



国家重点研发计划大科学装置前沿研究重点  
专项 “BESIII上粲强子、QCD及新物理研究”  
(2020.11.1-2024.10.31)

# 课题3: QCD强子产生研究

黄光顺 胡海明/张建勇 王雄飞

承担单位: 中国科学技术大学  
中国科学院高能物理研究所  
兰州大学

2024.7.20-22, 哈尔滨工程大学



# 提 纲

- 物理意义
- 研究内容
- 研究进展
- 总结

# QCD研究的物理意义

粒子物理标准模型取得了巨大成功！

但还有以下问题有待解决：

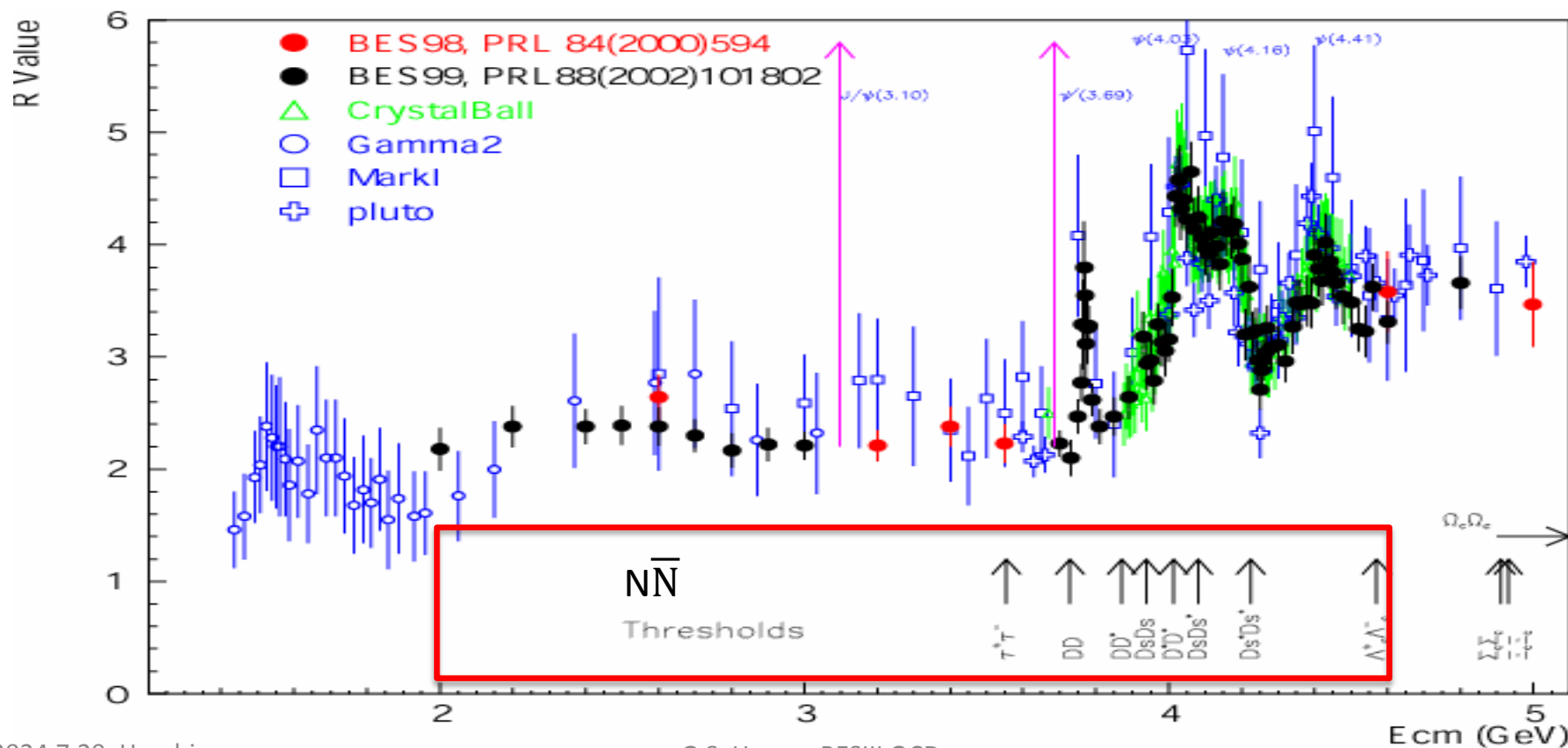
- 标准模型参数精确测量；
- 标准模型精确检验；
- 超越标准模型的新物理探索；
- 标准模型中QCD实验研究。

这些重要的基本问题都与本课题密切相关：

- 电磁跑动耦合常数 $\alpha_{\text{QED}}(s)$ ：电磁相互作用强度随相互作用能量改变规律；
- $\mu$ 子反常磁矩 $(g-2)$ ：检验标准模型最灵敏、最精确的实验和理论预言；
- Higgs粒子：标准模型对Higgs质量(最可几值及上限)的全局拟合；
- 直接检验量子色动力学预言：强相互作用跑动耦合常数 $\alpha_s(s)$ 。

# BEPCII/BESIII能区的独特优势

- 丰富的共振态：粲偶素、XYZ.....
- 众多的产生阈： $\tau$ 轻子、粲介子、(粲)重子；
- 连续与共振、微扰与非微扰QCD的过渡区域；
- 寻找胶球、奇特态、混杂态的理想场所！





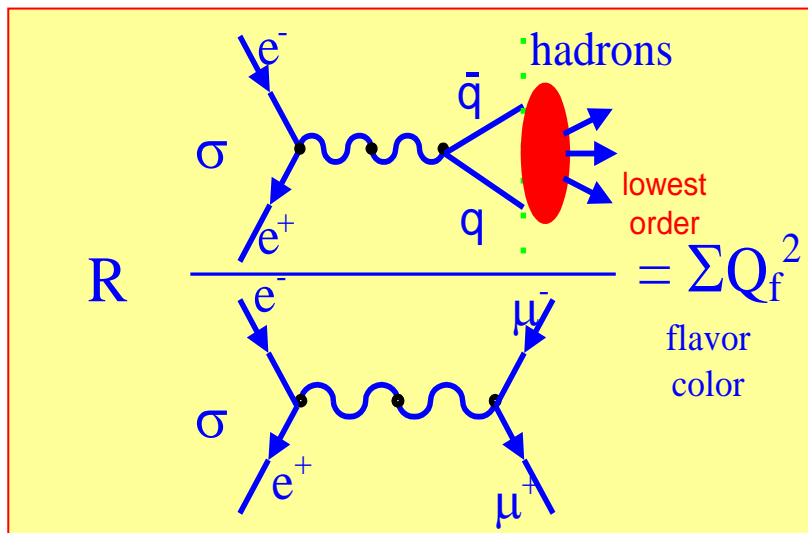
# 研究内容

- 2.0–4.6 GeV R值测量;
- 强子产生及结构实验研究:
  - 重子电磁形状因子测量;
  - 重子对近阈产生研究;
  - 介子电磁形状因子测量;
  - 初态辐射过程截面测量;
- 强子源时空特性研究。

# 北京谱仪R值扫描测量

R值是粒子物理中一个基本物理量。

理论定义：正负电子湮没产生强子总截面（以 $\mu^+\mu^-$ 产生截面为单位）



$$R = 3 \sum_q Q_q^2 \left[ 1 + \left( \frac{\alpha_s(s)}{\pi} \right) + 1.411 \left( \frac{\alpha_s(s)}{\pi} \right)^2 - 12.8 \left( \frac{\alpha_s(s)}{\pi} \right)^3 + \dots \right]$$

实验测量：

$$R = \frac{1}{\sigma_{\mu^+\mu^-}} \cdot \frac{N_{had} - N_{bg}}{L \cdot \epsilon_{had} \cdot (1 + \delta)}$$

$N_{had}$ : 观测到的强子事例数

$N_{bg}$ : 各种本底过程事例数

L: 数据积分亮度

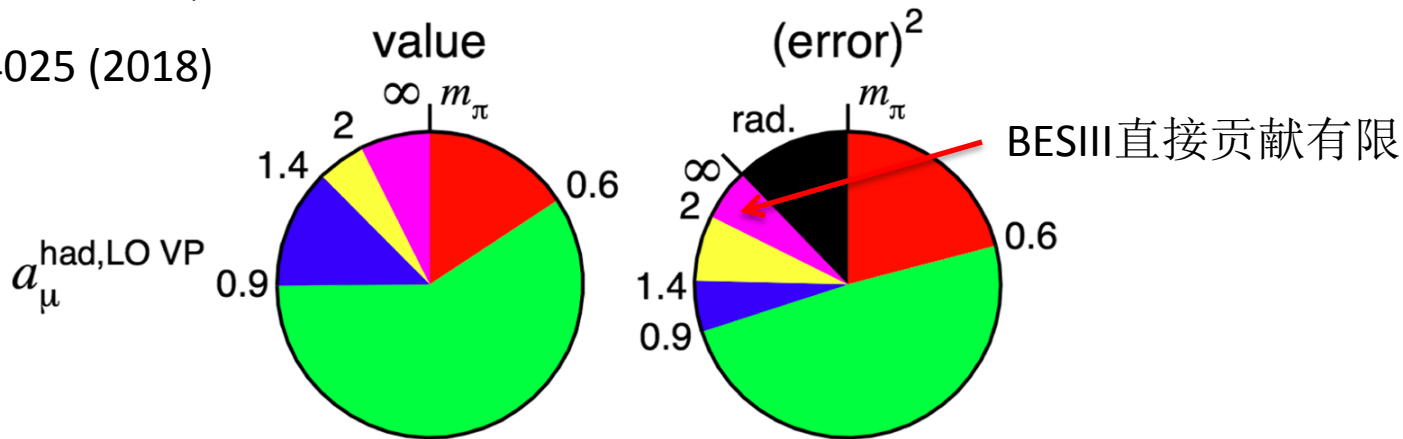
$\epsilon_{had}$ : 强子事例探测效率

$\delta$ : 辐射修正因子

R值测量精度: **BESII 6~7%**  $\rightarrow$  **BESIII 3%**

# R值是 $a_\mu$ 和 $\Delta\alpha(M_Z^2)$ 计算的输入量

Phys. Rev. D97, 114025 (2018)

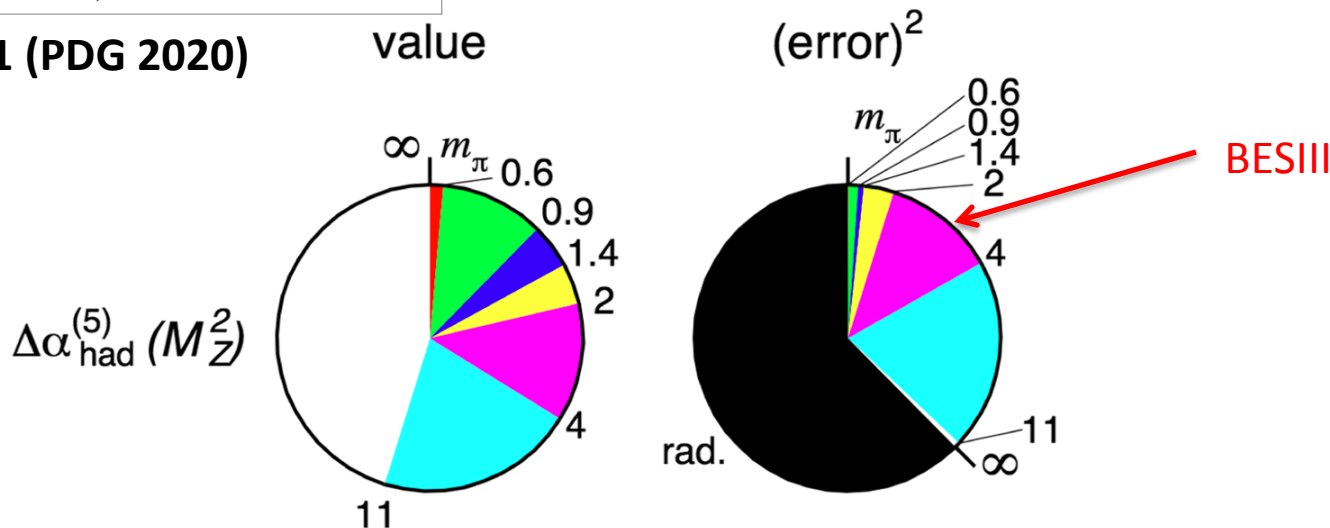


(a) Fractional contributions to  $a_\mu^{\text{had, LO VP}}$ .

$$a_\mu^{\text{exp}} = (11\,659\,209.1 \pm 6.3) \times 10^{-10} \text{ (E821)}$$

$$a_\mu^{\text{SM}} = (11\,659\,183.0 \pm 4.8) \times 10^{-10}$$

PTEP 2020, 083C01 (PDG 2020)

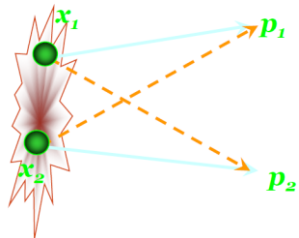


(b) Fractional contributions to  $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(M_Z^2)$

# 强子产生源时空特性

- 在弦碎裂模型中，强子由弦碎裂产生；在集团模型中，强子由集团衰变而来。弦或集团称为强子源，其在坐标空间具有扩展的拓扑结构。

- 从强子源产生全同玻色子不可区分导致了全同体系波函数相干性：



考虑从定域强子源产生两个全同 $\pi$ 介子，

$$A_{1,2} \sim \psi_{p_1}(x_1)\psi_{p_2}(x_2) + \psi_{p_1}(x_2)\psi_{p_2}(x_1)$$

- Bose-Einstein (BE) 关联：全同玻色子产生在一小相空间的概率大于非全同粒子。

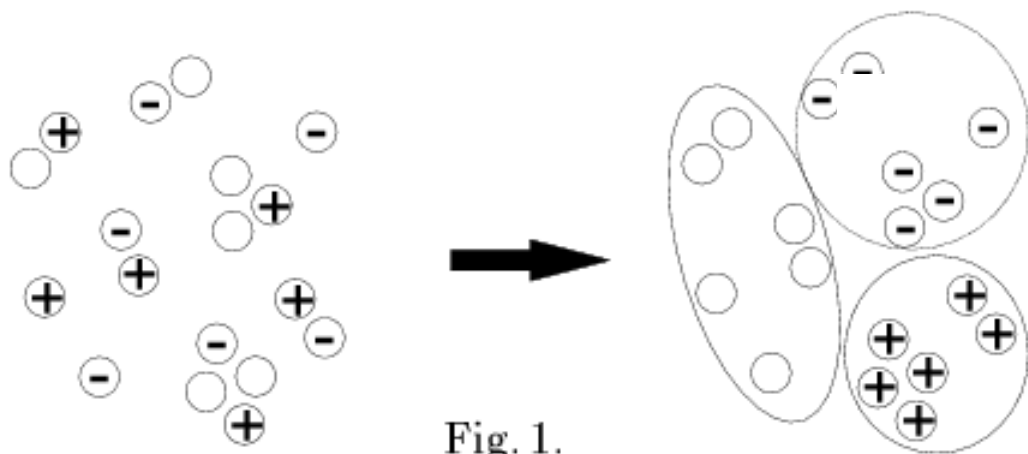
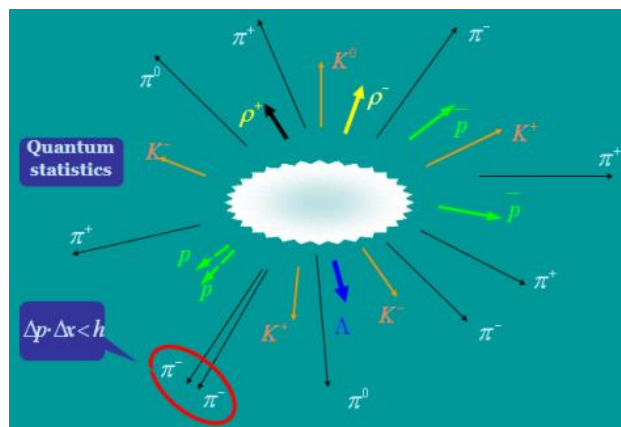


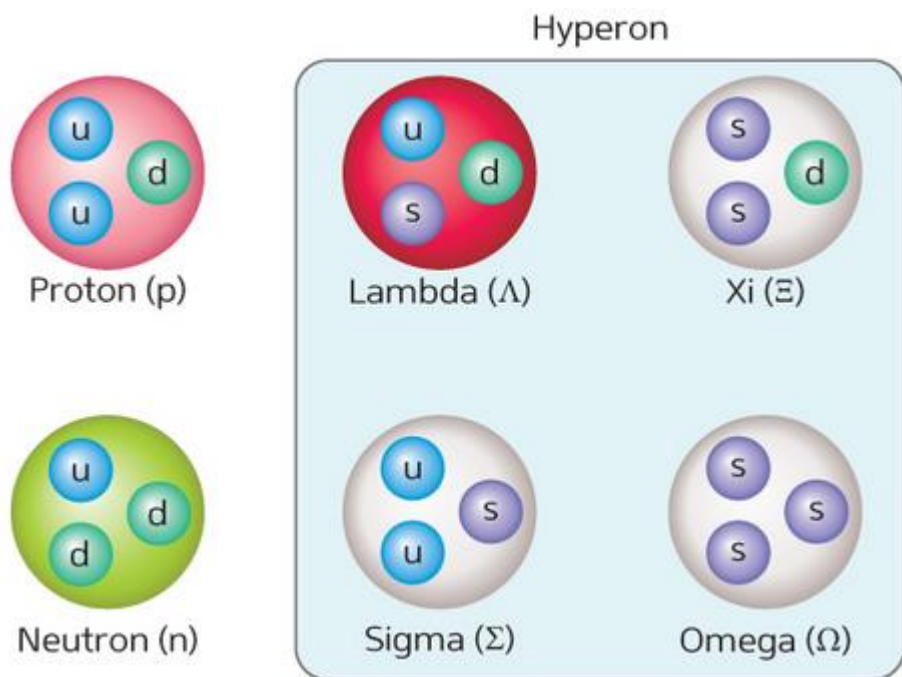
Fig. 1.

