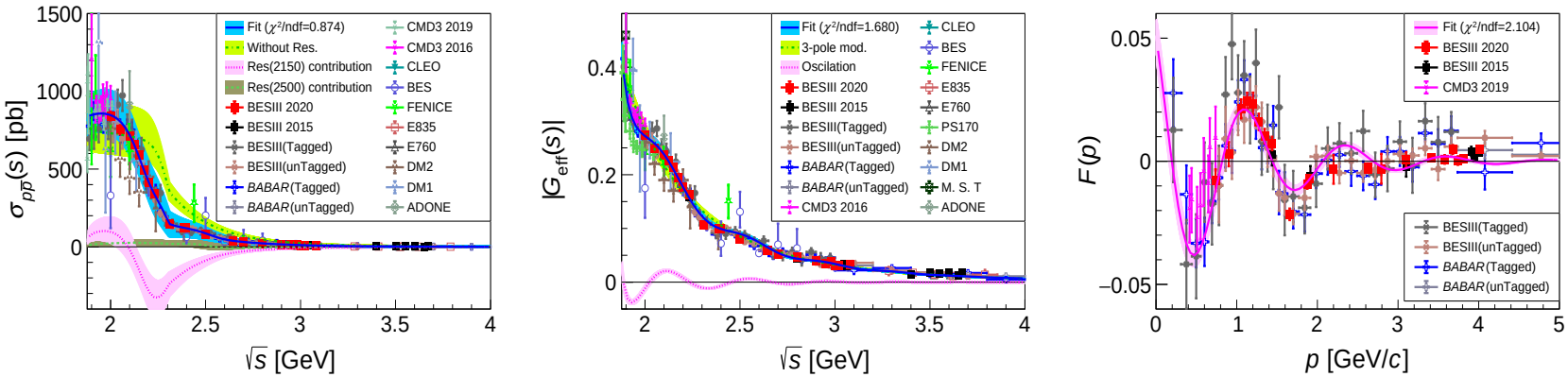
2 加速器与探测器
- 北京正负电子对撞机（BEPCII）
- 北京谱仪（BESIII）

