



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”
项目研讨会

课题3： QCD强子产生研究

黄光顺

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

2022.8.22-24, 兰州

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：

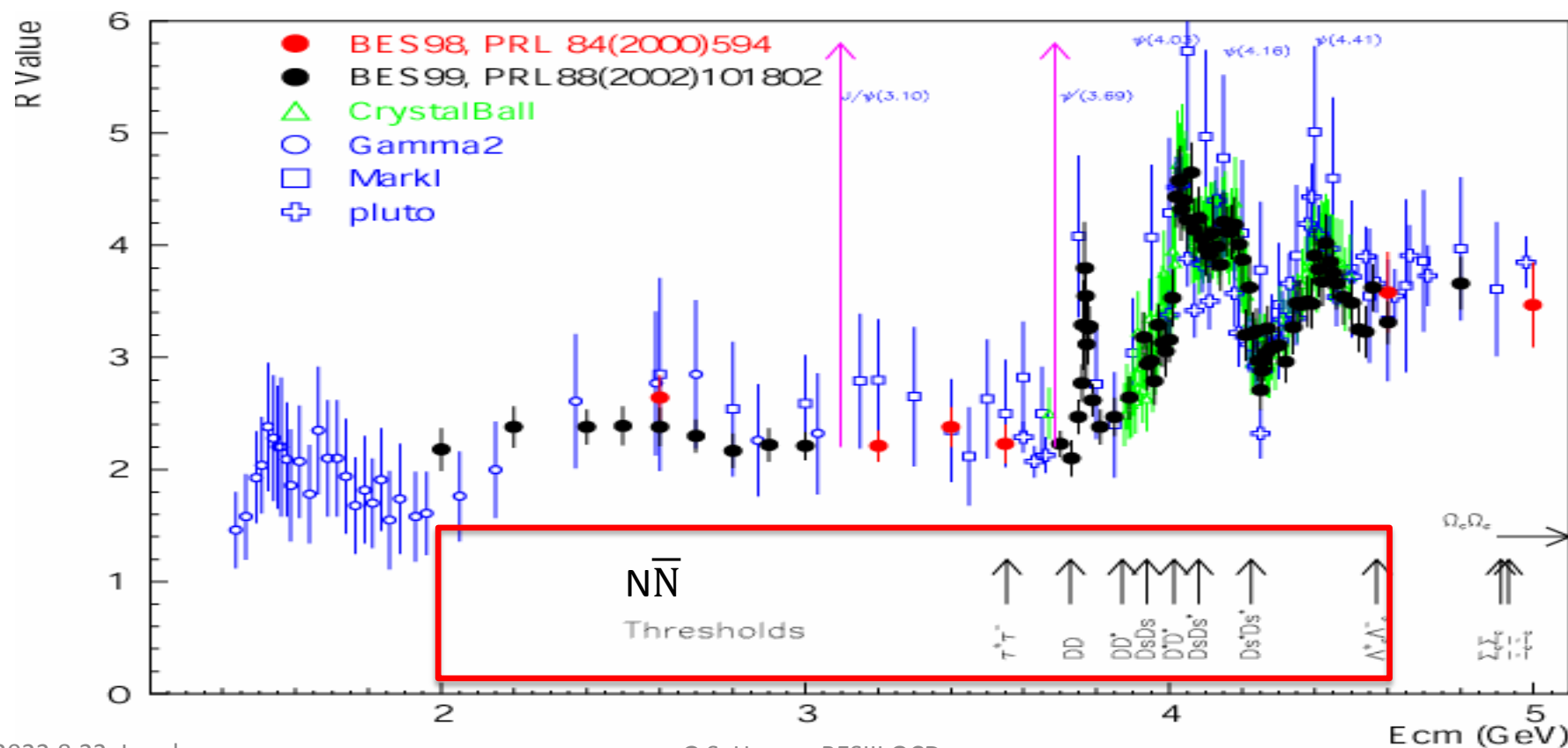
- 标准模型参数精确测量；
- 标准模型精确检验；
- 超越标准模型的新物理探索；
- 标准模型中QCD实验研究。

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；
- μ 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： τ 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！



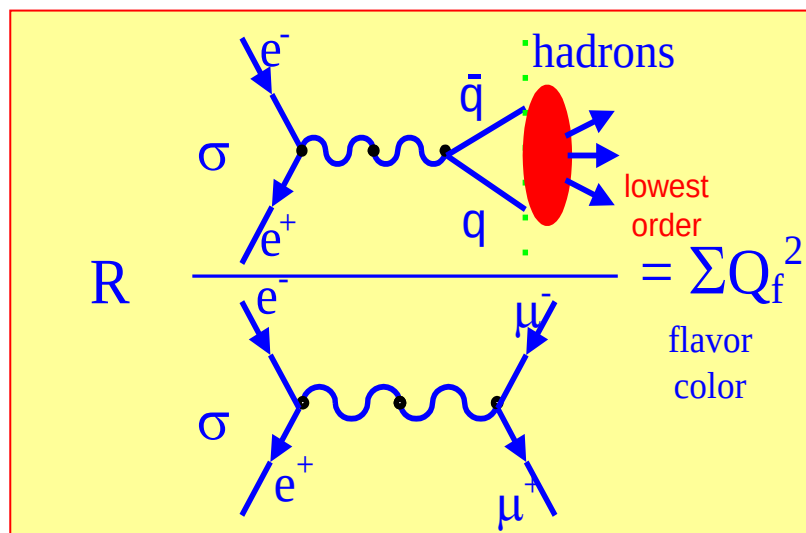
研究内容

- 2.0–4.6 GeV R值单举测量;
- 2.0 GeV R值遍举测量;
- 强子源时空特性研究;
- 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。

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

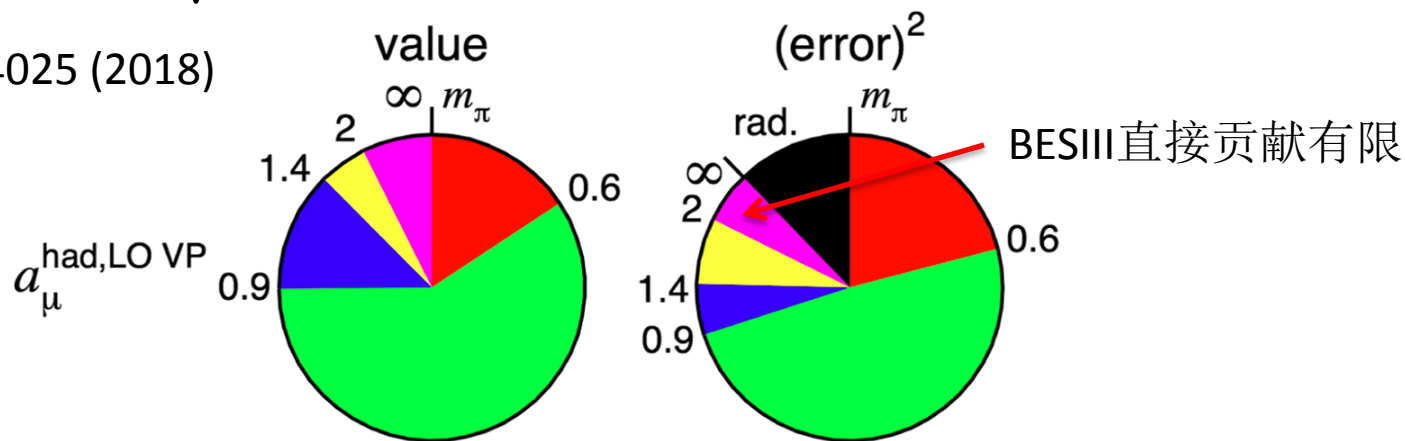
ϵ_{had} : 强子事例探测效率

δ : 辐射修正因子

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

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

Phys. Rev. D97, 114025 (2018)