- 测量BE关联函数可以推测强子产生源的时空拓扑结构，增进对强相互作用了解。

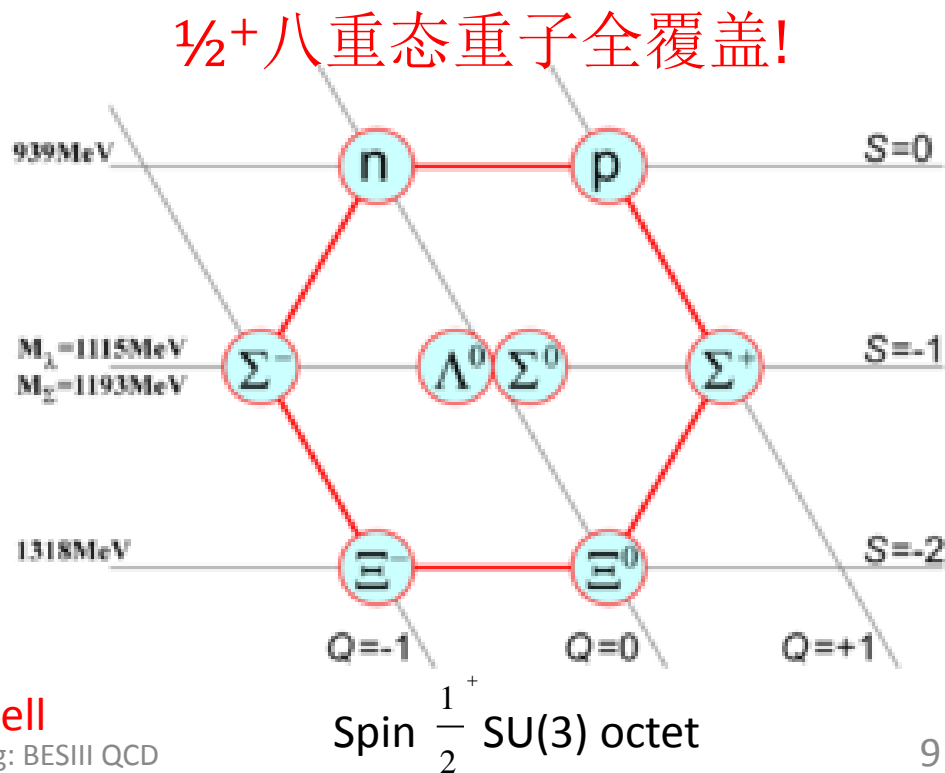


# 重子形状因子测量

- $p\bar{p}$ : PRD 91, 112004 (2015); PRL 124, 042001 (2020);
- $n\bar{n}$ : Nature Physics 17, 1200 (2021);
- $\Lambda\bar{\Lambda}$ : Phys. Rev. D 97, 032013 (2018);
- $\Sigma^+\bar{\Sigma}^-/\Sigma^-\bar{\Sigma}^+$ : PLB814, 136110 (2021),  $\Sigma^0\bar{\Sigma}^0$ : PLB831, 137187 (2022);
- $\Xi^-\bar{\Xi}^+$ : PRD103, 012005 (2021),  $\Xi^0\bar{\Xi}^0$ : PLB820, 136557 (2021).



$\frac{1}{2}^+$  八重态重子全覆盖!



$\Omega^-\bar{\Omega}^+$  as well

G.S. Huang: BESIII QCD

# 重子对近阈产生行为研究

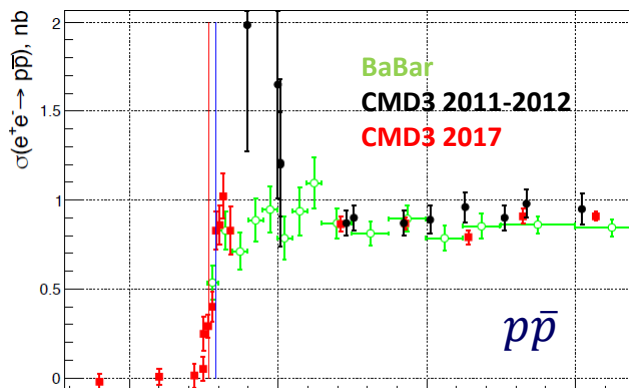
$\bar{p}p$	$\bar{\Lambda}\Lambda$	$\bar{\Sigma}^-\Sigma^+$	$\bar{\Sigma}^0\Sigma^0$	$\bar{\Sigma}^+\Sigma^+$	$\bar{\Xi}^0\Xi^0$	$\bar{\Xi}^+\Xi^-$	$\bar{\Omega}^+\Omega^-$	$\bar{\Lambda}_c^-\Lambda_c^+$
$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
$p\pi^-$	$p\pi^0$	$\Lambda\gamma$	$n\pi$	$\Lambda\pi^0$	$\Lambda\pi$	$\Lambda K$	$\Lambda\pi$	
64%	52%	$\approx 100\%$	$\approx 100\%$	$\approx 100\%$	$\approx 100\%$	68%	$\approx 1\%$	

$e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow B\bar{B}$  产生截面:

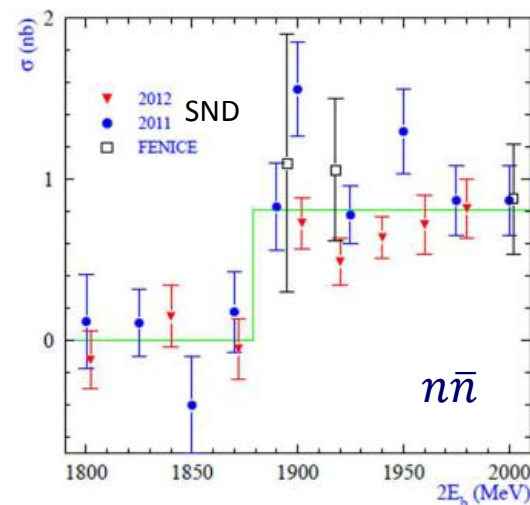
$$\sigma_{B\bar{B}}(m) = \frac{4\pi\alpha^2 C\beta}{3m^2} [|G_M(m)|^2 + \frac{1}{2\tau} |G_E(m)|^2]$$

库仑因子  $C = \begin{cases} \frac{\pi\alpha}{\beta} \frac{1}{1-\exp(-\frac{\pi\alpha}{\beta})}, & \text{对于带电 } B\bar{B} \\ 1, & \text{对于中性 } B\bar{B} \end{cases}$

产生阈截面预期为零!

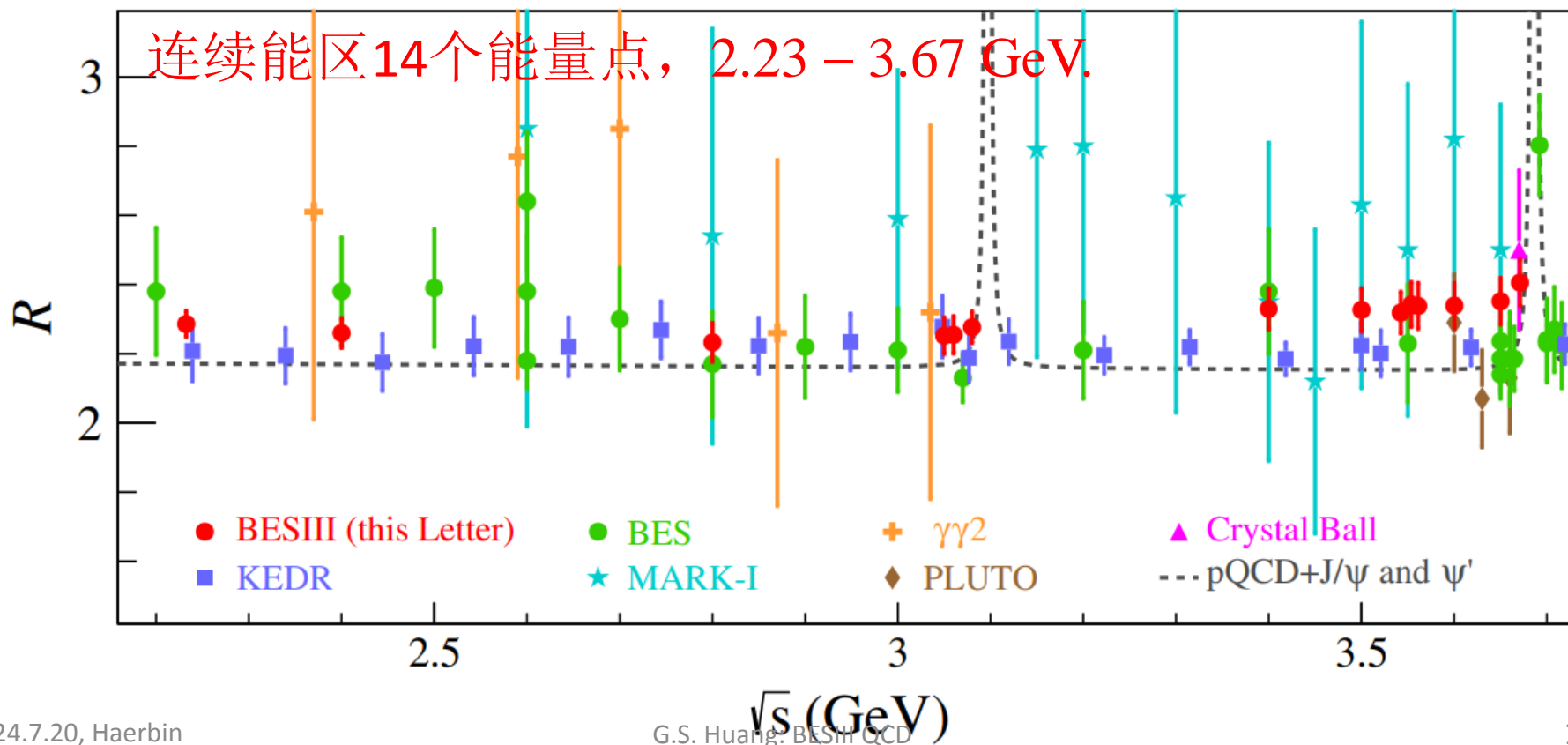


$p\bar{p}$ 、 $n\bar{n}$  预期表现不同，问题在于后者精度太差！其他重子对如何？



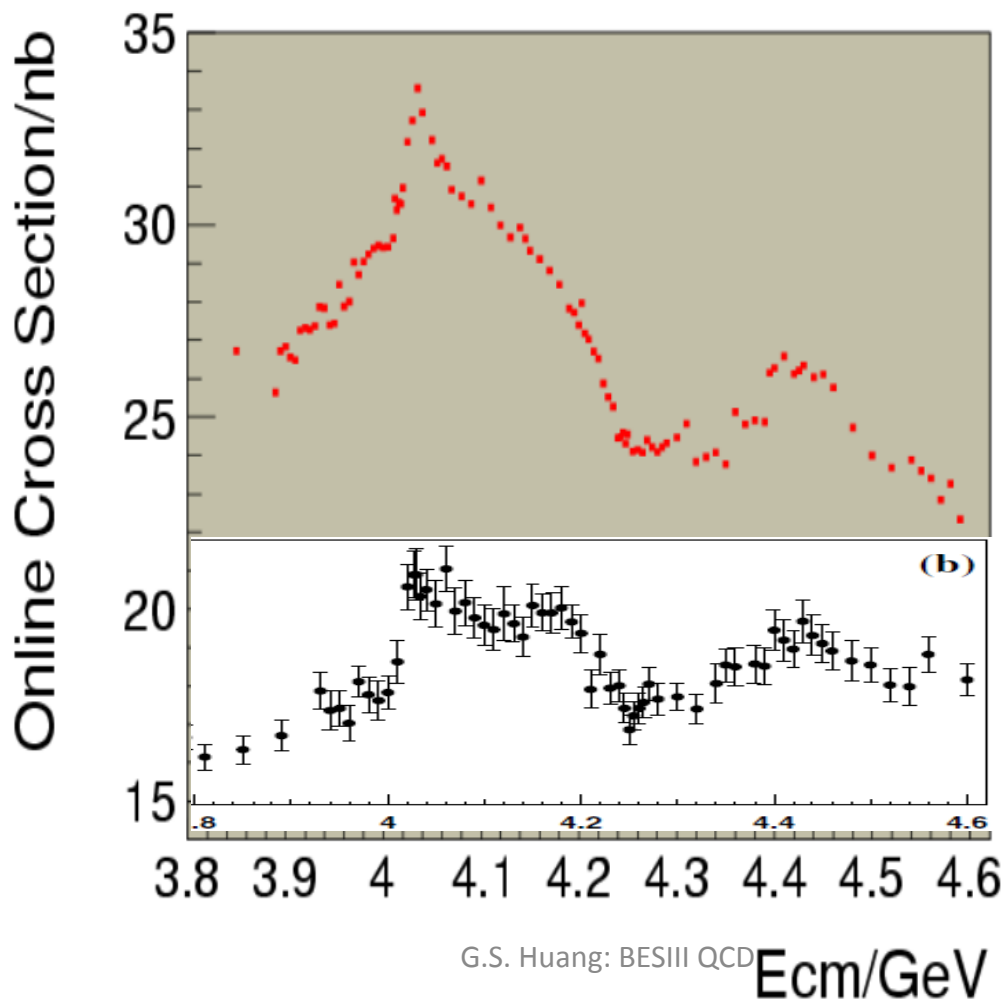
# 任务1: R值测量

- 参数调整: Chinese Physics C 40, 113002 (2016);
- 亮度测量: Chinese Physics C 41, 063001 (2017);
- R值精度好于3%, Phys. Rev. Lett. 128, 062004 (2022).