3 核子形状因子的最新结果
- 质子形状因子
- 中子形状因子

4 超子形状因子的最新结果
- Λ 形状因子及其相位
- Σ 形状因子
- Ξ 形状因子
- Λ_c 形状因子

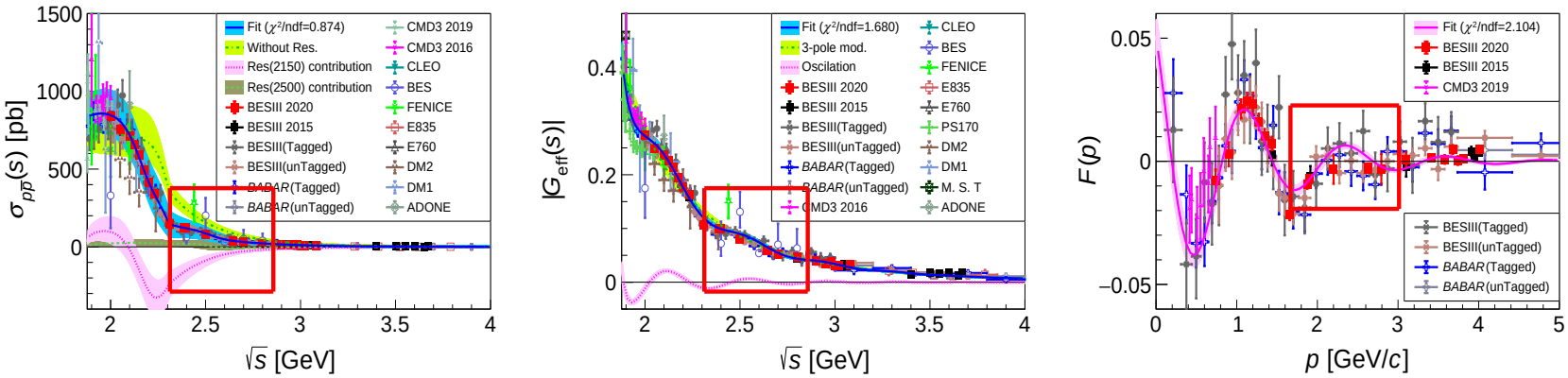
5 总结与展望

截面谱形的理论影响



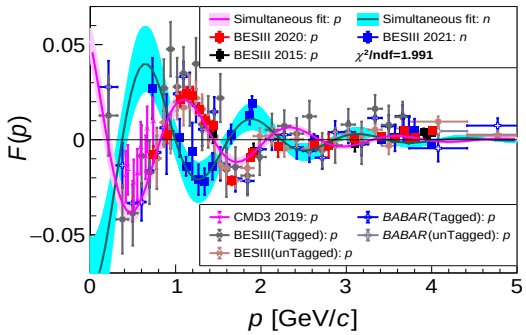
- BESIII 对质子(能量扫描+ISR)中子(能量扫描)的$\sigma_{N\bar{N}}^{\text{Born}}$，和$|G_{\text{eff}}|$进行了迄今最精确测量。
- 2.00~3.08 GeV 是非微扰和微扰的过渡区，没有一个唯象理论可以解释这一能量段的σ^{Born}。本实验是在本能量段最精确的结果，是对核子性质的最直观的认识，是最重要的理论输入。
  - 引入库伦修正因子以描述末态 $p\bar{p}$ 的库伦相互作用，通过在库伦修正因子中引入强相互作用耦合，可以解释$\sigma_{p\bar{p}}^{\text{Born}}$的性质。
  - 靠近阈值根据$|G_{\text{eff}}|$渐近行为的有效场论，提出的 $\sigma_{p\bar{p}}^{\text{Born}}$ 引入了对于强相互作用的胶子交换的考虑，成功地解释了$\sigma_{p\bar{p}}^{\text{Born}}$的性质。
  - 2.4 GeV附近的 $\sigma_{p\bar{p}}^{\text{Born}}$ 的振荡行为是否预示着一个新的结构？其他的振荡是否也是由未知共振态造成的？(L. Xia *et al.*, Symmetry **14**, 231 (2022))