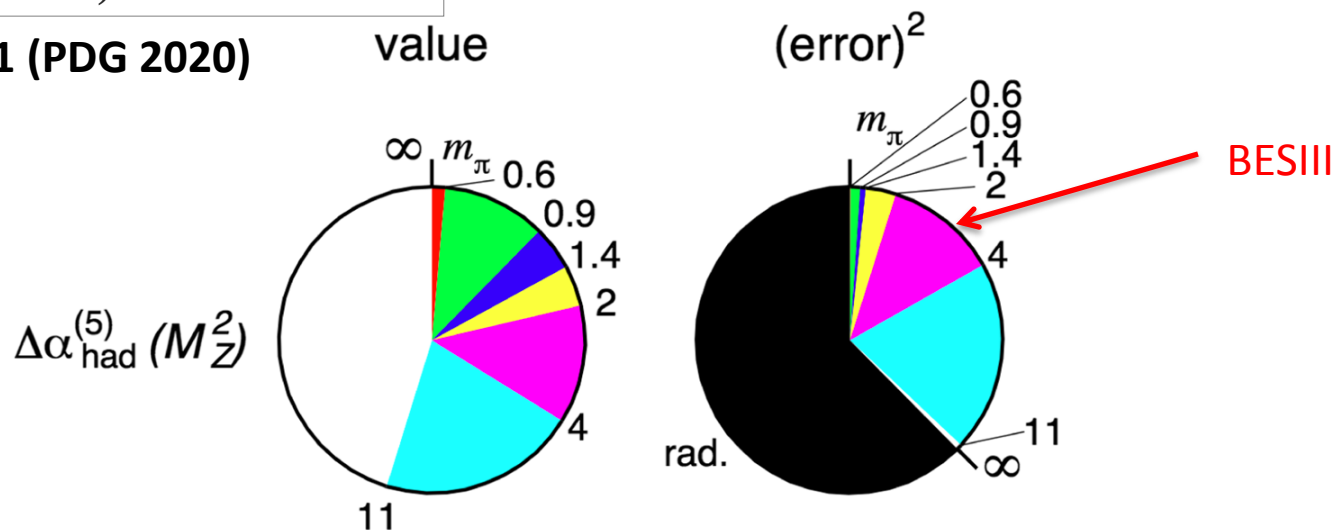


(a) Fractional contributions to $a_\mu^{\text{had, LO VP}}$.

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

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

PTEP 2020, 083C01 (PDG 2020)

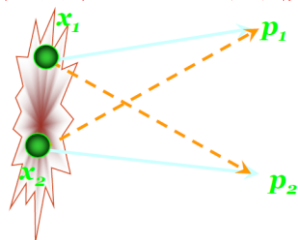


(b) Fractional contributions to $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(M_Z^2)$

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 π 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。

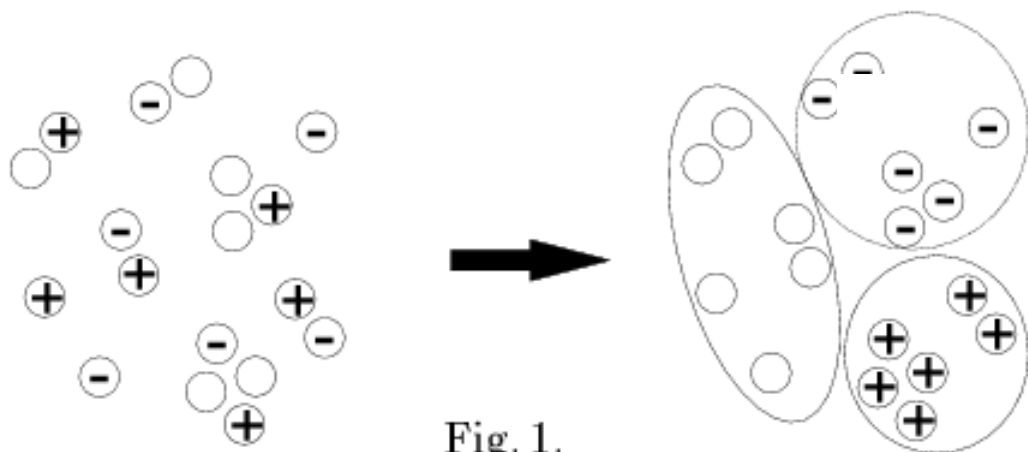
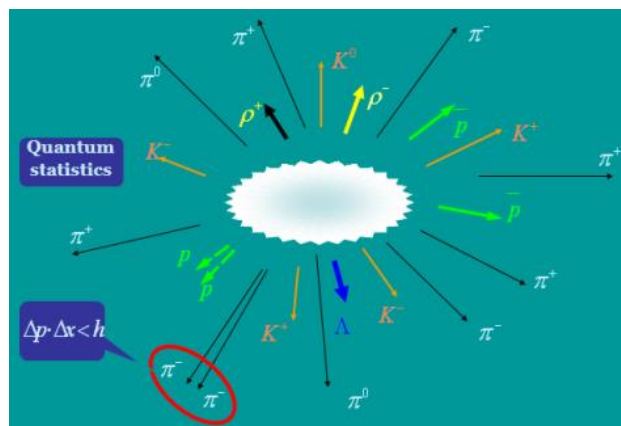
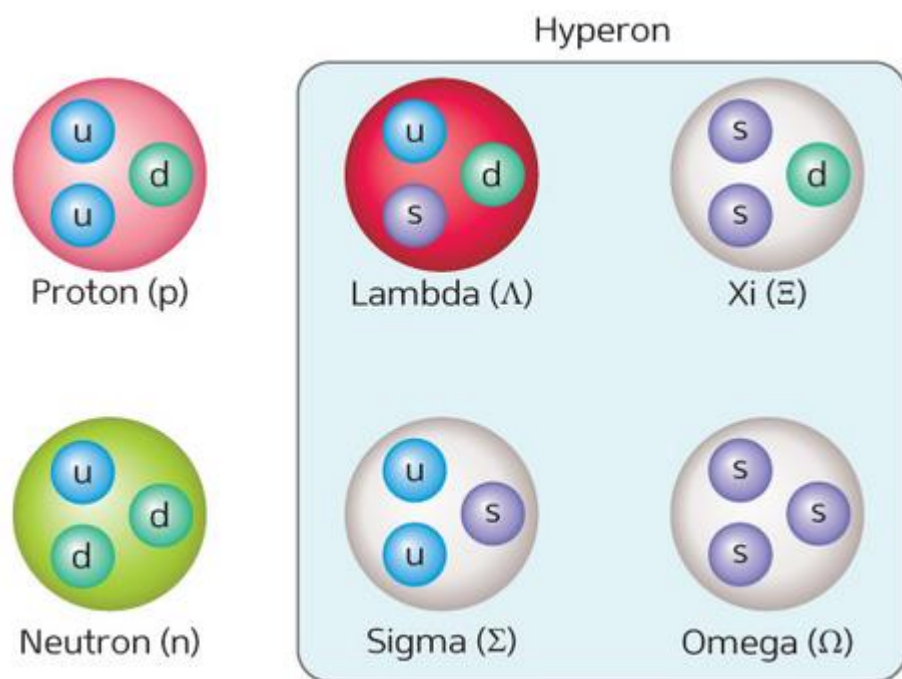


Fig. 1.