# 全能区R值及共振参数测量

- 数据统计量比BESII显著改善;
- 目标: R值精度 $\sim 3\%$ 、提取共振参数。



BESIII在线截面

BESII R值结果

## 2.0 GeV单举及遍举R值测量

- 通常R值测量方法:

1) **遍举方案**: 在较低能区 ( $E_{cm} < 2 \text{ GeV}$ ), 所能产生的强子道是已知的, 而且强子道的数目不多, 可以分别测量, 再相加得到强子产生总截面:

$$\sigma_{had} = \sum \sigma_f \quad \Rightarrow \quad R = \sum R_f = \sum \frac{N_f}{\sigma_\mu^0 L \epsilon_f (1 + \delta_f)}$$

2) **单举方案**: 较高能区 ( $E_{cm} > 2 \text{ GeV}$ ), 强子产生道的数目随能量增多, 并不是所有强子道都事先可知, 只能采取排除本底、测量强子总截面的方法:

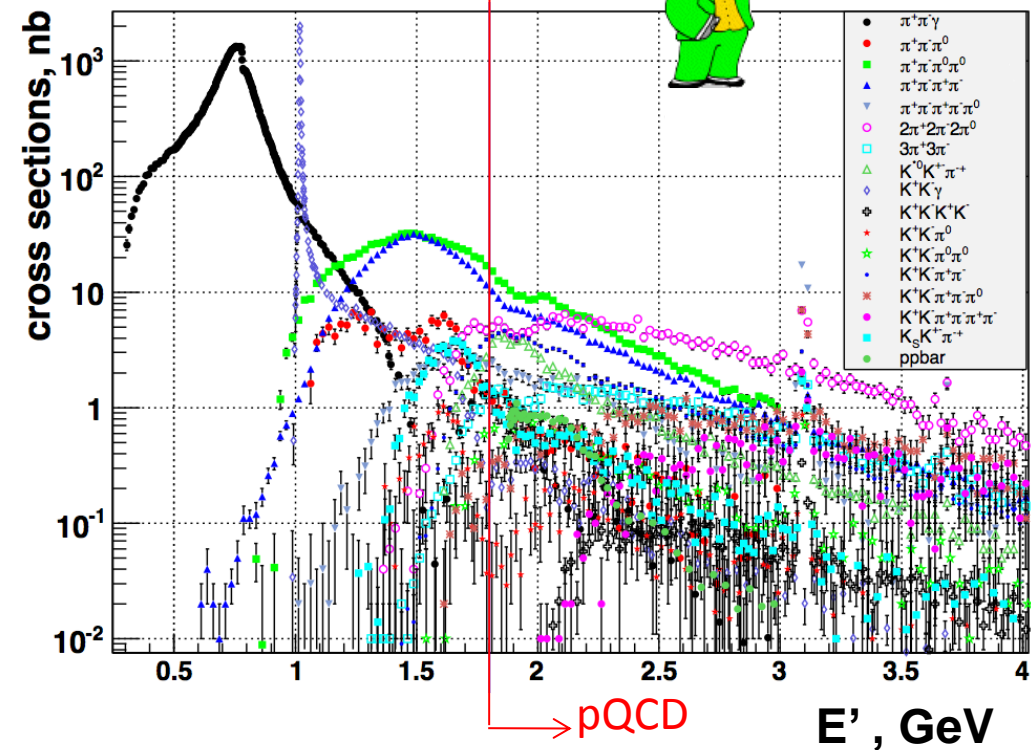
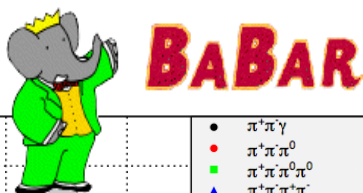
$$R = \frac{N_{had}}{\sigma_\mu^0 L \bar{\epsilon} (1 + \bar{\delta})}$$

- 利用BESIII在2.0 GeV获取的大统计量数据样本, 采用遍举和单举两种方法测量R值。
- 从未有任何一家实验做到两种方法同时测量。

# 2.0 GeV 遍举 R 值测量

- 有希望穷尽主要反应道;
- 研究进展已在 BESIII 报告。

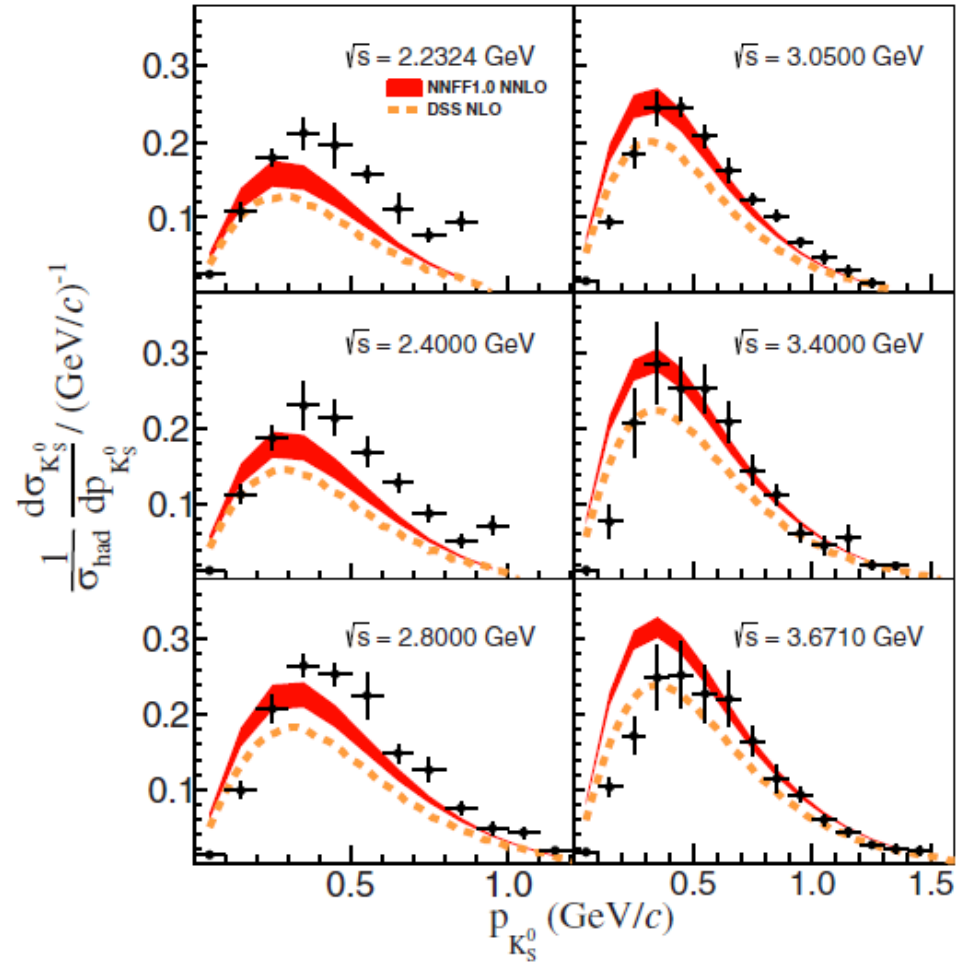
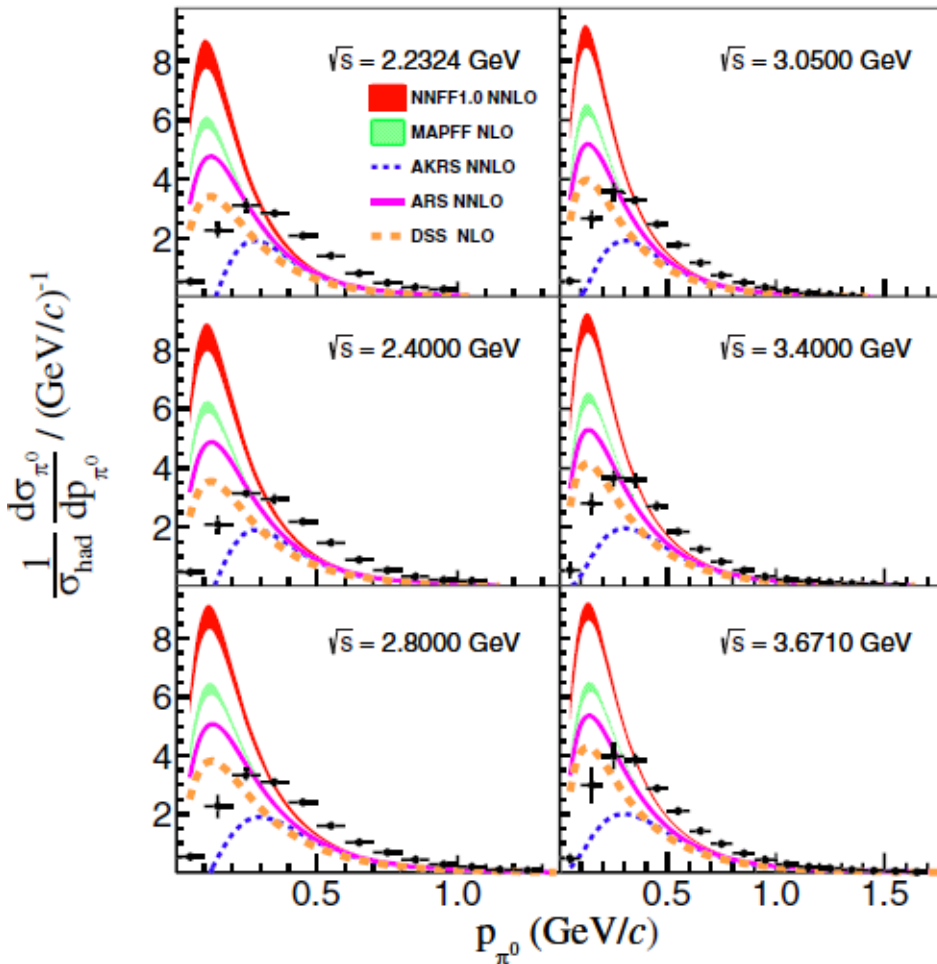
ISR spectra measured by



	Cross section(nb)	Ratio(%)
total	45.5 ± 1.0	95.2 ± 2.0
$\pi^+\pi^-$	0.29 ± 0.04	0.61 ± 0.09
$\pi^+\pi^-\pi^0$	0.52 ± 0.18	1.1 ± 0.4
$2\pi^+2\pi^-$	5.88 ± 0.12	12.31 ± 0.25
$\pi^+\pi^--2\pi^0$	8.47 ± 0.26	17.7 ± 0.5
$\omega.\pi^0(\text{non-pionic})$	0.072 ± 0.008	0.150 ± 0.016
$2\pi^+2\pi^--\pi^0(\eta \text{ excl})$	1.41 ± 0.20	3.0 ± 0.4
$\pi^+\pi^--3\pi^0(\eta \text{ excl})$	1.23 ± 0.17	2.6 ± 0.4
$\omega.2\pi(\text{non-pionic})$	0.053 ± 0.019	0.11 ± 0.04
$3\pi^+3\pi^-$	1.10 ± 0.10	2.30 ± 0.21
$2\pi^+2\pi^--2\pi^0(\eta \text{ excl})$	5.1 ± 0.4	10.7 ± 0.8
$\pi^+\pi^--4\pi^0(\eta \text{ excl, estimated})$	0.81 ± 0.06	1.70 ± 0.12
$3\pi^+3\pi^--\pi^0(\eta \text{ excl})$	0.09 ± 0.07	0.20 ± 0.15
$K^+K^-$	0.355 ± 0.010	0.743 ± 0.021
KLKS	0.020 ± 0.030	0.04 ± 0.06
KK $\pi$ (method 2)	1.94 ± 0.23	4.1 ± 0.5
KK2 $\pi$ (method 2)	10.6 ± 0.4	22.1 ± 0.9
KK3 $\pi$ ( $\eta \text{ excl}$ )	0.83 ± 0.23	1.7 ± 0.5
$\eta.2\pi$	0.65 ± 0.08	1.36 ± 0.17
$\eta.3\pi$	0.44 ± 0.27	0.9 ± 0.6
$\eta.4\pi$	1.42 ± 0.24	3.0 ± 0.5
$\omega.KK(\text{non-pionic})$	0.087 ± 0.025	0.18 ± 0.05
$\omega.\eta$	0.035 ± 0.011	0.073 ± 0.022
$\omega.\eta.\pi^0$	1.58 ± 0.20	3.3 ± 0.4
$\eta.2K(\text{not } \phi)$	0.060 ± 0.028	0.13 ± 0.06
$\eta.\phi$	0.57 ± 0.25	1.2 ± 0.5
p.pbar	0.84 ± 0.06	1.76 ± 0.12
n.nbar	0.87 ± 0.22	1.8 ± 0.5
$\eta.\pi^+\pi^-$	0.144 ± 0.020	0.30 ± 0.04

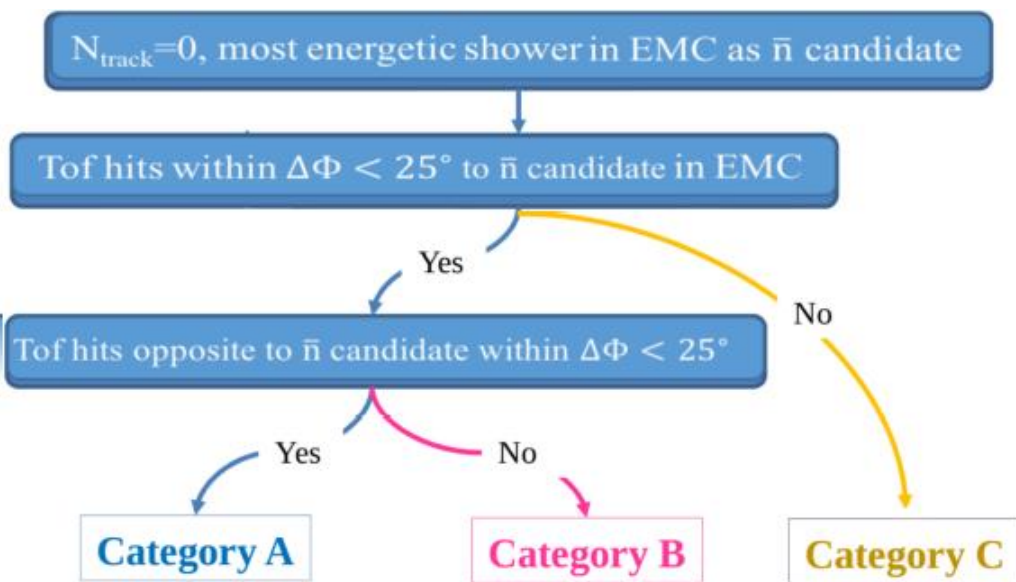
# Inclusive $\pi^0$ and $K_S^0$ Production

- **Phys. Rev. Lett. 130, 231901 (2023)**
- Input for nucleon structure study at EIC/EicC;
- Significant deviation from previous fragmentation function calculations.