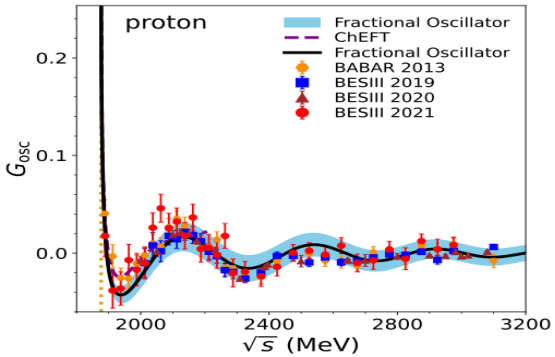
截面谱形的理论影响

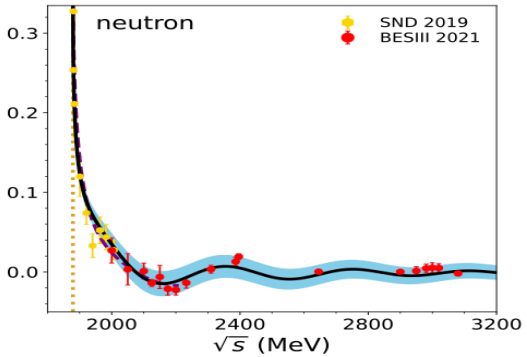


- BESIII 对质子(能量扫描+ISR)中子(能量扫描)的$\sigma_{N\bar{N}}^{\text{Born}}$，和$|G_{\text{eff}}|$进行了迄今最精确测量。
- 2.00~3.08 GeV 是非微扰和微扰的过渡区，没有一个唯象理论可以解释这一能量段的σ^{Born}。本实验是在本能量段最精确的结果，是对核子性质的最直观的认识，是最重要的理论输入。
  - 引入库伦修正因子以描述末态 $p\bar{p}$ 的库伦相互作用，通过在库伦修正因子中引入强相互作用耦合，可以解释$\sigma_{p\bar{p}}^{\text{Born}}$的性质。
  - 靠近阈值根据$|G_{\text{eff}}|$渐近行为的有效场论，提出的 $\sigma_{p\bar{p}}^{\text{Born}}$ 引入了对于强相互作用的胶子交换的考虑，成功地解释了$\sigma_{p\bar{p}}^{\text{Born}}$的性质。
  - 2.4 GeV附近的 $\sigma_{p\bar{p}}^{\text{Born}}$ 的振荡行为是否预示着一个新的结构？其他的振荡是否也是由未知共振态造成的？(L. Xia *et al.*, Symmetry **14**, 231 (2022))

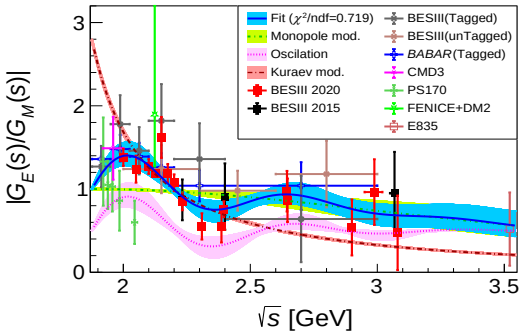
振荡效应的理论跟进

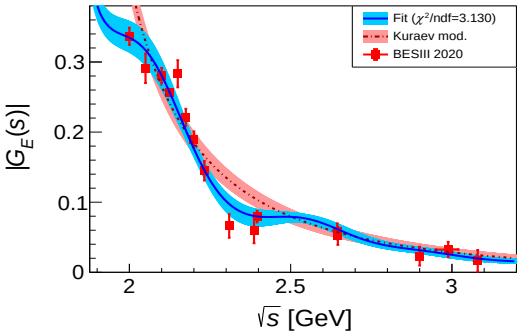


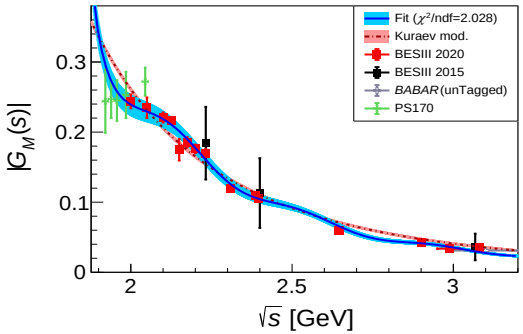




- 对质子中子联合拟合（L. Xia *et al.*, Symmetry **14**, 231 (2022)）：
  - 共同的周期：$b_2^{\text{osc, shared}} = (5.05^{+0.10}_{-0.09})\ (\text{GeV}/c)^{-1}$。
  - 最大相位角为：$\Delta b_3^{\text{osc}} = |b_{3(p)}^{\text{osc}} - b_{3(n)}^{\text{osc}}| = (129^{+11}_{-10})^\circ$。
- 利用扭曲波玻恩近似理论，发现质子中子的振荡每个都可以用一个"过阻尼"并在阈值附近主导的和一个"欠阻尼"的并在高能区发挥作用的分数谐振子描述（Q. H. Yang *et al.*, arXiv: 2206.01494）。