- 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

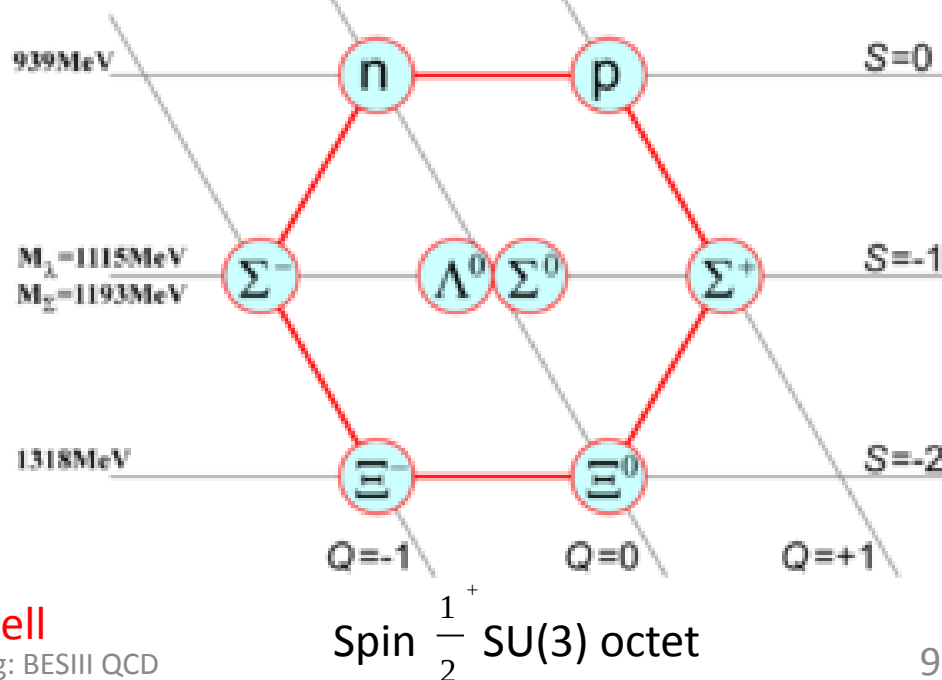
- $p\bar{p}$: PRD 91, 112004 (2015); PRL 124, 042001 (2020);
- $n\bar{n}$: Nature Physics 17, 1200 (2021);
- $\Lambda\bar{\Lambda}$: Phys. Rev. D 97, 032013 (2018);
- $\Sigma^+\bar{\Sigma}^-/\Sigma^-\bar{\Sigma}^+$: PLB814, 136110 (2021), $\Sigma^0\bar{\Sigma}^0$: PLB831, 137187 (2022);
- $\Xi^-\bar{\Xi}^+$: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



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

G.S. Huang: BESIII QCD

$\frac{1}{2}^+$ 八重态重子全覆盖!



重子对近阈产生行为研究

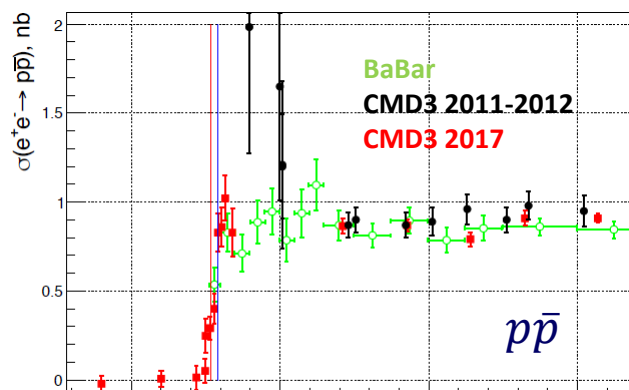
$\bar{p}p$	$\bar{\Lambda}\Lambda$	$\bar{\Sigma}^-\Sigma^+$	$\bar{\Sigma}^0\Sigma^0$	$\bar{\Sigma}^+\Sigma^+$	$\bar{\Xi}^0\Xi^0$	$\bar{\Xi}^+\Xi^-$	$\bar{\Omega}^+\Omega^-$	$\bar{\Lambda}_c^-\Lambda_c^+$
$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
$p\pi^-$	$p\pi^0$	$\Lambda\gamma$	$n\pi$	$\Lambda\pi^0$	$\Lambda\pi$	ΛK	$\Lambda\pi$	
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:

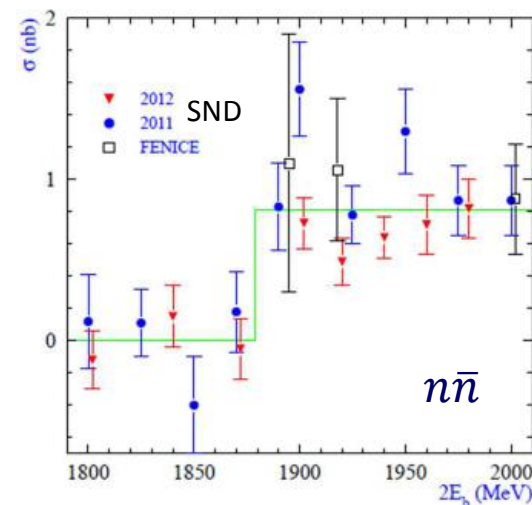
$$\sigma_{B\bar{B}}(m) = \frac{4\pi\alpha^2 C \beta}{3m^2} [|G_M(m)|^2 + \frac{1}{2\tau} |G_E(m)|^2]$$

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!