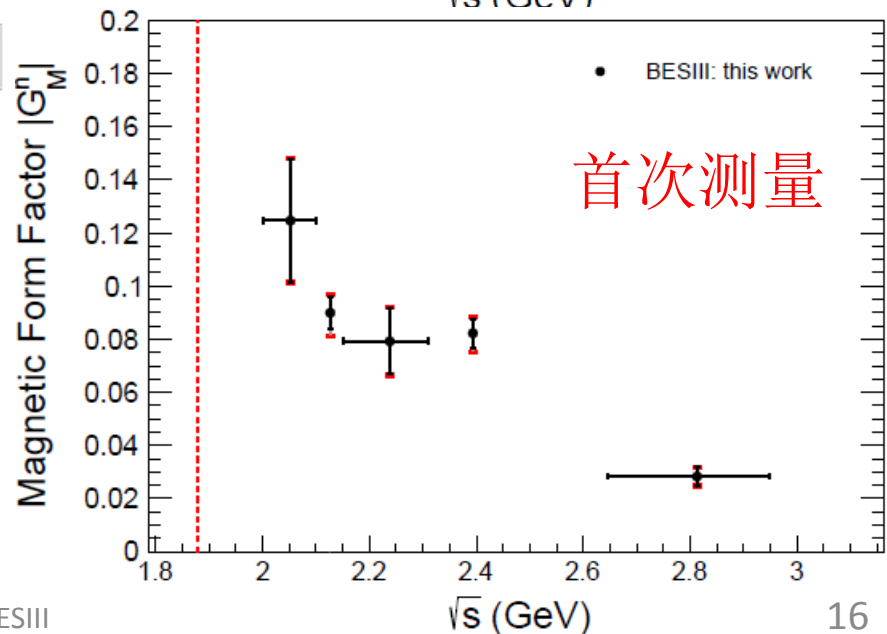
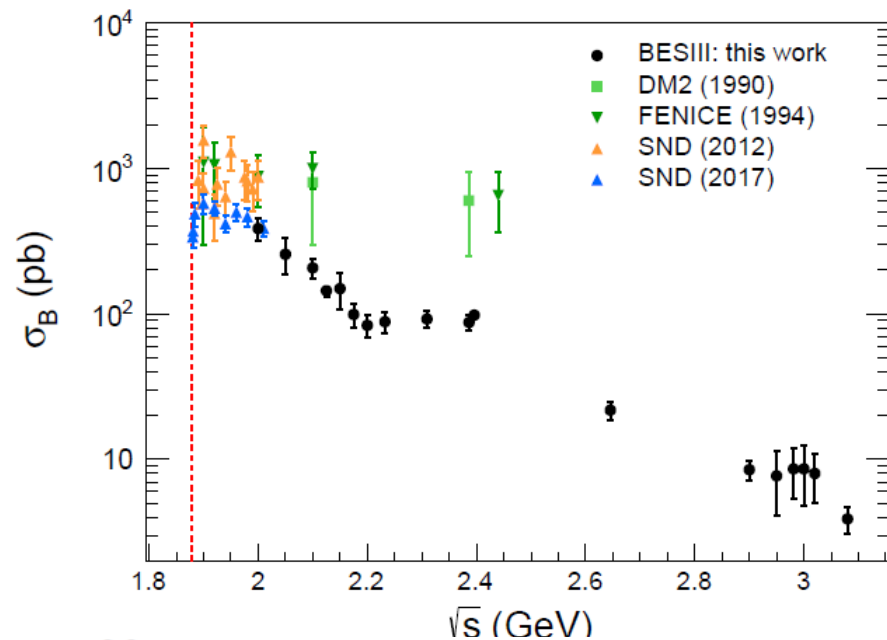


# 任务2：重子近阈产生与形状因子

$e^+e^- \rightarrow n \bar{n}$  events 事例选择流程:



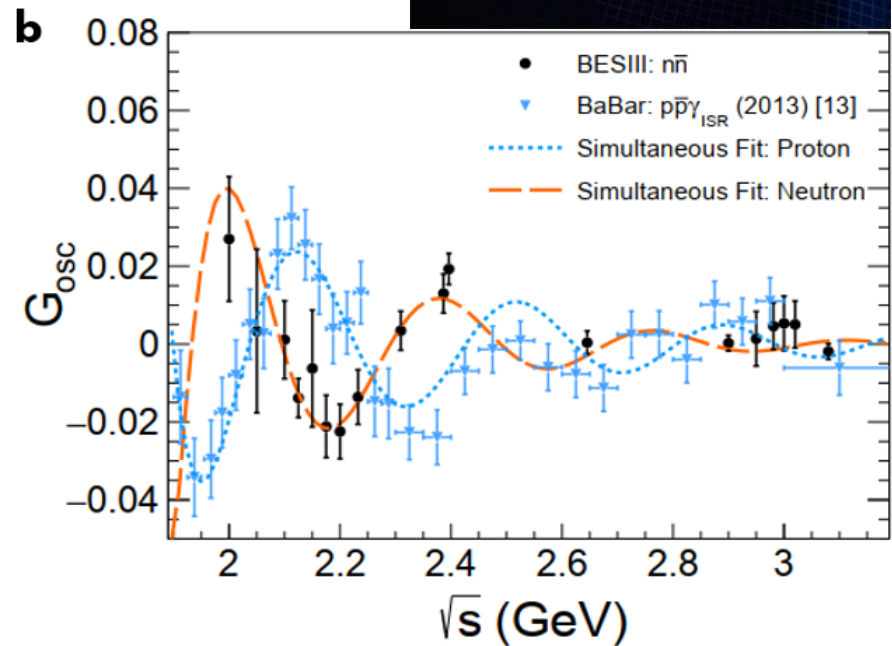
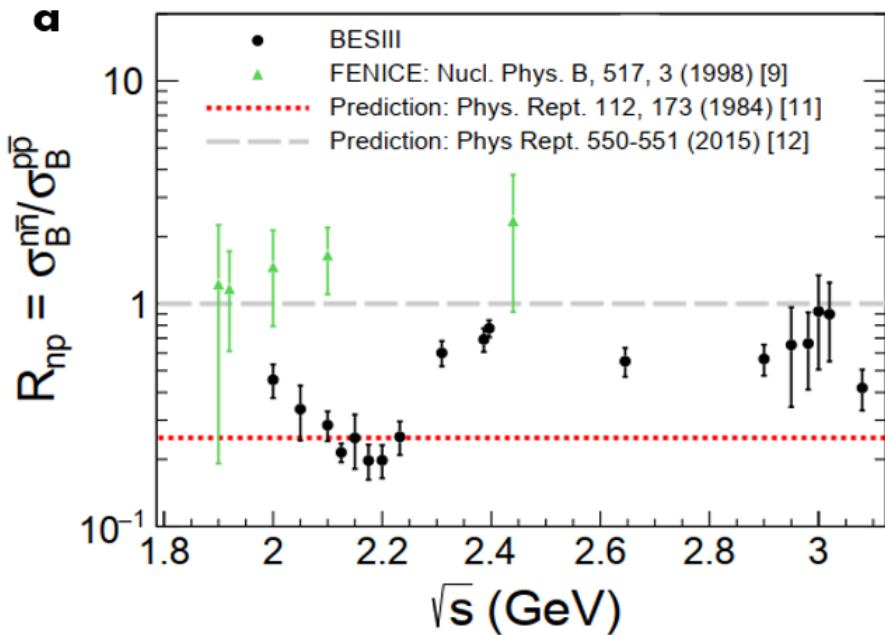
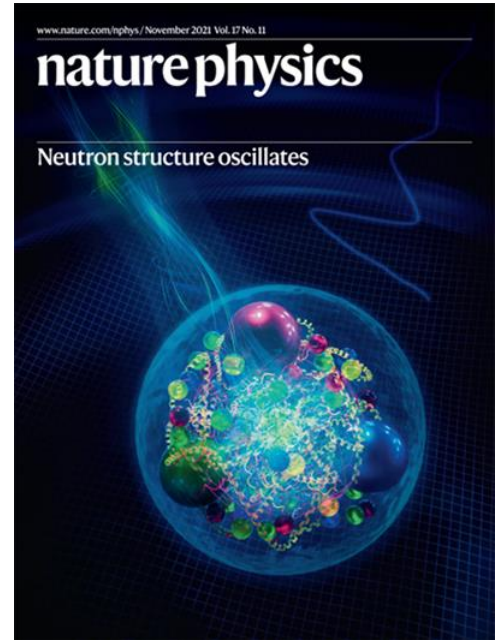
- 事例选择非常具有挑战性!
- 充分利用电磁量能器/飞行时间探测器信息;
- 最精确的测量结果;
- **Phys.Rev.Lett.130, 151905 (2023)**





# 中子产生截面与有效形状因子

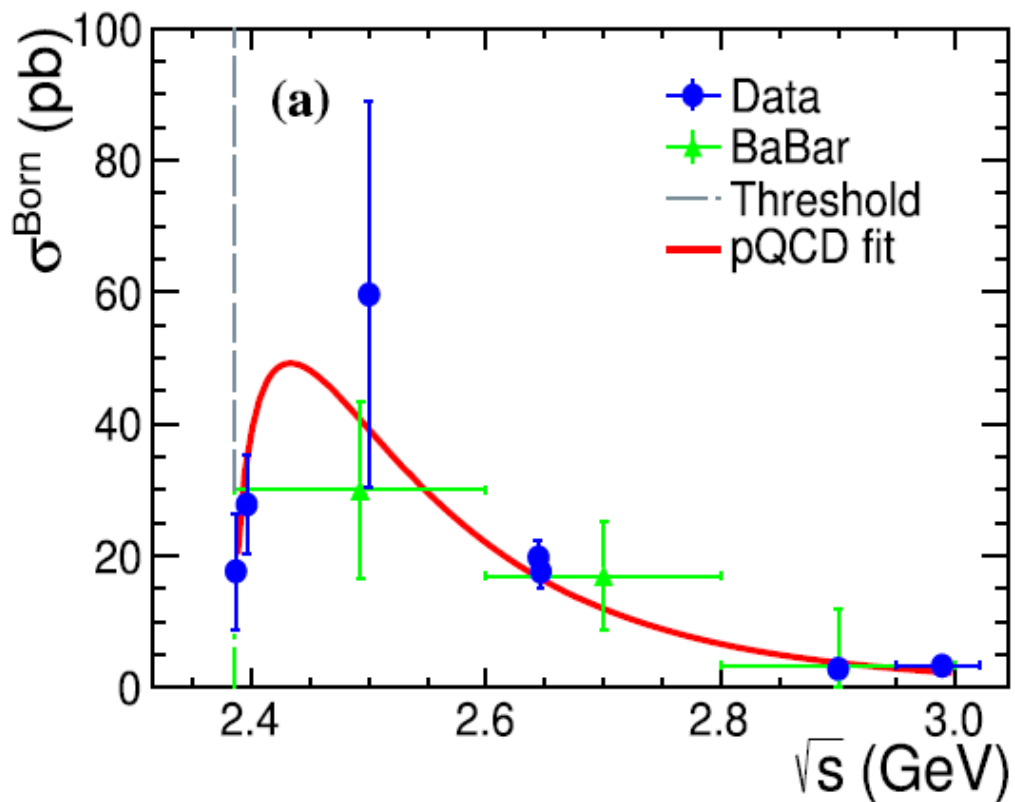
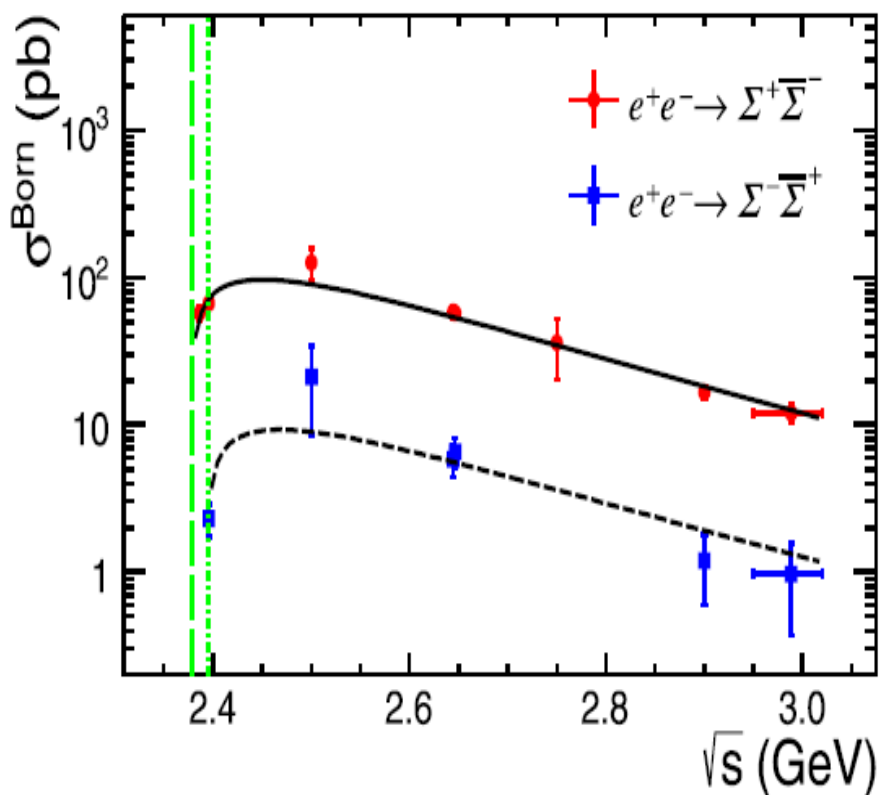
- 中子对产生截面小于质子对产生截面；
- 中子电磁形状因子的周期性振荡结构。
- **Nature Physics 17, 1200 (2021)**



# $\Sigma^+\bar{\Sigma}^-/\Sigma^-\bar{\Sigma}^+$ and $\Sigma^0\bar{\Sigma}^0$

PLB814, 136110 (2021)

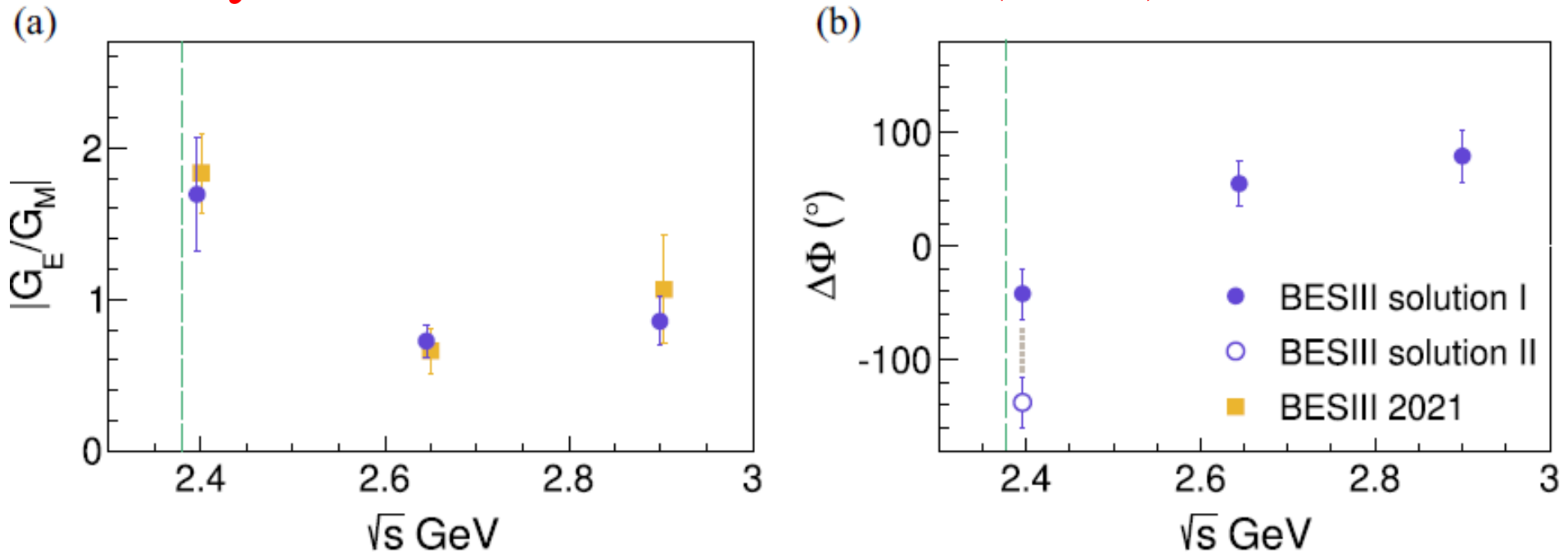
PLB831, 137187 (2022)





## Electromagnetic Form Factors

- Phys. Rev. Lett. 132, 081904 (2024)