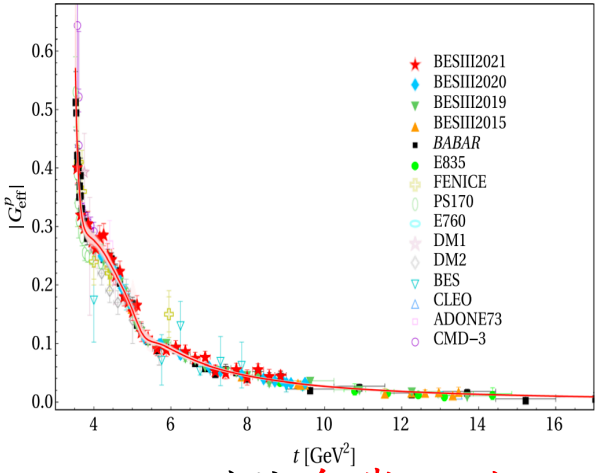


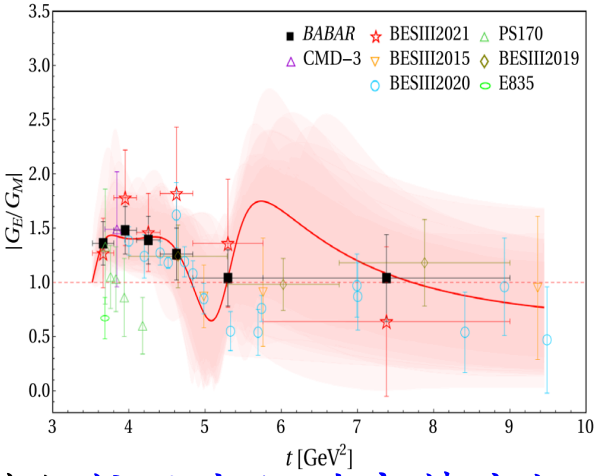


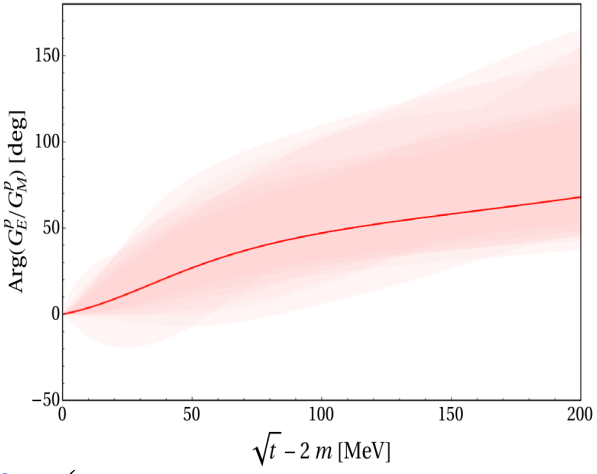


- 将振荡扩展到$|G_E/G_M|$，$|G_E|$和$|G_M|$，进行了周期性行为研究（E. Tomasi-Gustafsson *et al.*, PRD **103**, 035203 (2021)）。