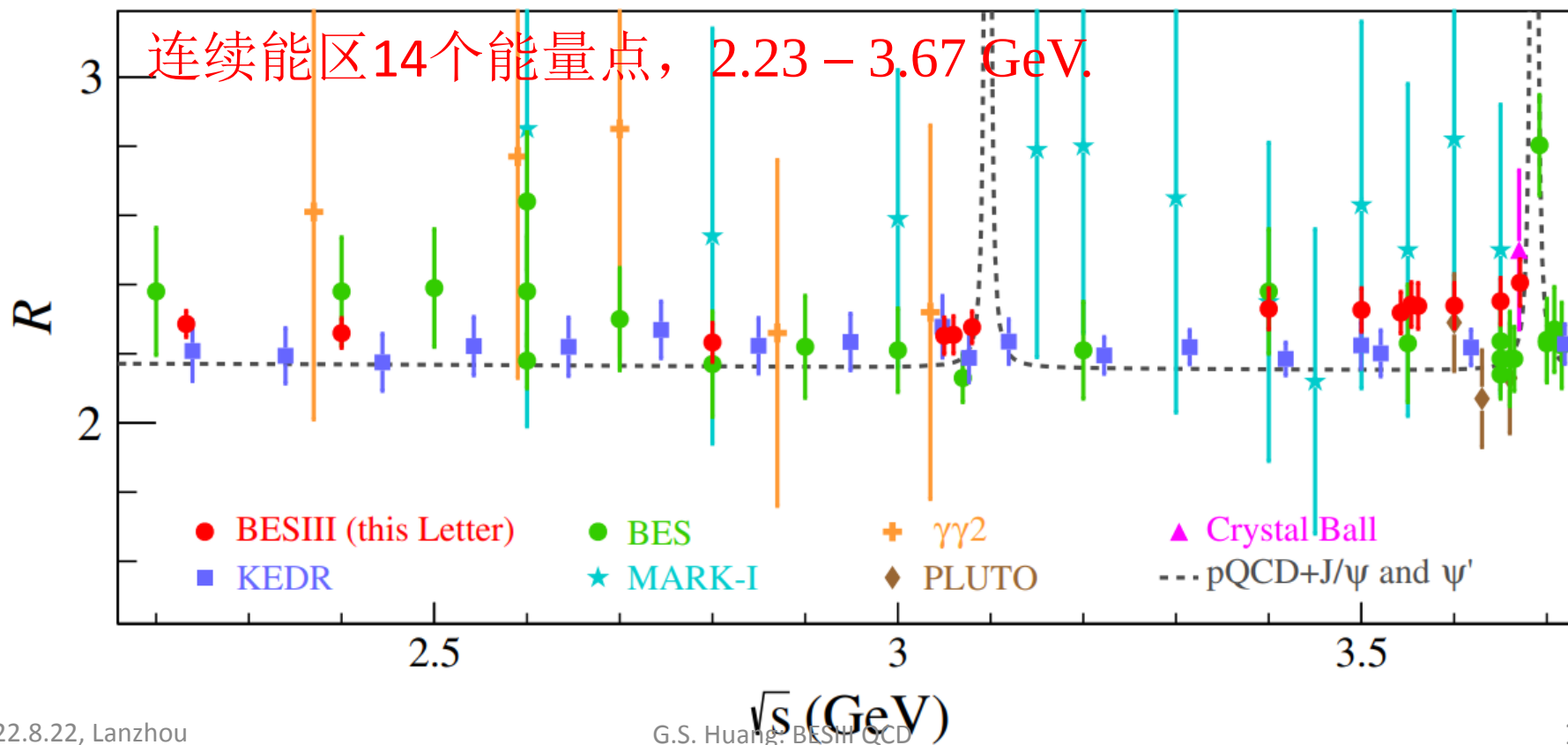


$p\bar{p}$ 、 $n\bar{n}$ 预期表现不同，问题在于后者精度太差！
其他重子对如何？



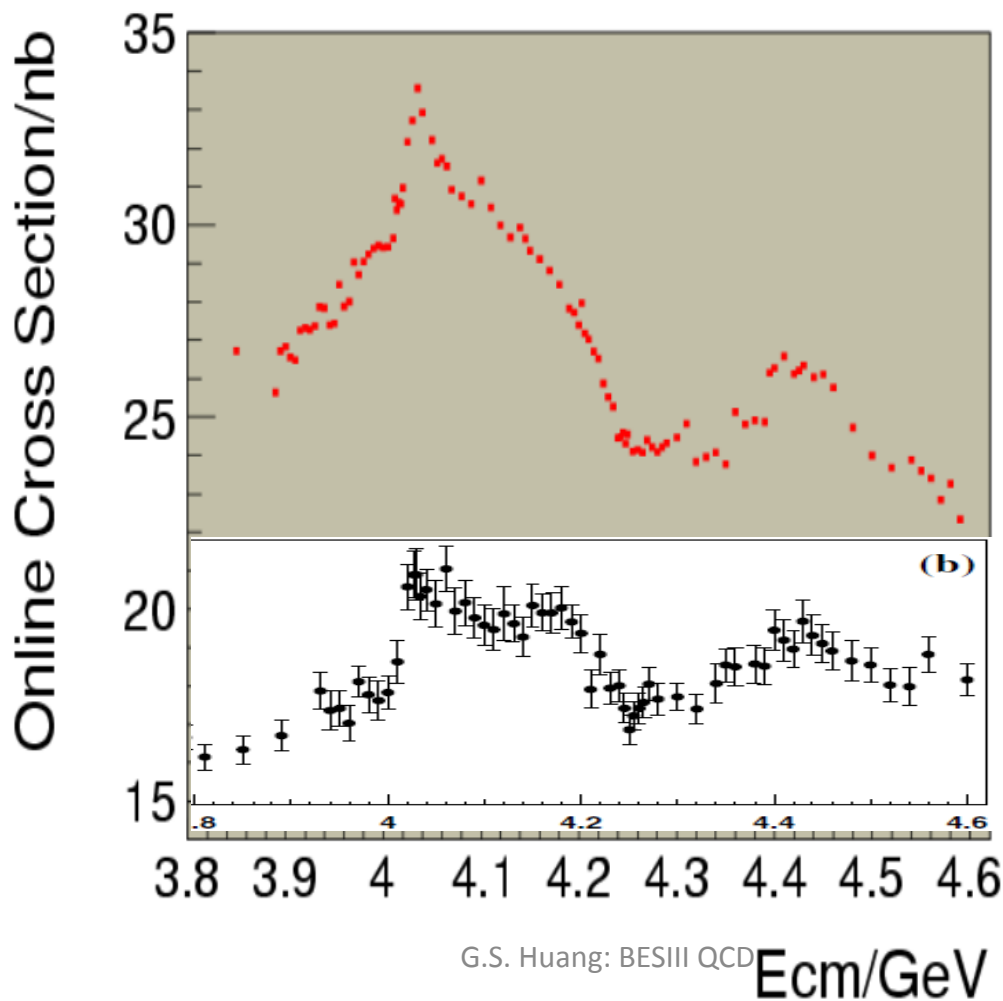
任务1: R值测量

- 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:

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

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:

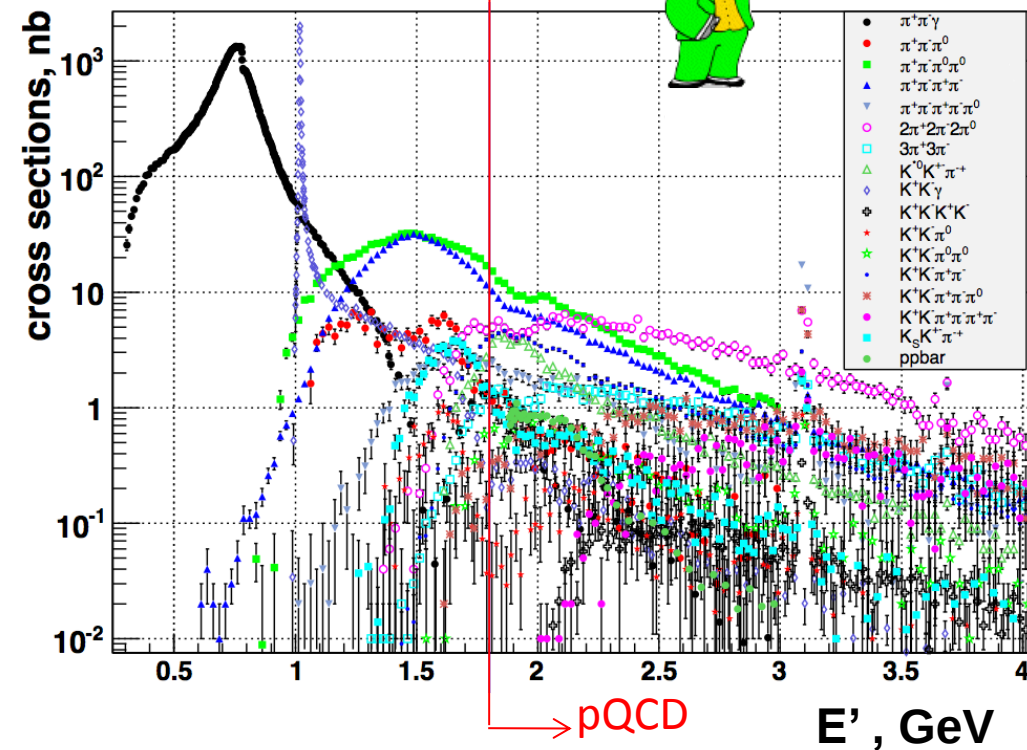
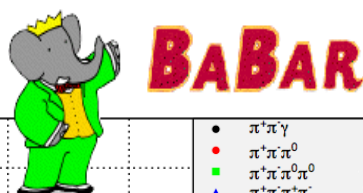
$$R = \frac{N_{had}}{\sigma_\mu^0 L \bar{\varepsilon} (1 + \bar{\delta})}$$

- 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
$\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$	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
$\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0(\eta \text{ excl})$	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
$2\pi^+2\pi^-\pi^0(\eta \text{ excl})$	5.1 ± 0.4	10.7 ± 0.8
$\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0(\eta \text{ excl, estimated})$	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 π (method 2)	1.94 ± 0.23	4.1 ± 0.5
KK2 π (method 2)	10.6 ± 0.4	22.1 ± 0.9
KK3 π ($\eta \text{ excl}$)	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
$p.\bar{p}$	0.84 ± 0.06	1.76 ± 0.12
$n.\bar{n}$	0.87 ± 0.22	1.8 ± 0.5
$\eta.\pi^+\pi^-$	0.144 ± 0.020	0.30 ± 0.04

任务2: Bose-Einstein关联测量

- 实验数据:

大数据样本, 获得大统计量多 π 和K样本, 现有2.125 GeV和J/ ψ 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 π 关联: 可选事例 $\pi^+\pi^+$ 或 $\pi^+\pi^-\pi^0$, 信号 $\pi^+\pi^+$ 和 $\pi^-\pi^-$, 本底 $\pi^+\pi^0$ 或 $\pi^-\pi^0$ 。

~ 三 π 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: $C_2(p_1, p_2) = \frac{N^{2\pi}}{N^{BG}} = c[1 + \lambda \exp[-(RQ)^2]] \quad Q^2 = (p_1 - p_2)^2$

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

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)

$$- \rho_1(p_1)\rho_2(p_2, p_3) - \rho_1(p_2)\rho(p_3, p_1) - \rho_1(p_3)\rho_2(p_1, p_2) \\ + 2\rho_1(p_1)\rho_1(p_2)\rho_1(p_3)$$

~ 库伦修正 (比较明确)

~ 强作用修正 (文献采用几种唯象模型)

其中实验测量:

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

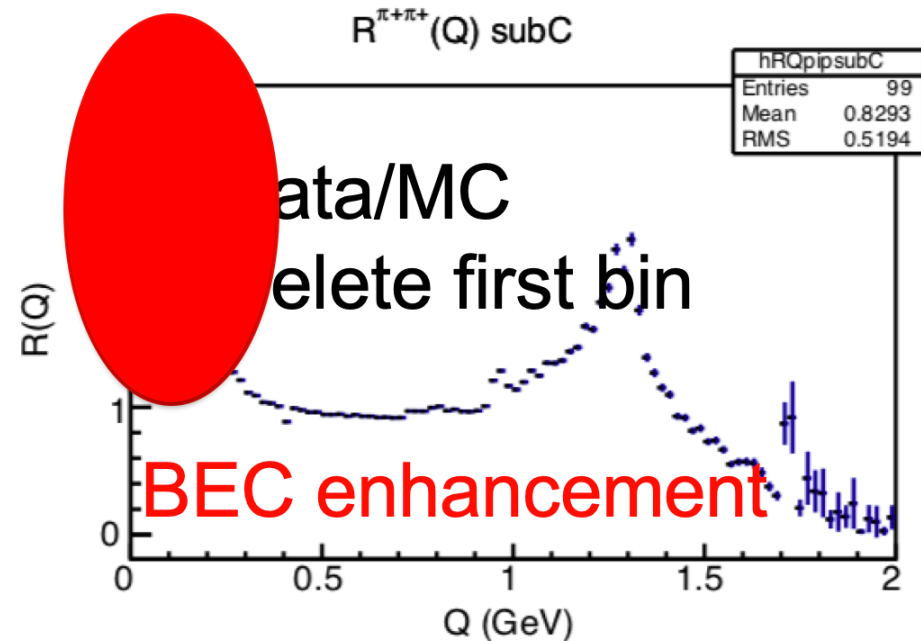
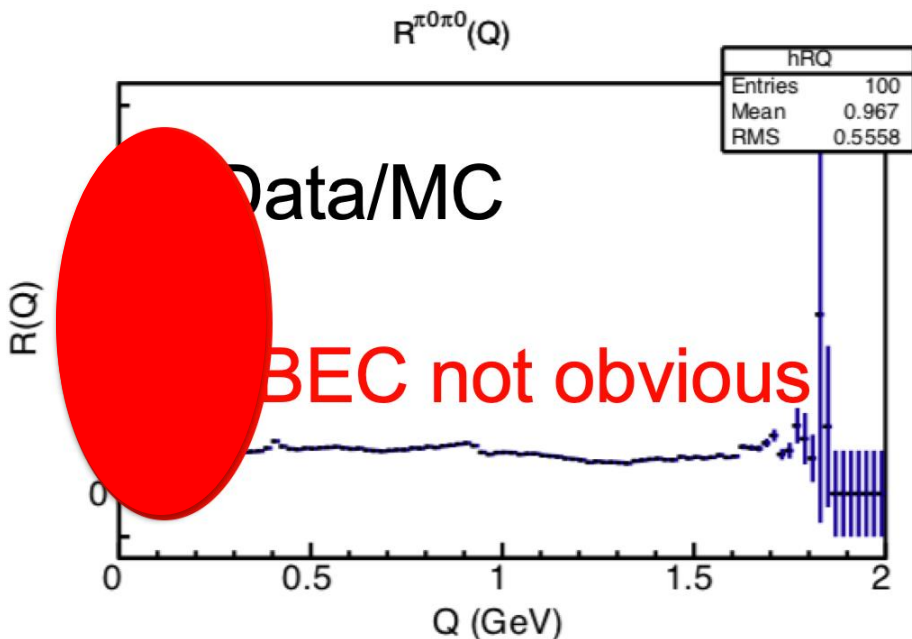
$$\rho_2(p_i, p_j) = \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d^3p_i d^3p_j}$$

目标: 低能区首次BE测量

- 拟合 $\rightarrow$ 强子源时空特征参数

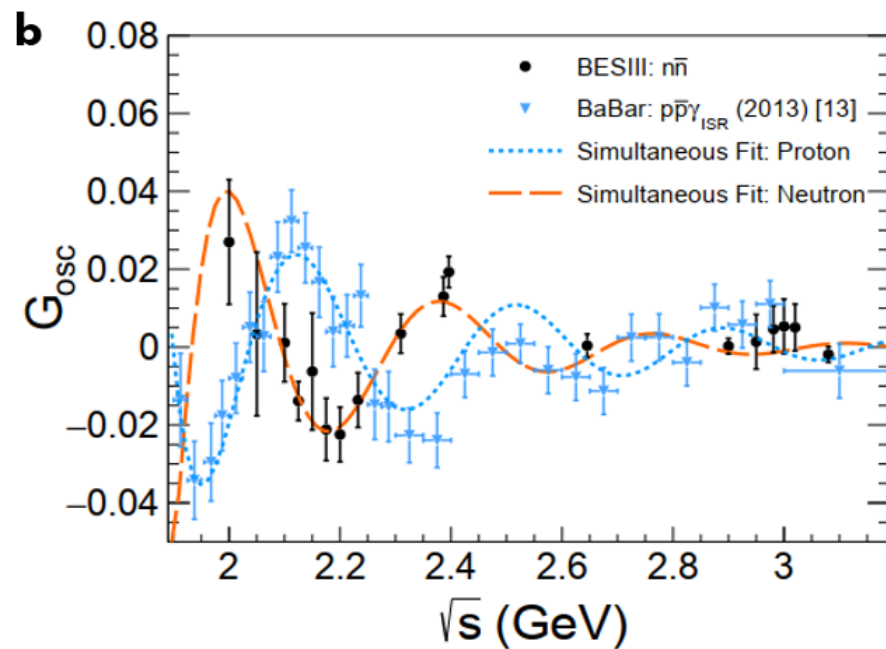
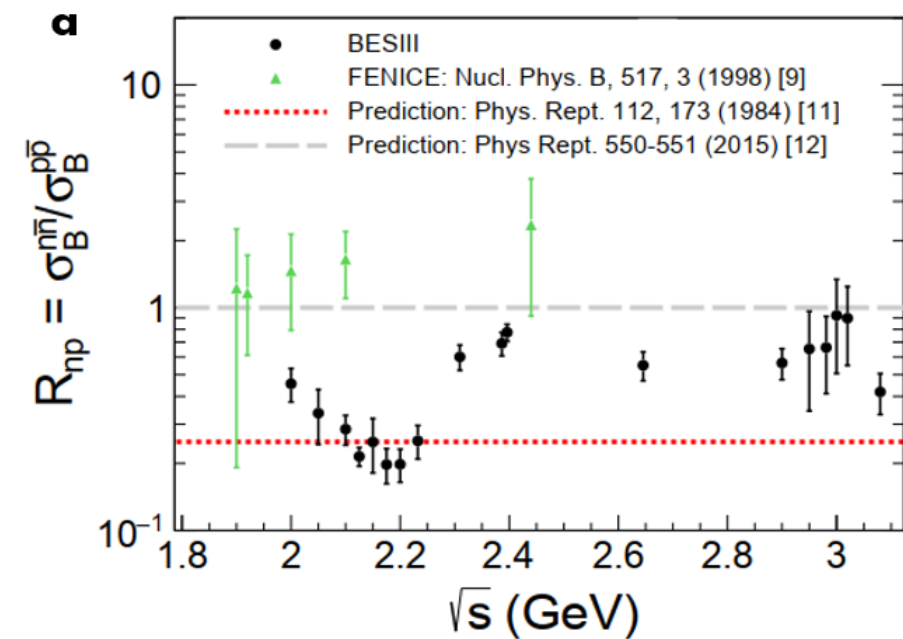
BEC effect at 2.125 GeV

- Check double ratio $R(Q) = C^{\text{data}}(Q)/C^{\text{MC}}(Q)$, where $C(Q) = \rho(Q)/\rho_0(Q)$, $Q^2 = -(q_1 - q_2)^2$, $\rho(Q)$ from like-sign pair, $\rho_0(Q)$ reference;
- $\pi^0\pi^0$, $\pi^+\pi^+$ distributions reported at BESIII Workshop in June 2022:



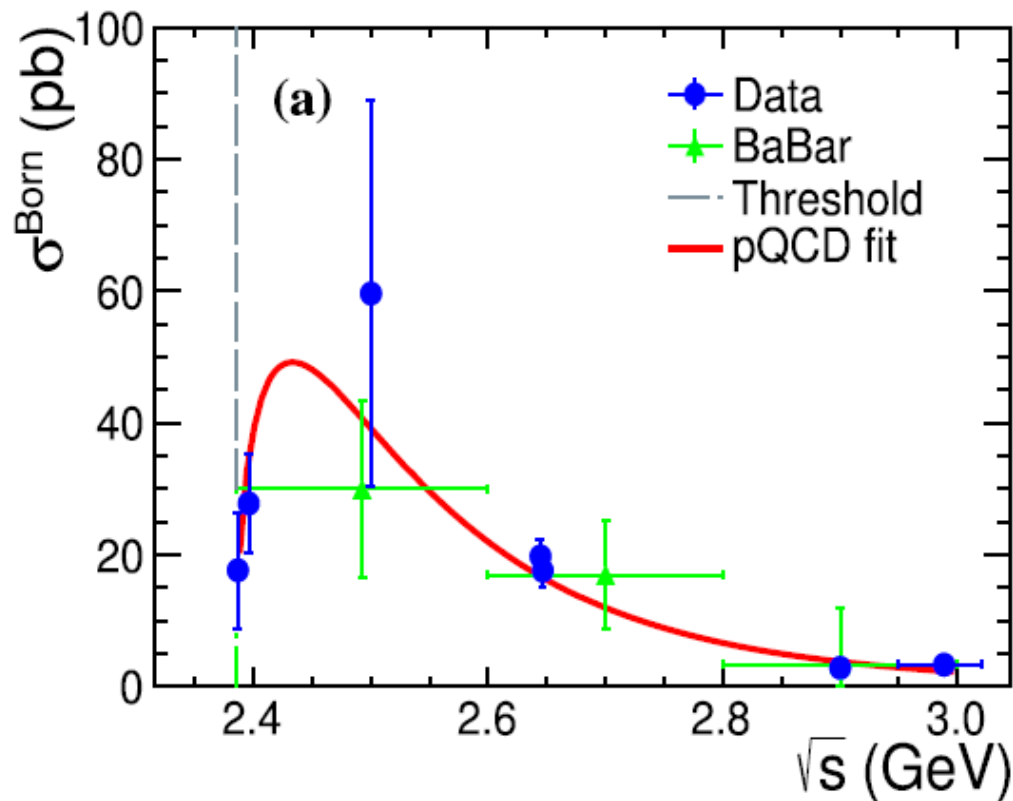
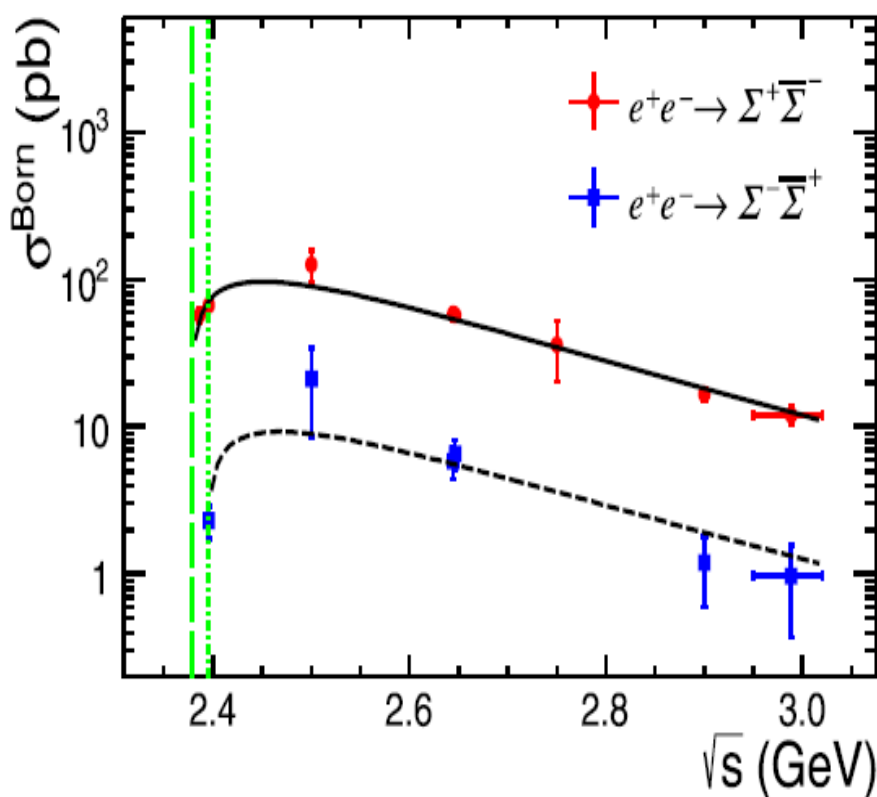
任务3：重子近阈产生与形状因子

- $n\bar{n}$: Nature Physics 17, 1200 (2021);
- 发现中子对产生截面小于质子对产生截面;
- 观测到中子电磁形状因子的周期性振荡结构。



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

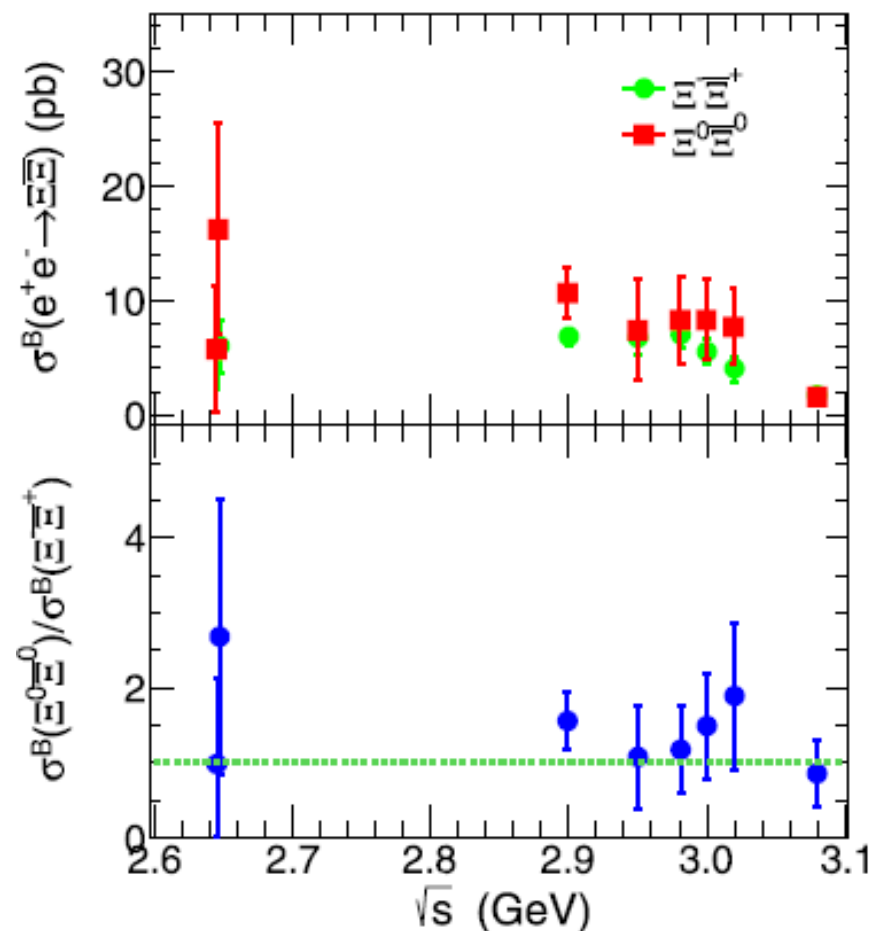
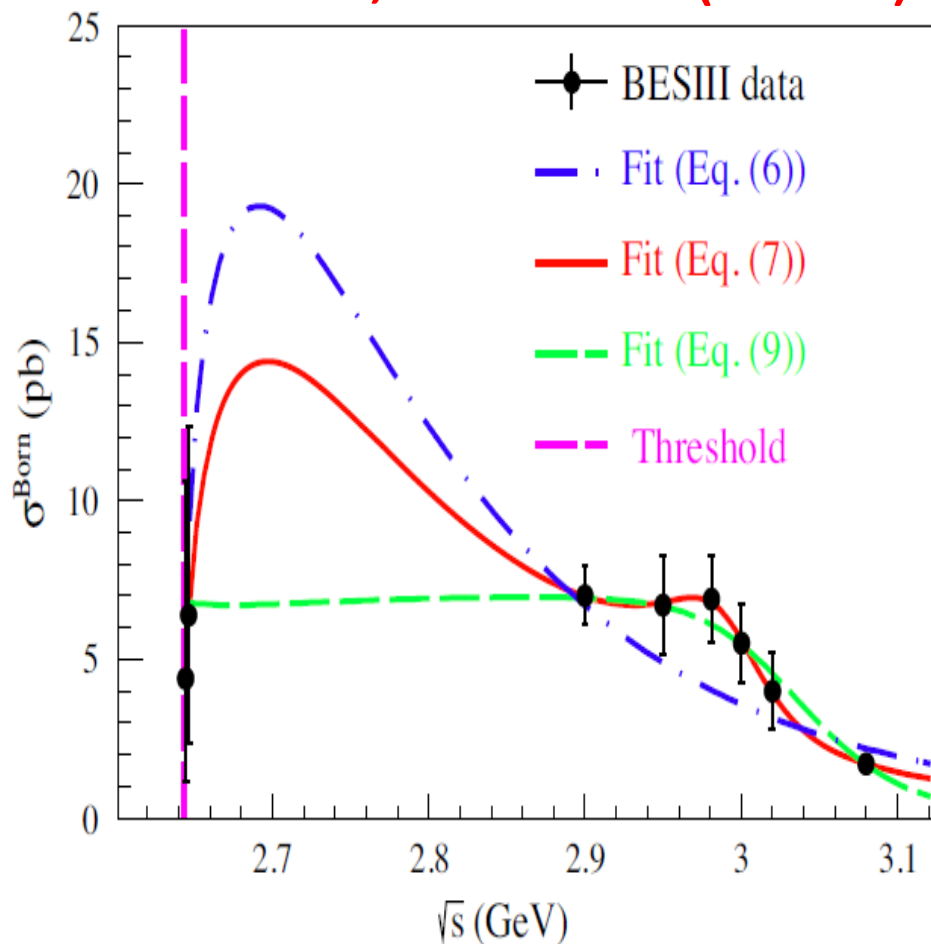
PLB814, 136110 (2021) PLB831, 137187 (2022)