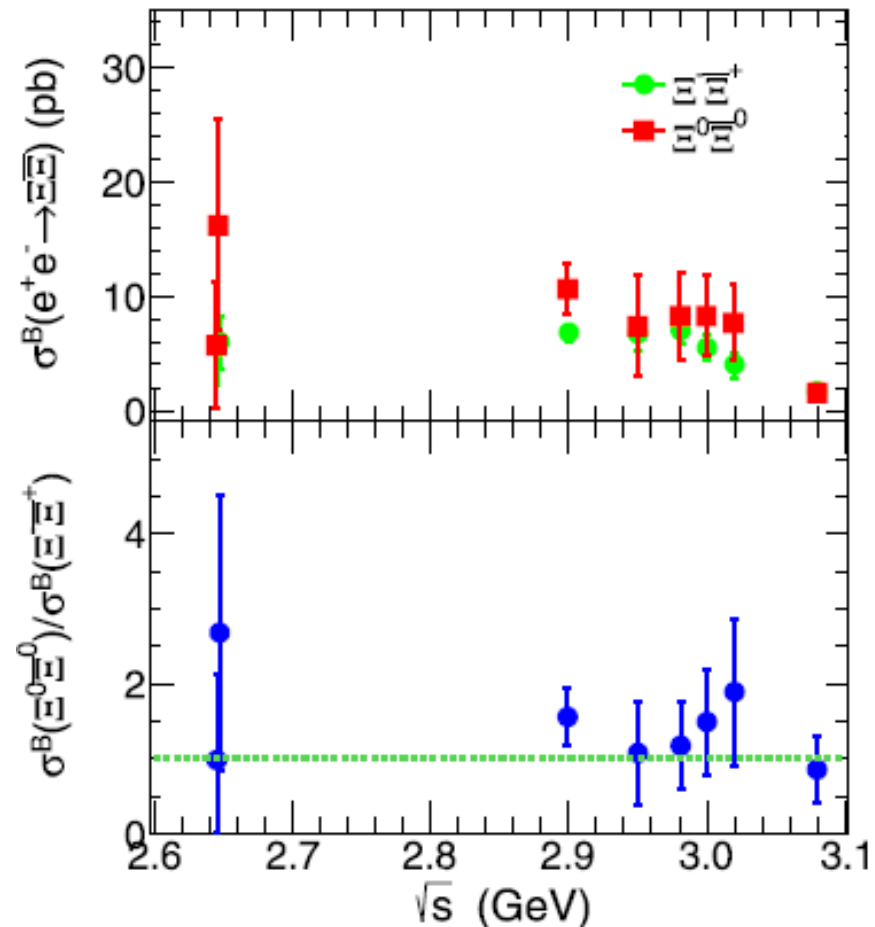
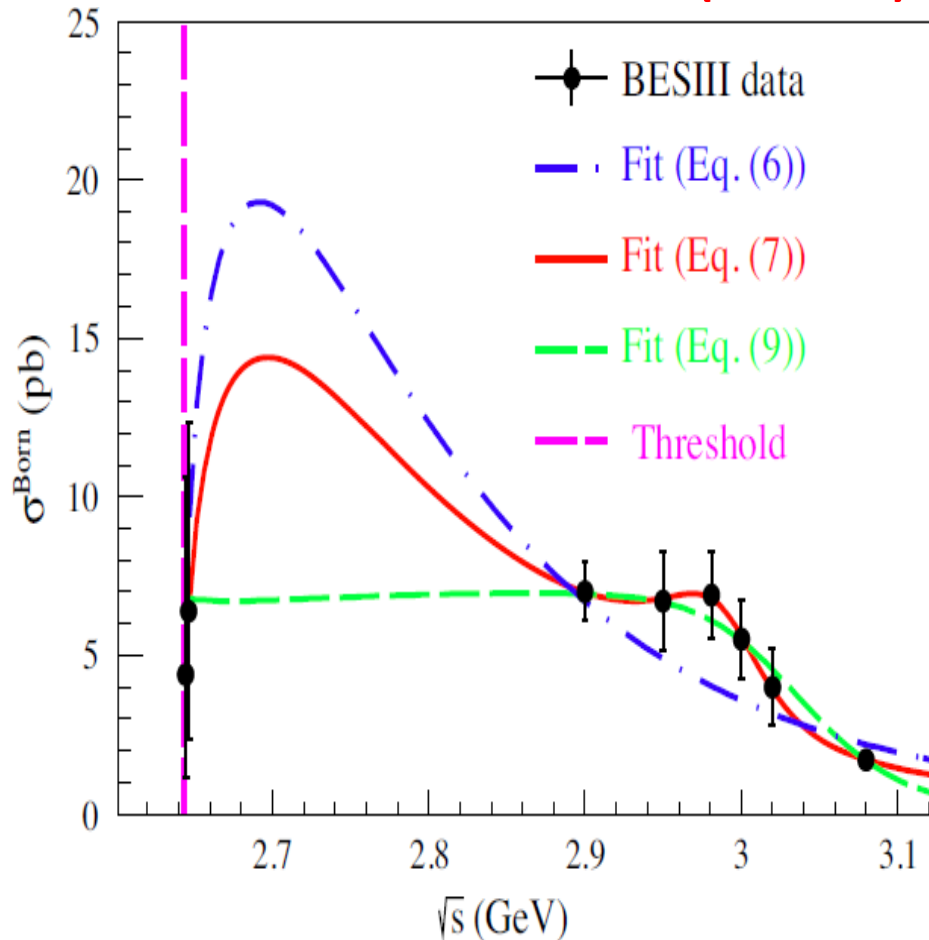


$\sqrt{s}$ (GeV)	2.3960	2.6454	2.9000
$\alpha$	$-0.47 \pm 0.18 \pm 0.09$	$0.41 \pm 0.12 \pm 0.06$	$0.35 \pm 0.17 \pm 0.15$
$\Delta\Phi(^{\circ})$	$-42 \pm 22 \pm 14$ ( $-138 \pm 22 \pm 14$ )	$55 \pm 19 \pm 14$	$78 \pm 22 \pm 9$
$\sin \Delta\Phi$	$-0.67 \pm 0.29 \pm 0.18$		
$ G_E/G_M $	$1.69 \pm 0.38 \pm 0.20$	$0.72 \pm 0.11 \pm 0.06$	$0.85 \pm 0.16 \pm 0.15$

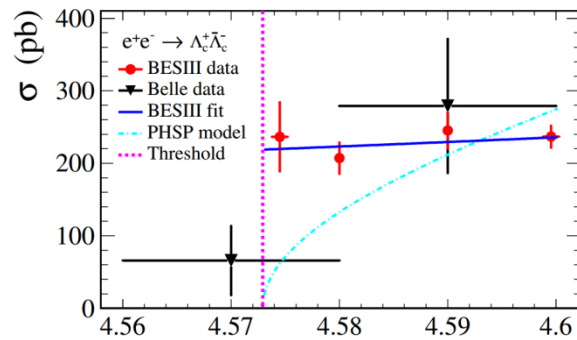
# $\Xi^- \Xi^+$ and $\Xi^0 \Xi^0$

PRD103, 012005 (2021)

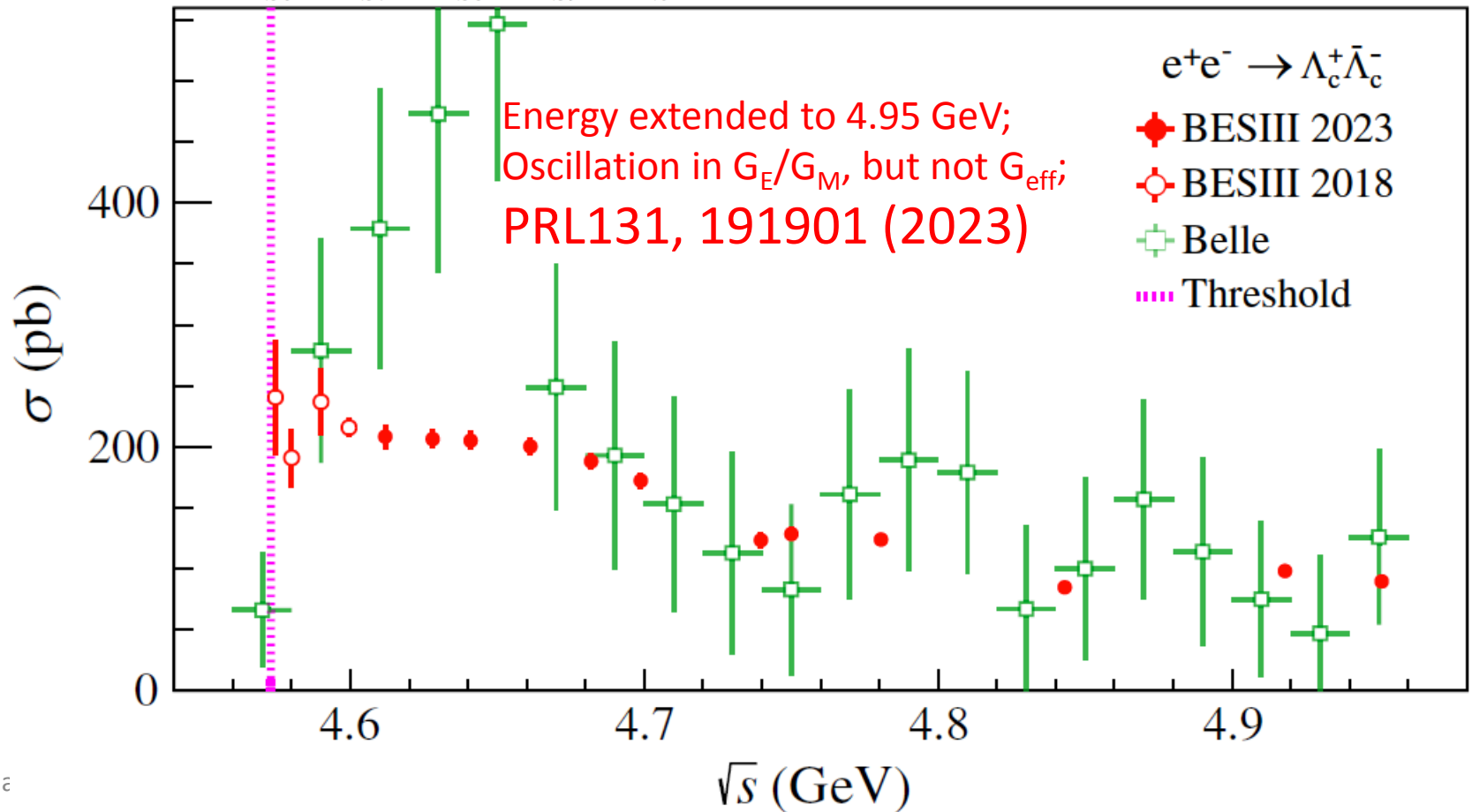
PLB820, 136557 (2021)



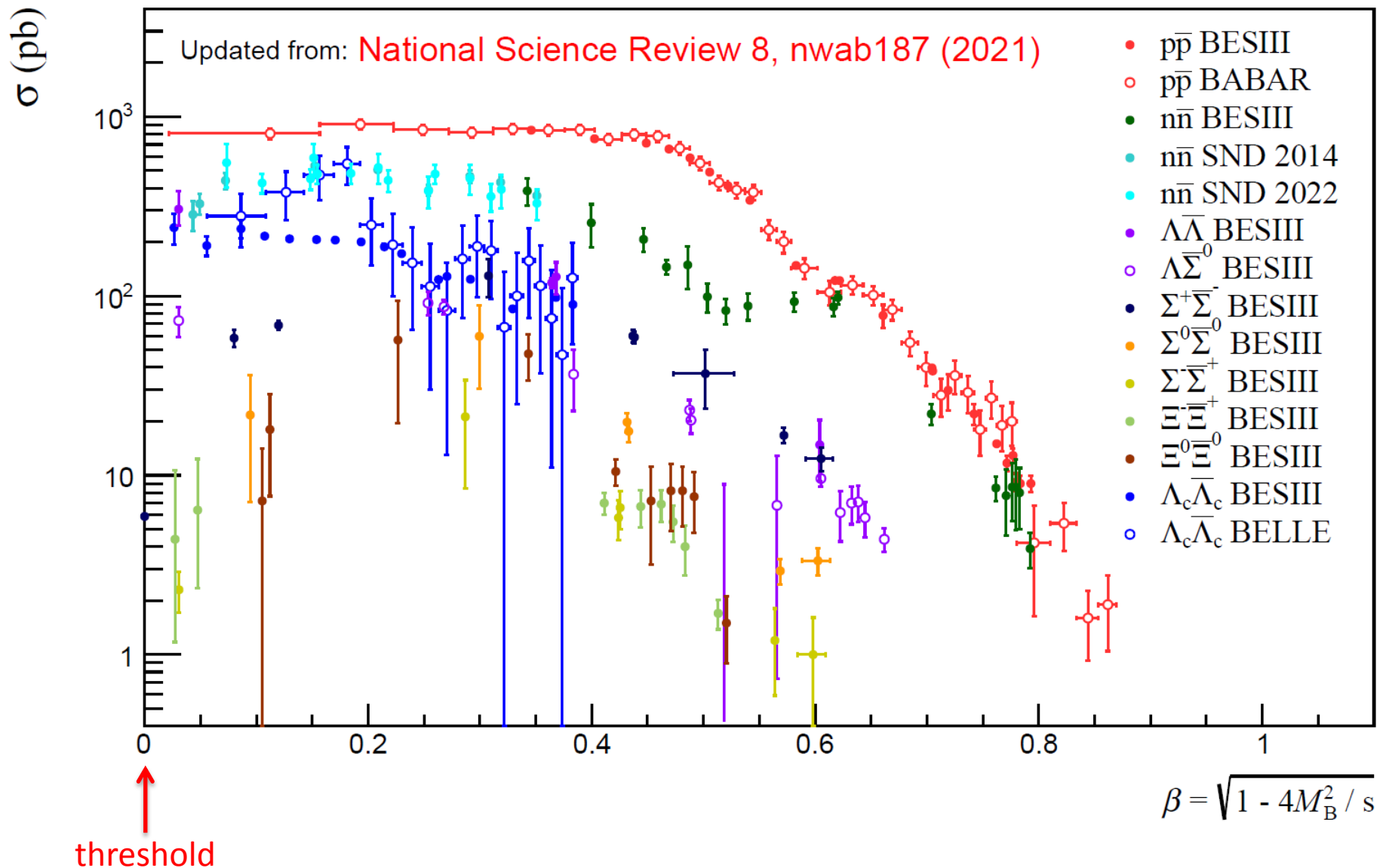
# $\Lambda_c \bar{\Lambda}_c$ 截面及形状因子测量



观测到近阈非零截面；  
首次测量 $\Lambda_c$ 形状因子；  
PRL 120,132001 (2018) .