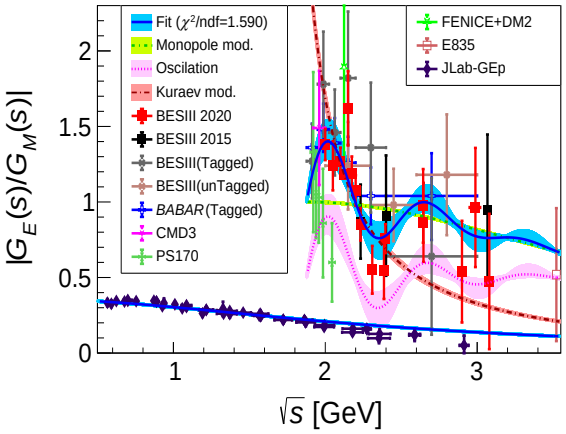
电磁形状因子精确测量的影响与作用

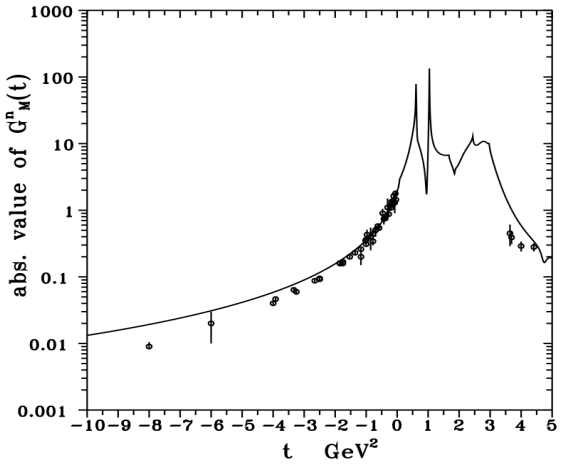






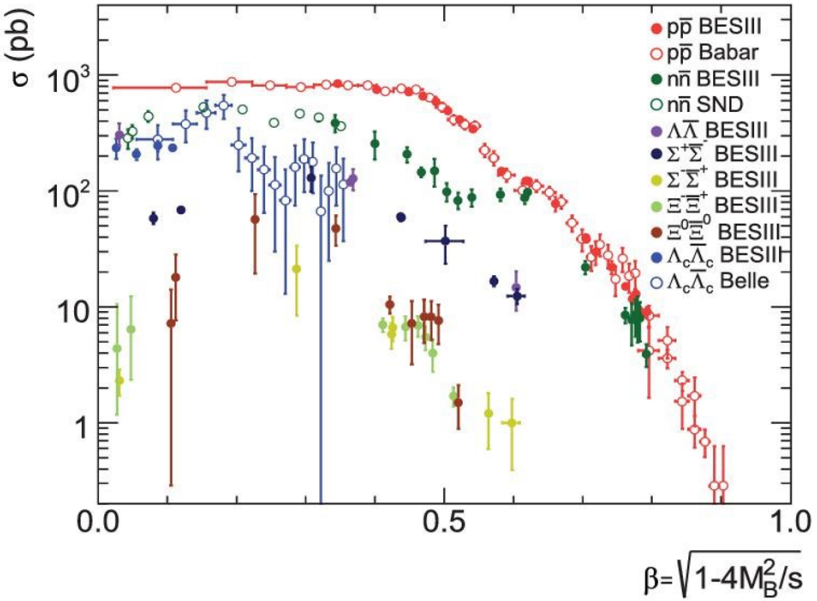
- 测试色散理论，进行核子半径的高精度提取（Y. H. Lin *et al.*, PRL **128**, 052002 (2022)）。
- 联合TL和SL的结果给出质子荷电半径的新约束（M. Yu. Barabanov *et al.*, Prog. Part. Nucl. Phys. **116**, 103835 (2021)，L. Xia *et al.*, Symmetry **14**, 231 (2022)）。





- 验证不同理论模型：手征微扰理论和格点QCD（A. Z. Dubničková *et al.*, EPJA **57**, 307 (2021)，A. Zuzana *et al.*, arXiv: 2010.15872，S. Dubnička *et al.*, arXiv: 2103.08385）。