# 重子对产生截面一览



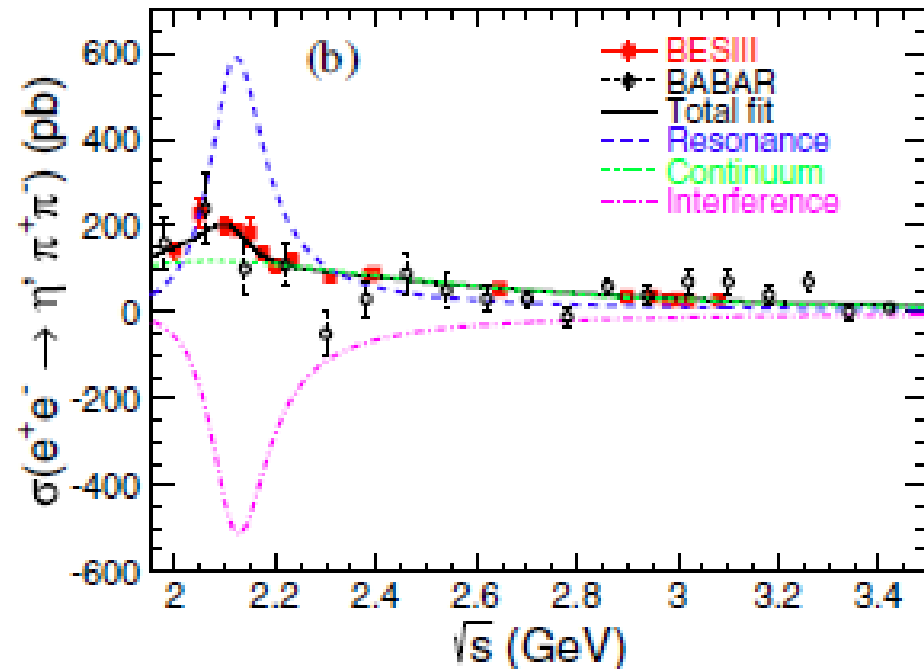
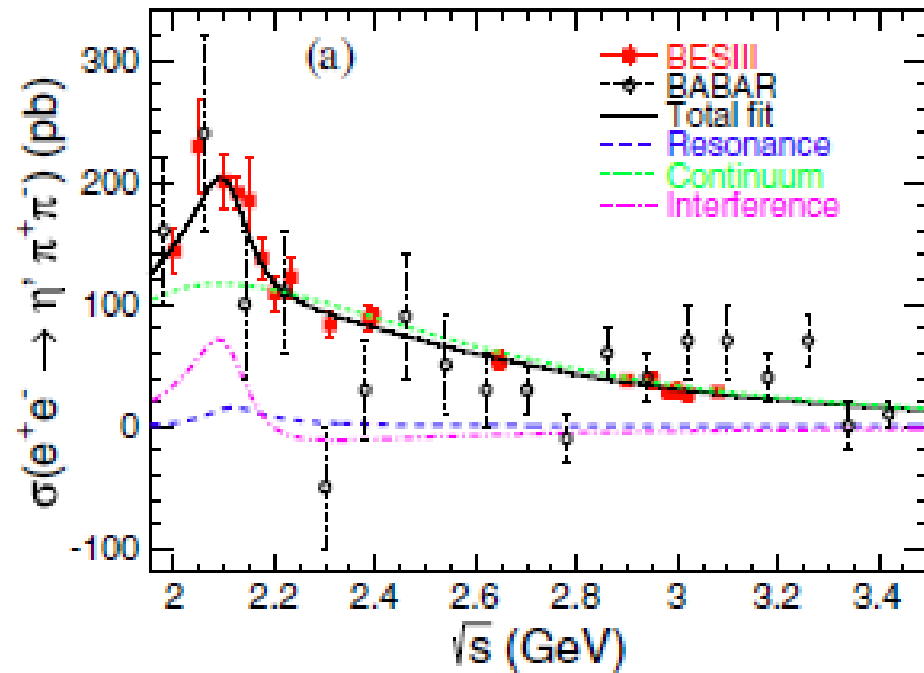


# 任务3：介子道截面及形状因子 (包括寻找 $\rho^*$ , $\omega^*$ , $\phi^*$ 激发态)

- $e^+e^- \rightarrow \omega \pi^0/\eta$ , **PLB813, 136059 (2021)**
- $e^+e^- \rightarrow \eta' \pi^+ \pi^-$ , **PRD103, 072007 (2021)**
- $e^+e^- \rightarrow \phi \eta$ , **PRD104, 032007 (2021)**
- $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ , **PRD104, 092014 (2021)**
- $e^+e^- \rightarrow \omega \pi^0 \pi^0$ , **PRD105, 032005 (2022)**
- $e^+e^- \rightarrow K^+ K^- \pi^0$ , **JHEP07, 045 (2022)**
- $e^+e^- \rightarrow \phi \pi^+ \pi^-$ , **PRD108, 032011 (2023)**
- $e^+e^- \rightarrow \omega \pi^+ \pi^-$ , **JHEP01, 111 (2023)**
- $e^+e^- \rightarrow \omega \eta'$ , **JHEP07, 093 (2024)**
- $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ , **accepted by PRD**
- .....

$$e^+e^- \rightarrow \eta' \pi^+ \pi^-$$

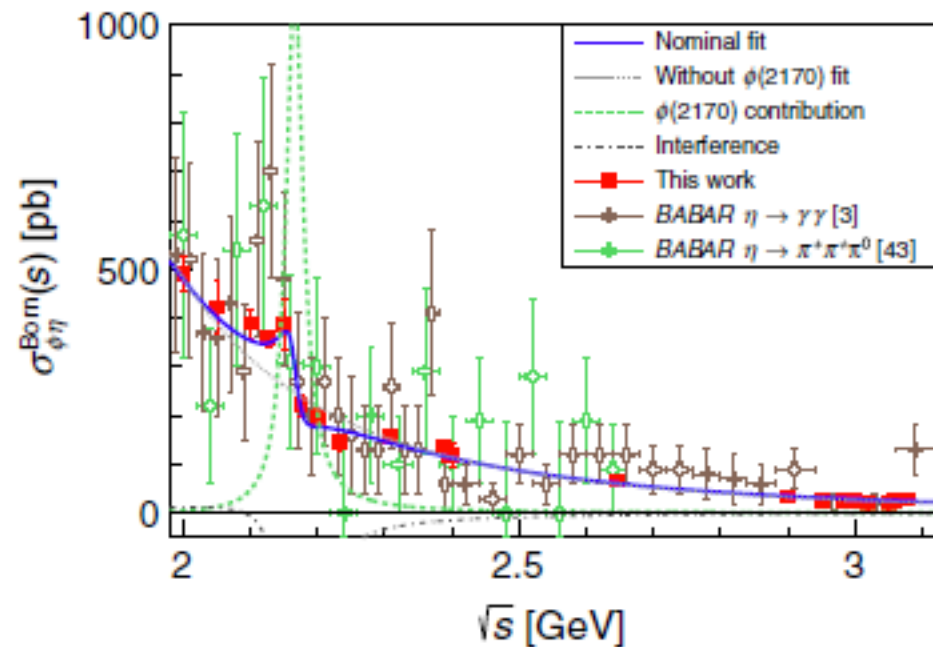
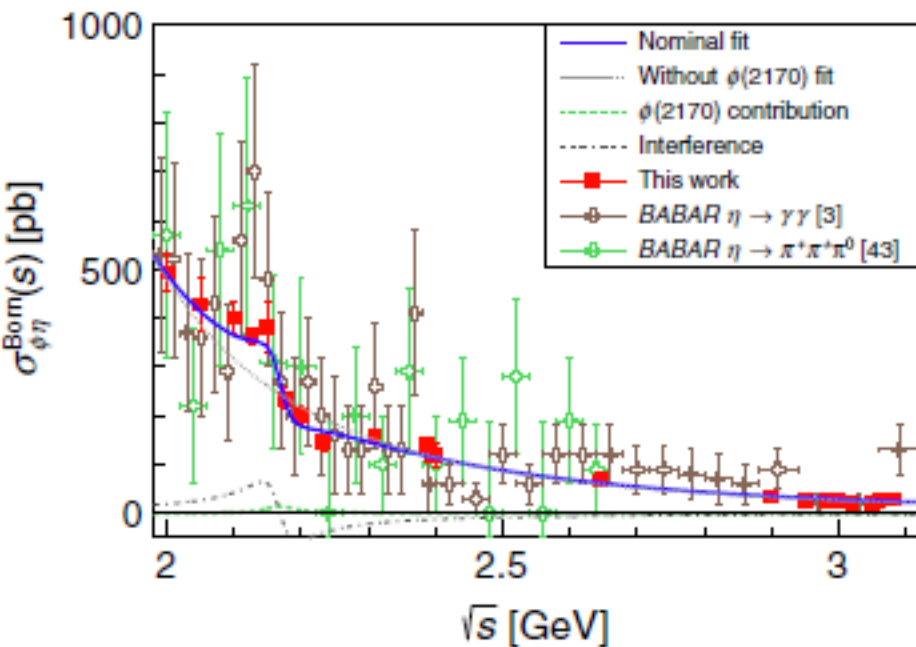
- $M=2111 \pm 43 \pm 25 \text{ MeV}/c^2$ ,  $\Gamma=135 \pm 34 \pm 30 \text{ MeV}$ ;
- PRD103, 072007 (2021).





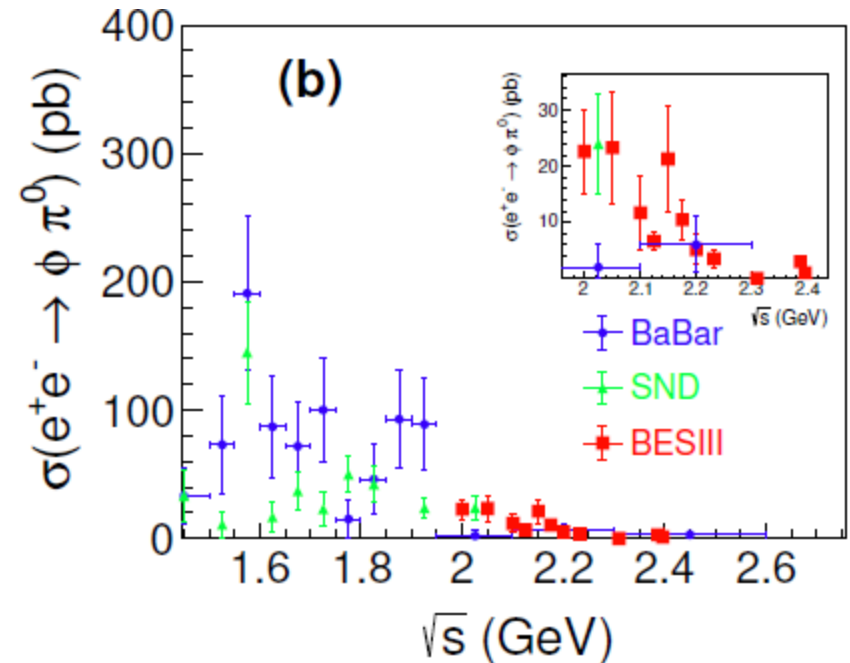
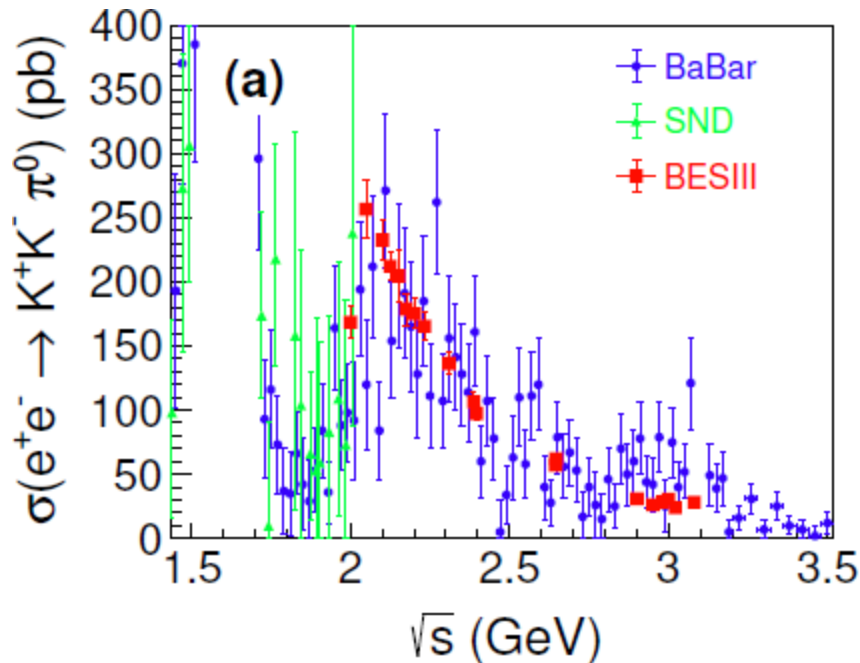
$$e^+e^- \rightarrow \phi\eta$$

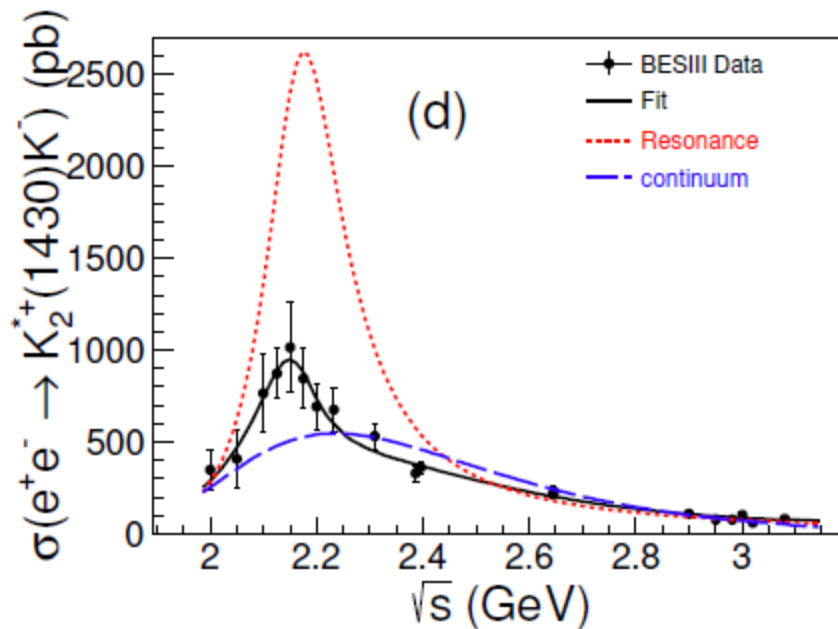
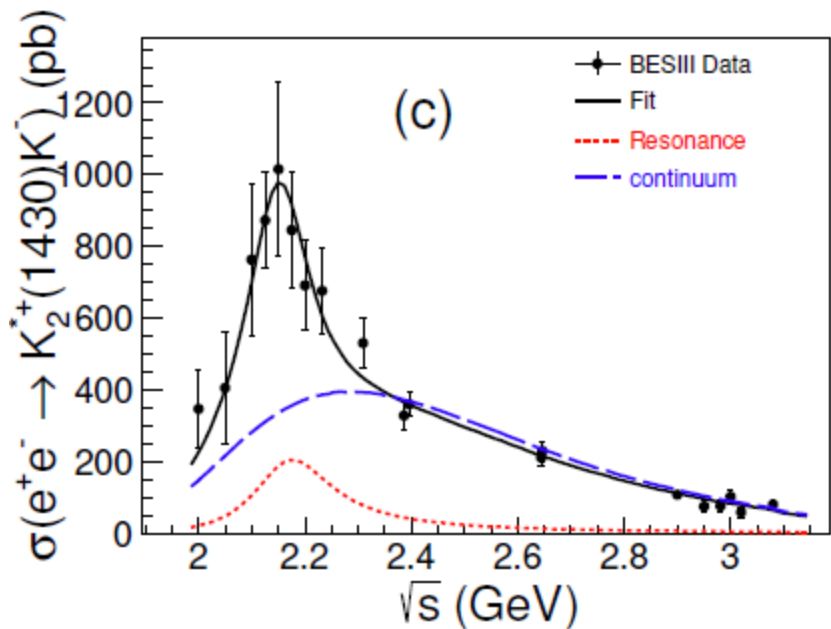
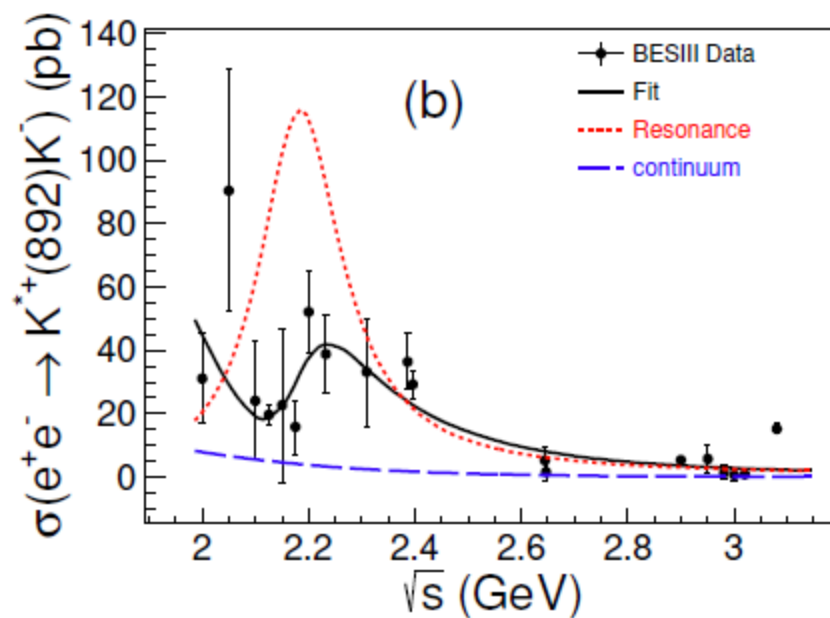
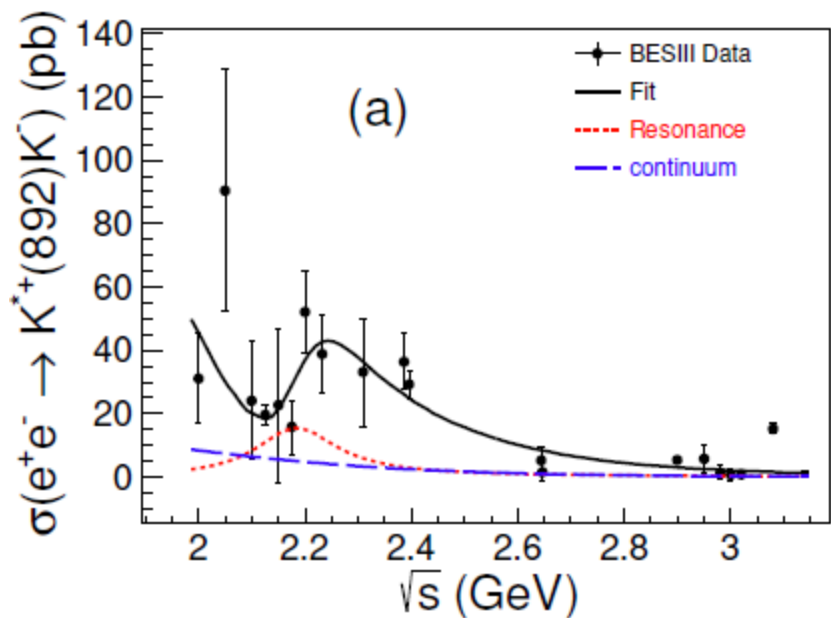
- $M=2163.5 \pm 6.2 \pm 3.0 \text{ MeV}/c^2$ ;
- $\Gamma=31.1^{+21.1}_{-11.6} \pm 1.1 \text{ MeV}$ ;
- **PRD104, 032007 (2021).**



$$e^+e^- \rightarrow K^+K^- \pi^0$$

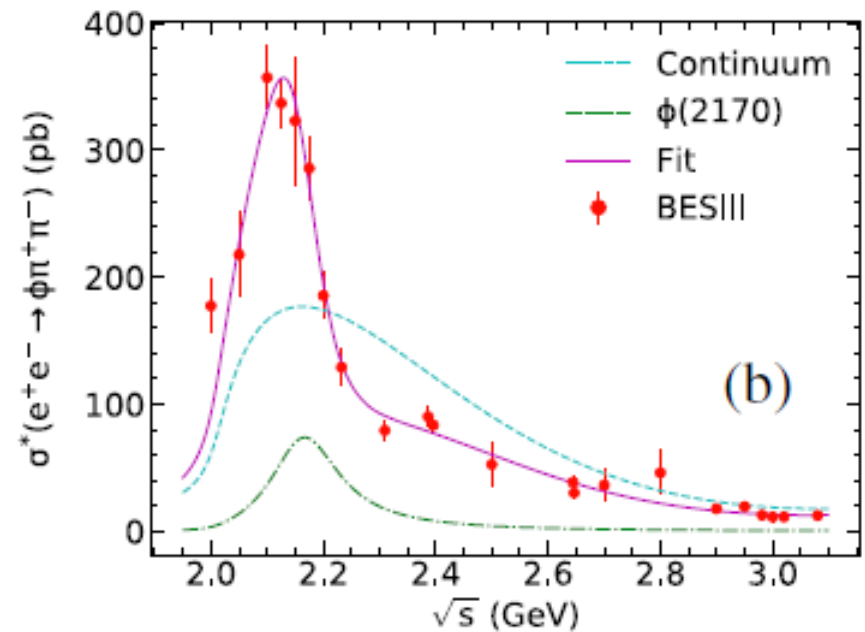
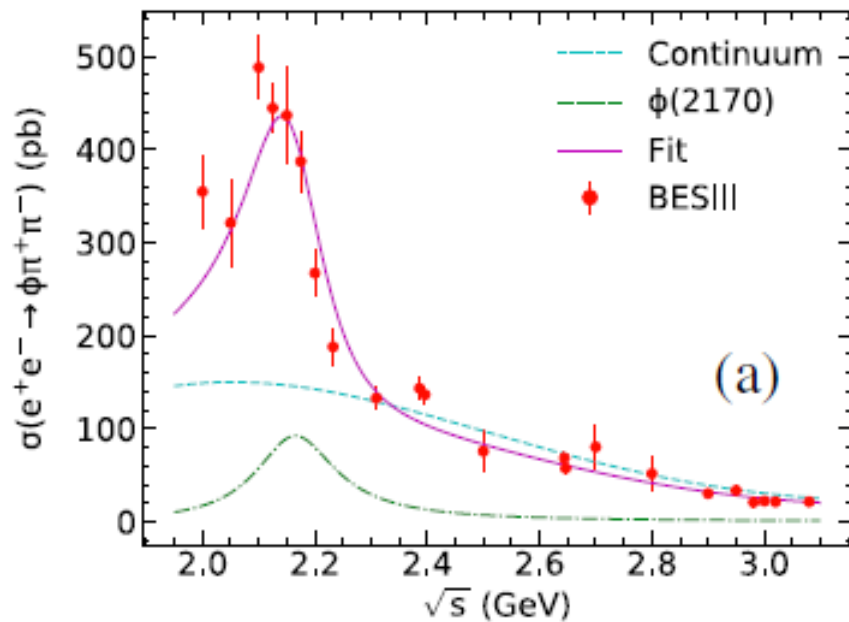
- $M=2190 \pm 19 \pm 37 \text{ MeV}/c^2$ ,  $\Gamma=191 \pm 28 \pm 60 \text{ MeV}$  from PWA of  $K^*(892)K$  and  $K_2^*(1430)K$ ;
- **JHEP07, 045 (2022).**

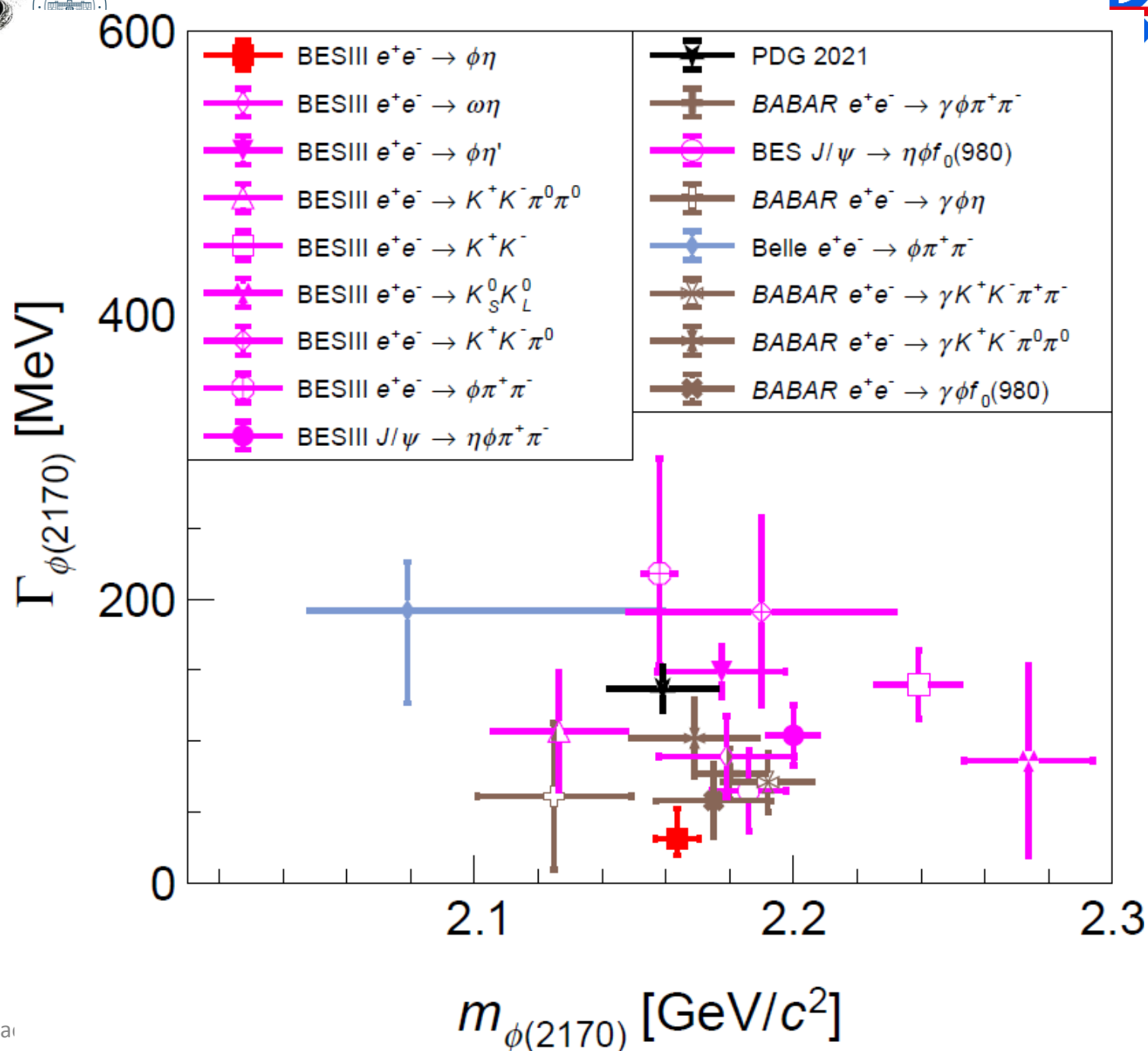




$$e^+e^- \rightarrow \phi\pi^+\pi^-$$

- $M=2178\pm 20\pm 5 \text{ MeV}/c^2$ ,  $\Gamma=140\pm 36\pm 16 \text{ MeV}$ ;
- PRD108, 032011 (2023)





# 利用初态辐射技术测量介子形状因子

- $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ , 600 – 900 MeV 结果发表在 PLB 753, 629 (2016); 更新结果发表在 **PLB 812, 135982 (2021)**. 1 GeV 以上研究正在进行;
- $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ , BAM206;
- $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0(\pi^0)$ , BAM271;
- Transition Form Factors:
  - $\pi^0$ : BAM283;
  - $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^+\pi^-$ , BAM378;
  - $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0\pi^0$ ;
  - $\gamma\gamma^* \rightarrow \eta, \eta'$ .

# 任务4: Bose-Einstein关联测量

## • 实验数据:

大数据样本, 获得大统计量多 $\pi$ 和K样本, 现有2.125 GeV和J/ $\psi$ 数据可用。

## • 事例选择:

~ 同种玻色子对作为信号事例, 不同玻色子对作为本底。

~ 两 $\pi$ 关联: 可选事例 $\pi^+\pi^+$ 或 $\pi^+\pi^-\pi^0$ , 信号 $\pi^+\pi^+$ 和 $\pi^-\pi^-$ , 本底 $\pi^+\pi^-$ 或 $\pi^+\pi^0$ 。

~ 三 $\pi$ 关联: 可选事例 $\pi^+\pi^+\pi^-\pi^-\pi^0$ , 信号 $\pi^+\pi^+\pi^+$ , 本底 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 。丢失事例 $\pi^+\pi^+\pi^-\pi^0$ 也可用。

## • 关联函数(理论参数化)

~ 两体关联:  $C_2(p_1, p_2) = \frac{N^{2\pi}}{N^{BG}} = c[1 + \lambda \exp[-(RQ)^2]]$   $Q^2 = (p_1 - p_2)^2$

~ 三体关联:  $C_3(p_1, p_2, p_3) = \frac{N^{3\pi}}{N^{BG}} = c[1 + \lambda \sum_{i>j} \exp[-(RQ_{ij})^2]]$   $Q_{ij}^2 = (p_i - p_j)^2$

其它的高能实验采用多种不同参数化形式

## • 关联函数(实验测量)

~ 两体关联:  $C_2(p_1, p_2) = \rho_2(p_1, p_2) - \rho_1(p_1)\rho_1(p_2)$

~ 三体关联:  $C_3(p_1, p_2, p_3) = \rho_3(p_1, p_2, p_3)$

## • 末态修正(唯象模型)

$$\begin{aligned} & - \rho_1(p_1)\rho_2(p_2, p_3) - \rho_1(p_2)\rho(p_3, p_1) - \rho_1(p_3)\rho_2(p_1, p_2) \\ & + 2\rho_1(p_1)\rho_1(p_2)\rho_1(p_3) \end{aligned}$$

~ 库伦修正 (比较明确)

其中实验测量:

$$\rho_1(p_i) = \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d^3p_i}$$

$$\rho_2(p_i, p_j) = \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d^3p_i d^3p_j}$$

~ 强作用修正 (文献采用几种唯象模型)

## • 拟合 $\rightarrow$ 强子源时空特征参数

目标: 低能区首次BE测量



# BEC measurement

- Check double ratio  $R(Q)=C^{\text{data}}(Q)/C^{\text{MC}}(Q)$ , where  $C(Q)=\rho(Q)/\rho_0(Q)$ ,  $Q^2=-(\mathbf{q}_1-\mathbf{q}_2)^2$ , signal  $\rho(Q)$  from like-sign pair,  $\rho_0(Q)$  reference;
- Feasibility study submitted to CPC;
- Memo on  $\pi^\pm\pi^\pm$  BEC effect finished.

Chinese Physics C Vol. xx, No. x (2024) xxxxxx

## Principle and prospect of Bose-Einstein correlation study at BESIII

Hu Hai-Ming(胡海明)<sup>1,1)</sup> Huang Guang-Shun(黄光顺)<sup>2,2)</sup>

<sup>1</sup> Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

<sup>2</sup> University of Science and Technology of China, Hefei, China

**Abstract:** One of the methods to obtain the characteristic parameters of hadron production source is to measure the Bose-Einstein correlation functions. We present some basic concepts and the related formulas about the Bose-Einstein correlation based on the Lund model from the angle of experiment, and analyse Mont Carlo simulations with Lund model generator in 2 - 3 GeV energy region. According to these feasibility studies, we learn some important characteristics of Bose-Einstein correlation functions, which provide helpful enlightenments in the experiment data measurement. Using the data samples with large statistics collected with BESIII, the measurements of Bose-Einstein correlation functions are proposed, and the experiment precisions of the hadron source radius incoherent parameter are expected at a few percent level.