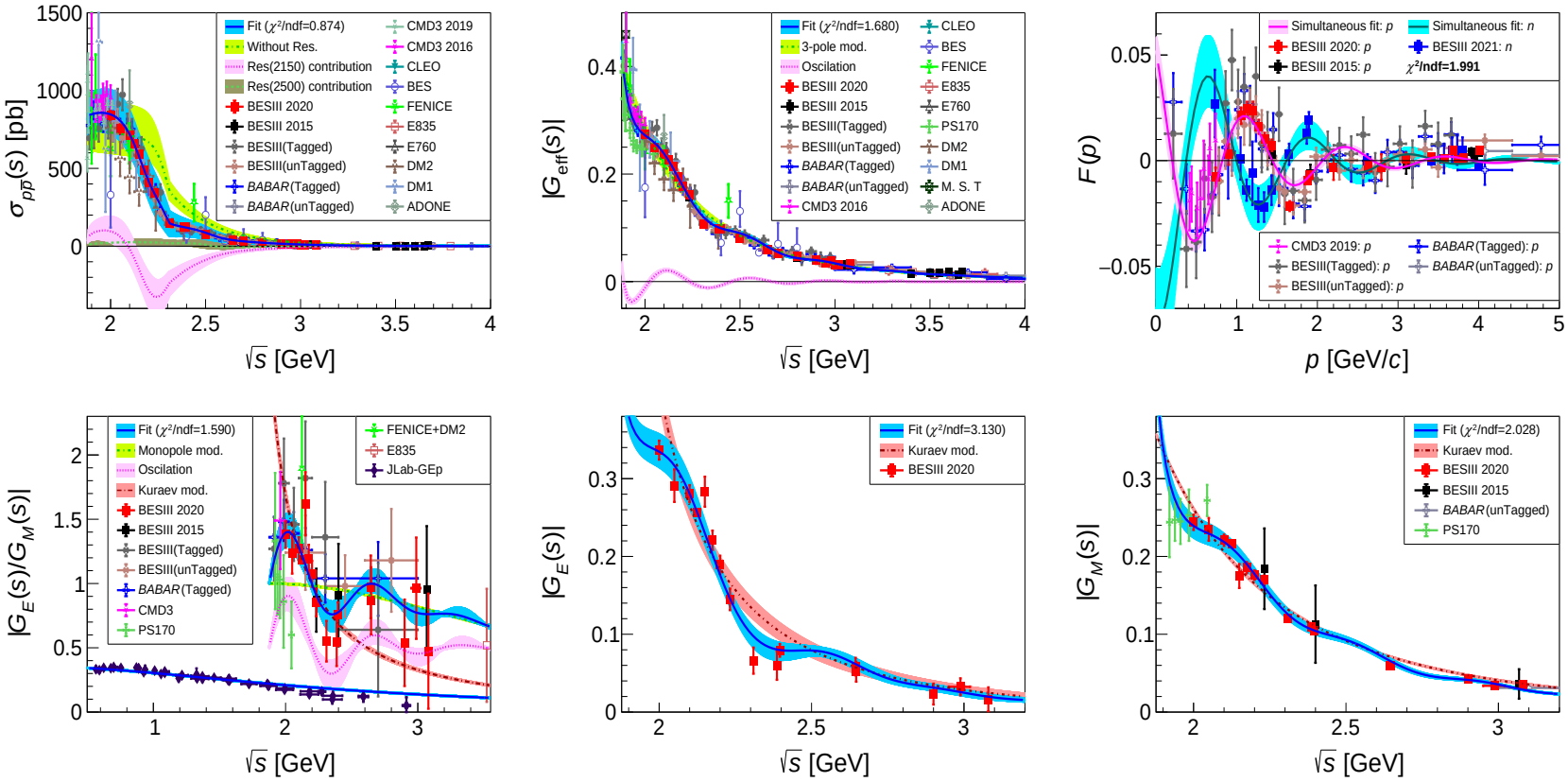
总结



- BESIII 可以精确测量重子 FFs（G. S. Huang *et al.*, NSR **8**, nwab187 (2021)）。
- BESIII 完成了能量扫描法和初态辐射测量核子 EMFFs，结果互补。
- TL的核子 EMFFs精度显著提高。
- 质子中子$|G_{\rm eff}|$的振荡现象被确认。

- ISR 过程（LA）提供了探索 $N\bar{N}$ 近阈区间，并得到整体角分布的方法。
- 研究了超子对产生（$\Lambda\bar{\Lambda}$，$\Sigma\bar{\Sigma}$，$\Xi\bar{\Xi}$，$\Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$），有的（$\Lambda\bar{\Lambda}$，$\Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$）明确地观测到了阈值增强，有的（$\Sigma\bar{\Sigma}$，$\Xi\bar{\Xi}$）并没有明确观测到。
- Λ，Σ^+，Λ_c^+的$|G_E/G_M|$，Λ的 EMFF 的相位被首次测量。
- BESIII 收集了大量数据（$\sim 22\ \mathrm{fb}^{-1}$），用以强子 FFs 研究。
- 核子的$|G_E|$和$|G_M|$，特别是$|G_E/G_M|$在近阈区间（$q^2 < 2.0$ GeV）需要进一步研究。

总结



Thanks for your attention!