**Key words:** Hadron source, Bose-Einstein correlation, boson, wave function symmetry, Monte Carlo simulation.

**PACS:** 13.66.-a, 13.20.Gd, 12.15.Lk

## BESIII Analysis Memo

BAM-xxx

July 13, 2024

### Bose-Einstein Correlations of two same-sign charged pions in $e^+e^-$ collisions at BESIII

Tiantian Lei<sup>a</sup>, Yijing Wang<sup>a</sup>, Dong Liu<sup>a,b</sup>, Bingxin Zhang<sup>c</sup>, Frank Maas<sup>b,d</sup>, Haiming Hu<sup>c</sup>, and Guangshun Huang<sup>a</sup>

<sup>a</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, China

<sup>b</sup>Helmholtz Institute Mainz, Mainz, Germany

<sup>c</sup>Institute of High Energy Physics, Beijing, China

<sup>d</sup>GSI, Darmstadt, Germany





# 理论研究进展

1. Deciphering the light vector meson contribution to the cross sections of  $e^+e^-$  annihilations into the open-strange channels through a combined analysis, Jun-Zhang Wang, Li-Ming Wang, Xiang Liu, Takayuki Matsuki, Phys.Rev.D 104, 054045 (2021).
2. Charmonium decays into  $\{\Lambda_c\bar{\Lambda}_c\}$  pair governed by the hadronic loop mechanism, Ri-Qing Qian, Jun-Zhang Wang, Xiang Liu, Takayuki Matsuki, Phys.Rev.D 104, 094001 (2021).
3. Detecting the polarization in  $\chi_{cJ} \rightarrow \varphi\varphi$  decays to probe hadronic loop effect, Qi Huang, Jun-Zhang Wang, Rong-Gang Ping, and Xiang Liu, Phys. Rev. D 103, 096006 (2021).
4. Glueball content of  $\eta_c$ , Renqiang Zhang, Wei Sun, Ying Chen, Ming Gong and Zhaofeng Liu, Phys. Lett. B 827, 136960 (2022).
5. Annihilation diagram contribution to charmonium masses, Renqiang Zhang, Wei Sun, Feiyu Chen, Ying Chen, Ming Gong, Xiangyu Jiang, Zhaofeng Liu, Chin. Phys. C 46, 043102 (2022).
6. Radiative Decay Width of  $J/\psi \rightarrow \gamma\eta_{(2)}$  from  $N_f = 2$  Lattice QCD, X. Jiang, F. Chen, Y. Chen, M. Gong, N. Li, Z. Liu, W. Sun, and R. Zhang, Phys. Rev. Lett. 130, 061901 (2023).
7.  $1^-+$  Hybrid in  $J/\psi$  Radiative Decays from Lattice QCD, Feiyu Chen, Xiangyu Jiang, Ying Chen, Ming Gong, Zhaofeng Liu, Wei Sun, Chunjiang Shi, Phys. Rev. D 107, 054511 (2023)
8. Toy model to understand the oscillatory behavior in timelike nucleon form factors, R.Q. Qian, Z.W. Liu, X. Cao and X. Liu, Phys. Rev. D (Letter) 107, L091502 (2023).
9. Symmetry analysis of charmonium two-body decay, X.H. Mo, P. Wang, and J.Y. Zhang Phys. Rev. D 107, 094009 (2023)
10. Glueballs at physical pion mass, F. Chen, X. Jiang, Y. Chen, K.-F. Liu, W. Sun, Y.-B. Yang, Chin. Phys. C 47, 063108 (2023).
11.  $\eta$ -glueball mixing from  $N_f = 2$  lattice QCD, X. Jiang, W. Sun, F. Chen, Y. Chen, M. Gong, Z. Liu, R. Zhang, Phys. Rev. D 107, 094510 (2023).
12. Radiative transition decay width of  $\psi_2(3823) \rightarrow \gamma\chi_{c1}$  from lattice QCD, Ning Li, Yan Gao, Feiyu Chen, Ying Chen, Xiangyu Jiang, Chunjiang Shi, and Wei Sun, Phys. Rev. D 014513 (2024)



# 学术交流



## R值-QCD强子结构与软件和计算研讨会



2021年7月26日-31日 中国·云南

# 轻味矢量介子理论与实验联合研讨会



# BESIII实验上粲强子、QCD及新物理研讨会

2022年8月于兰州



# 第七届R值测量与QCD实验研究讨论会

2023. 3. 30-4. 2, 中山大学珠海校区



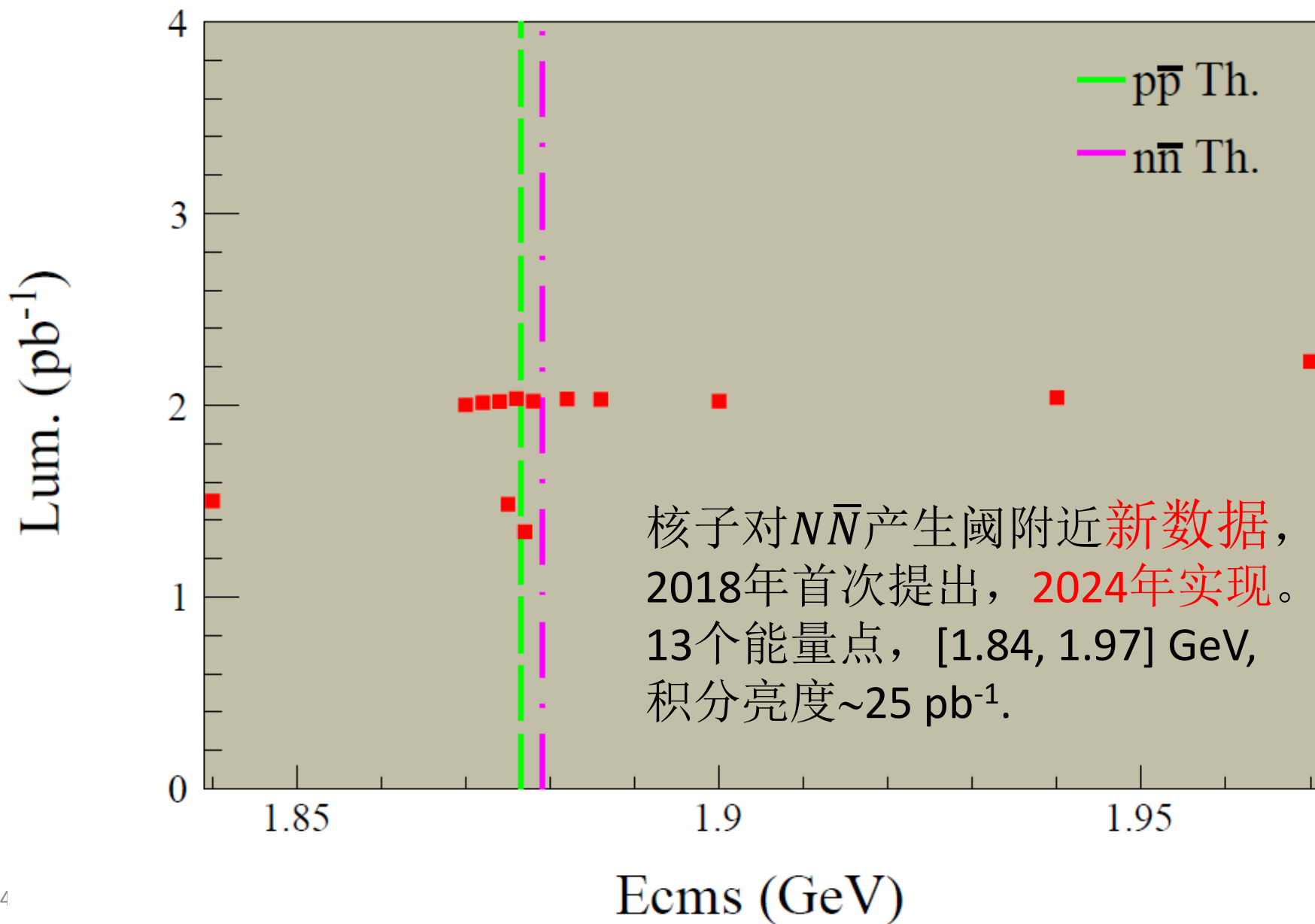


# 课题考核指标完成情况

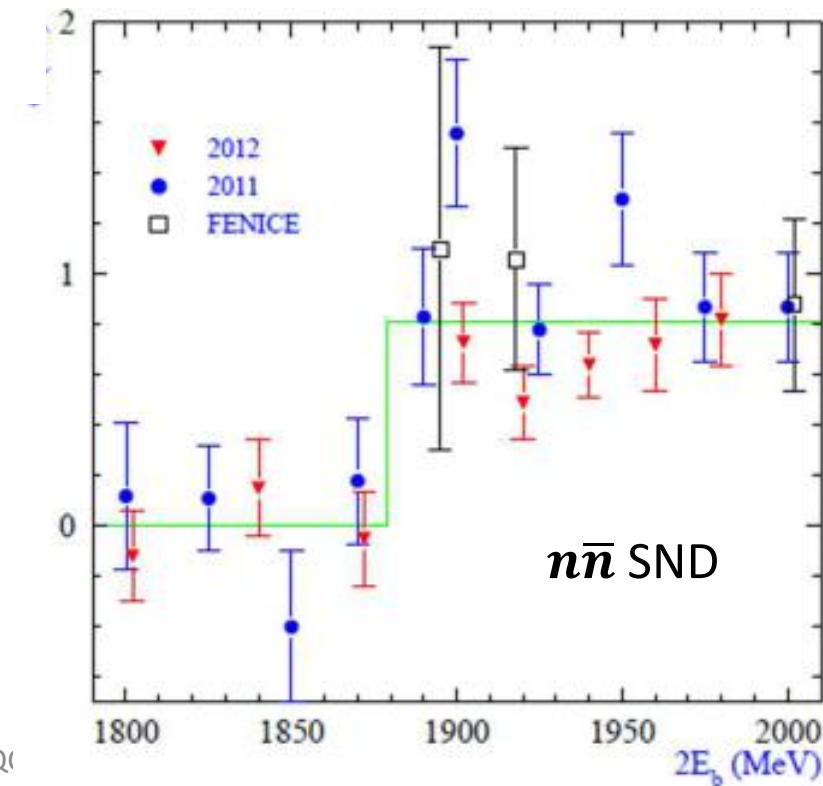
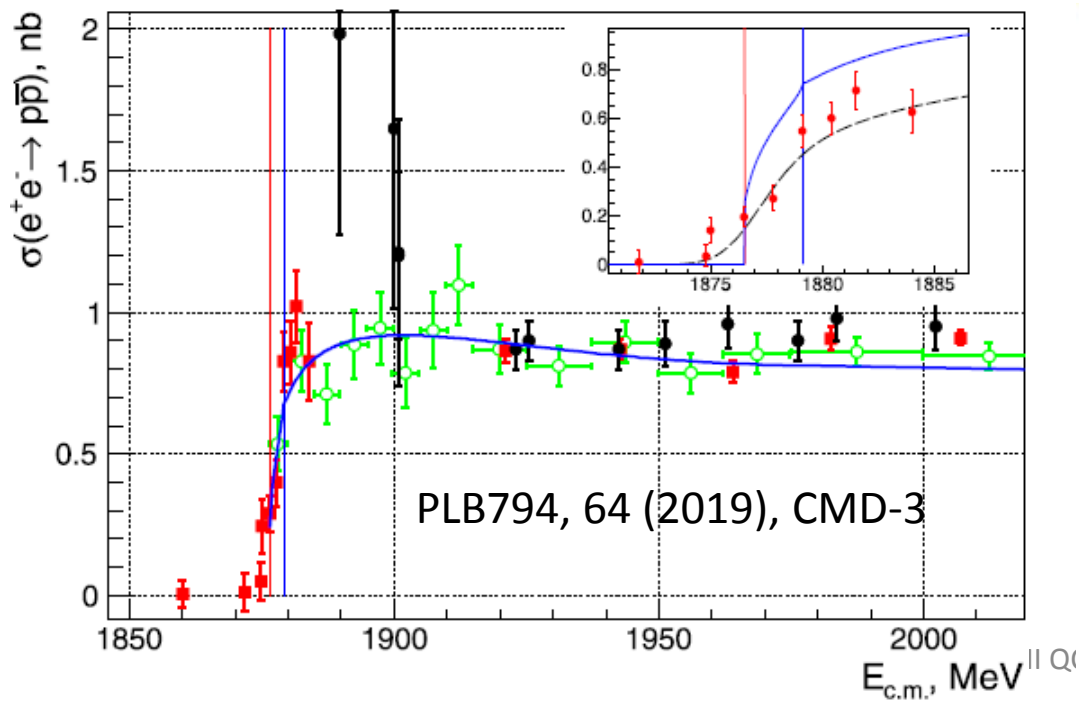
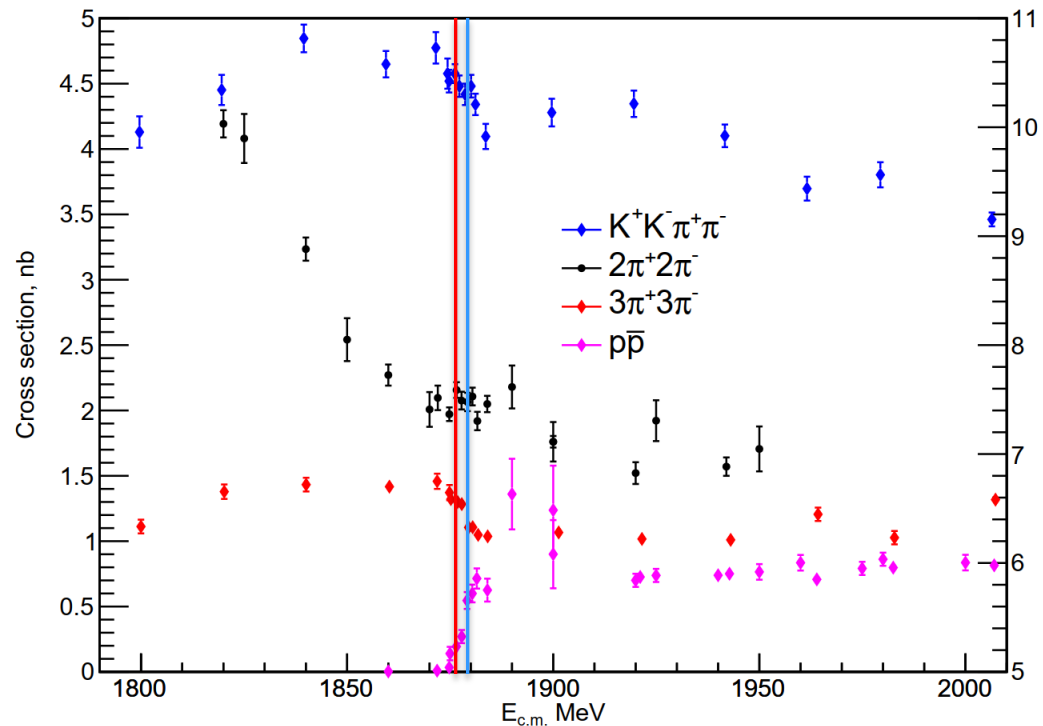


成果名称	成果类型	考核指标				考核方式(方法)及评价手段	当前指标状态
		指标名称	立项时已有指标值/状态	中期指标值/状态	完成时指标值/状态		
1: R值测量	<input type="checkbox"/> 新理论 <input type="checkbox"/> 新原理 <input type="checkbox"/> 新产品 <input type="checkbox"/> 新技术 <input checked="" type="checkbox"/> 新方法 <input type="checkbox"/> 关键部件	单举和遍举R值测量: 论文数量	单举测量 BESII和 BINP已发表结果; 遍举研究未开展过	完成单举R值测量, 精度可达3%	得到精确的R值, 精度达到3%	正式文章发表	单举测量结果已经发表, 精度好于3%
2: 重子形状因子	<input type="checkbox"/> 数据库 <input type="checkbox"/> 软件 <input type="checkbox"/> 应用解决方案 <input type="checkbox"/> 实验装置/系统 <input type="checkbox"/> 临床指南/规范 <input type="checkbox"/> 工程工艺 <input type="checkbox"/> 标准 <input checked="" type="checkbox"/> 论文 <input type="checkbox"/> 发明专利 <input type="checkbox"/> 其他	重子形状因子: 论文数量	$p\bar{p}$ 、 $\bar{\Lambda}$ 已发表	完成2项重子对结果	重子八重态全覆盖, 给出国际最精确结果	正式文章发表	完成了 $n$ 、 $\Xi$ 、 $\Sigma^+/\Sigma^-$ 、 $\Xi^0$ 、 $\Sigma^0$ 测量, 发表文章9篇
3: 介子形状因子	<input type="checkbox"/> 发明专利 <input type="checkbox"/> 其他	介子形状因子: 论文数量	BESIII上已有一些工作发表	完成2个介子道截面与形状因子测量	完成更多(4-6)个介子道截面与形状因子测量, 给出国际最精确结果	正式文章发表	完成 $\omega\eta/\omega\pi^0$ 、 $\phi\eta$ 、 $\eta'\pi^+\pi^-$ 、 $K_S K_L$ 、 $\omega\pi^0\pi^0$ 等测量, 发表文章10篇
4: BEC关联函数		BEC关联函数: 论文数量	低能区尚无研究发表	完成BEC测量算法开发和事例筛选	完成 $(\pi\pi)$ BEC测量, 给出低能区首次测量	正式文章发表	已投稿1篇, 待内部评审1篇

# One more thing...



# 提供阈值效应 研究新机遇!







## 国家自然科学基金委重点项目

# 北京谱仪BESIII上强子产生截面 测量和强子结构研究

黄光顺、周小蓉 中国科学技术大学

胡海明、张丙新 中科院高能物理所

2021.1.1 – 2025.12.31

# 总结

- QCD强子产生研究进展良好，**基本完成任务**；
- 2.23–3.67GeV能区R值精度好于3%，发表在PRL；
- 重子对近阈产生研究及形状因子测量取得很好结果，发表在Nature Physics、PRL、National Science Review等；
- 轻介子形状因子测量及新共振态研究发表多篇文章；
- Bose-Einstein关联函数测量得到初步结果，待内部评审，方法性研究已投稿。