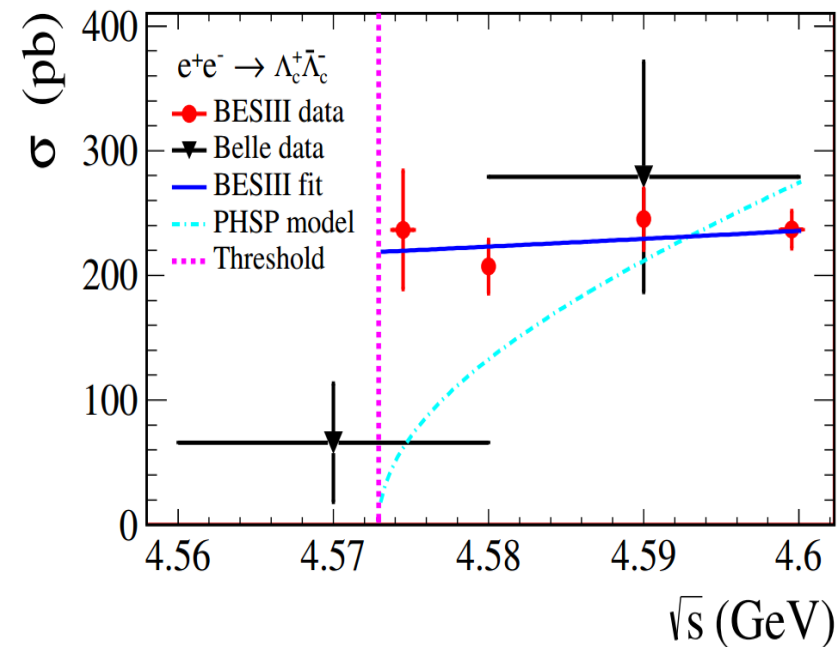
$\Xi^- \bar{\Xi}^+$ and $\Xi^0 \bar{\Xi}^0$

PRD103, 012005 (2021)

PLB820, 136557 (2021)



$\Lambda_c \bar{\Lambda}_c$ 截面及形状因子测量

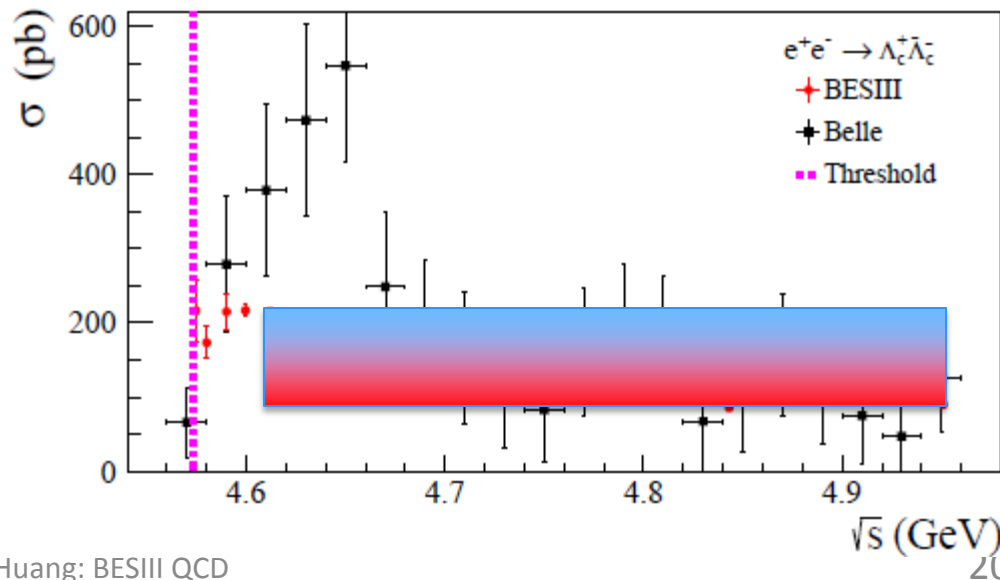


观测到近阈非零截面；
首次测量 Λ_c 形状因子；
Phys.Rev.Lett. 120,132001(2018) .

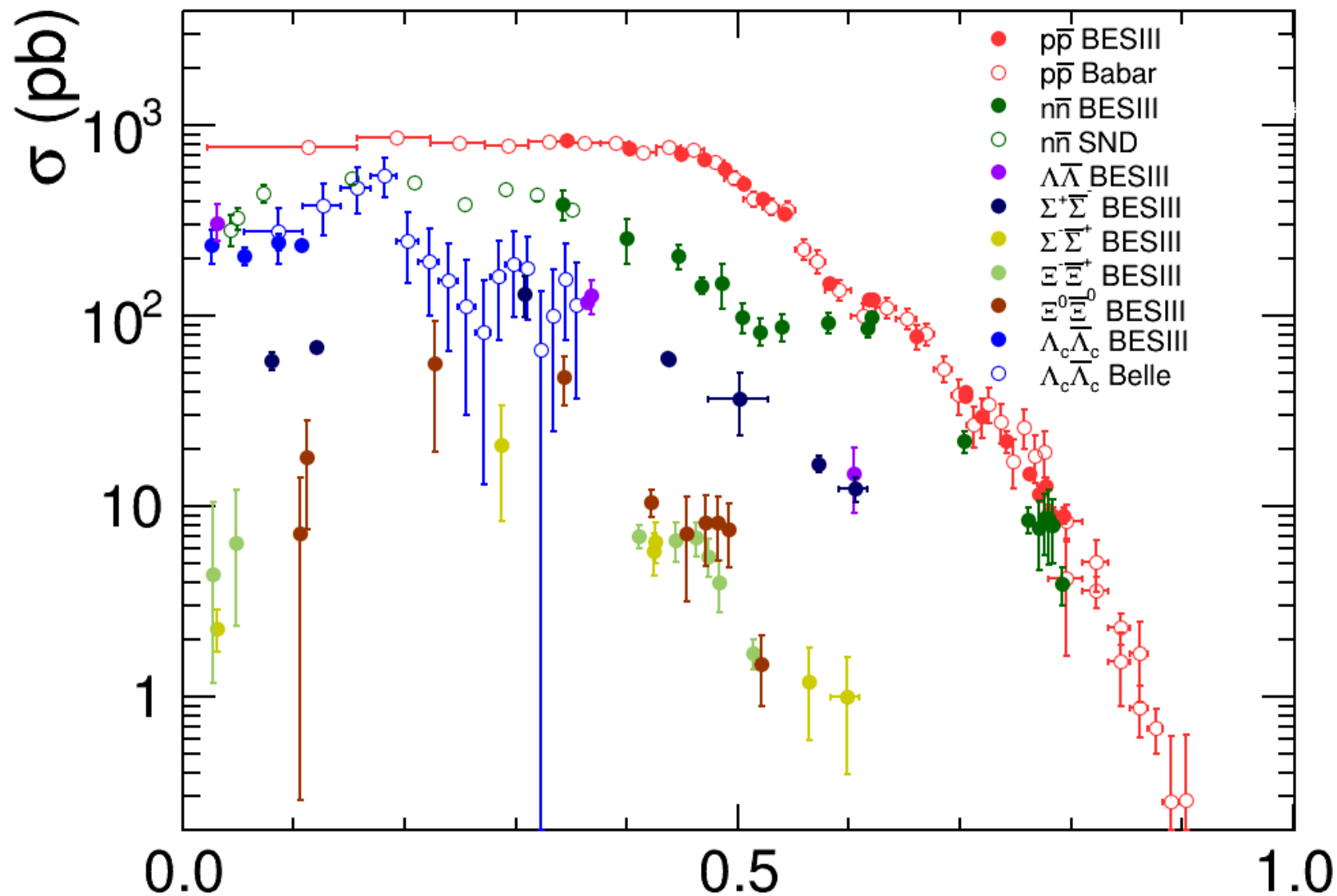
BEPCII能量已提升至 4.95 GeV:



更宽能量范围；
基本通过内部评审；
将尽快投稿。



重子对产生截面一览



National Science Review 8, nwab187 (2021)

$$\beta = \sqrt{1 - 4M_B^2/s}$$



重子结构专辑

9 papers in total, BESIII 7.

1. Proton Electromagnetic Form Factors in the Time-like Region through the Scan Technique, Symmetry 14, 231 (2022)
2. Time-like Proton Form Factors with Initial State Radiation Technique, Symmetry 14, 91 (2022)
3. Electromagnetic Structure of the Neutron from Annihilation Reactions, Symmetry 14, 298 (2022)
4. Experimental Review of Lambda Lambdabar Production, Symmetry 14, 144 (2022)
5. Electromagnetic Form Factors of Sigma Hyperons, Symmetry 14, 69 (2022)
6. Electromagnetic Form Factor of Doubly-Strange Hyperon, Symmetry 14, 65 (2022)
7. Production Mechanism of the Charmed Baryon Lambda_c, Symmetry 14, 5 (2022)

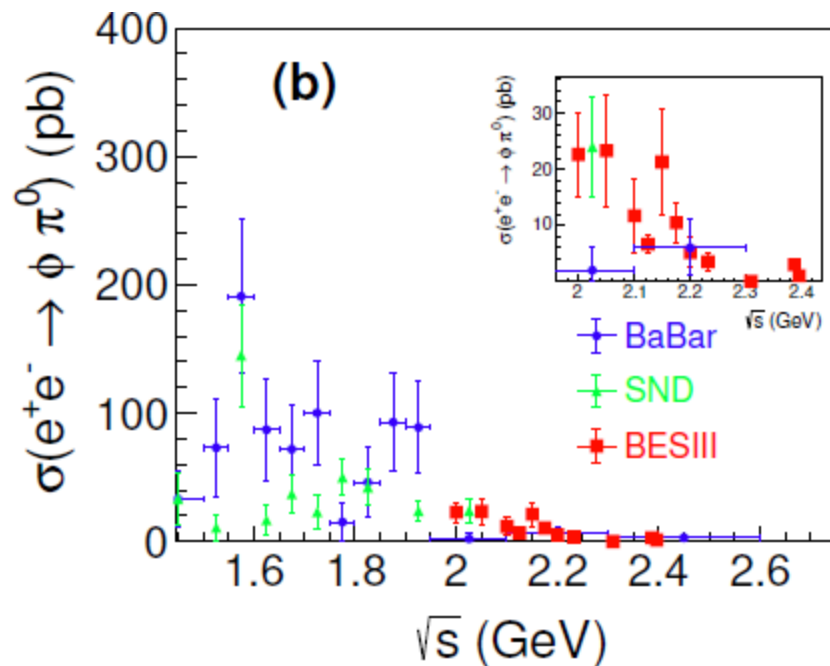
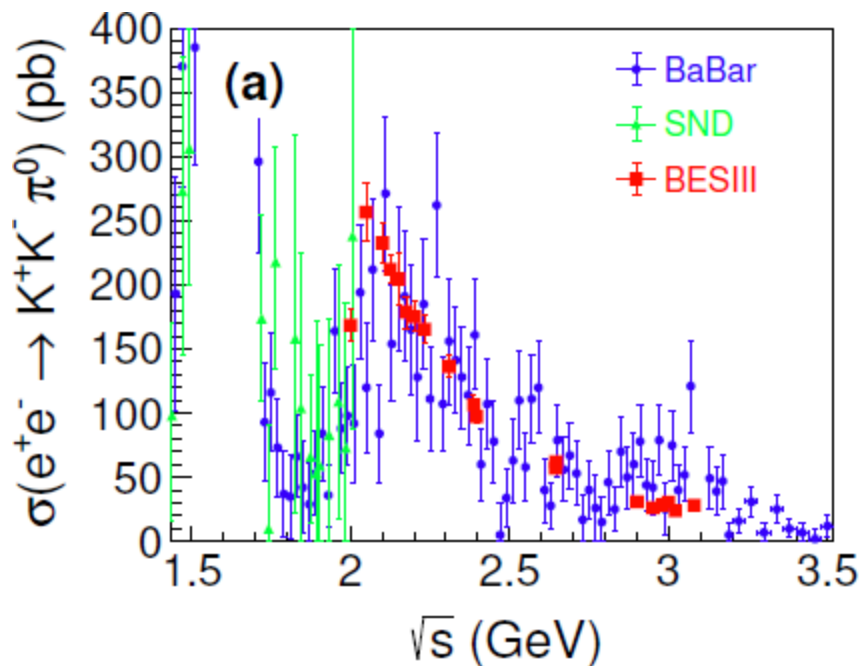


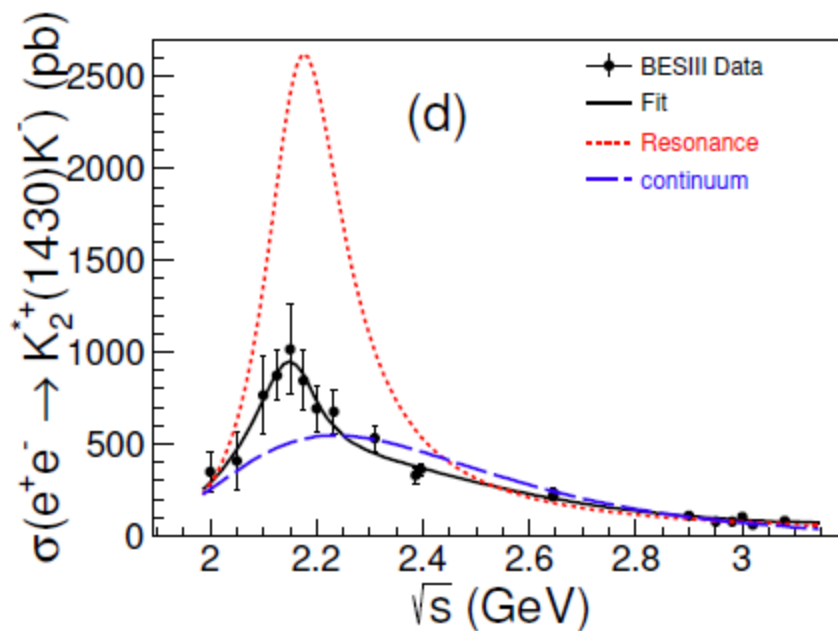
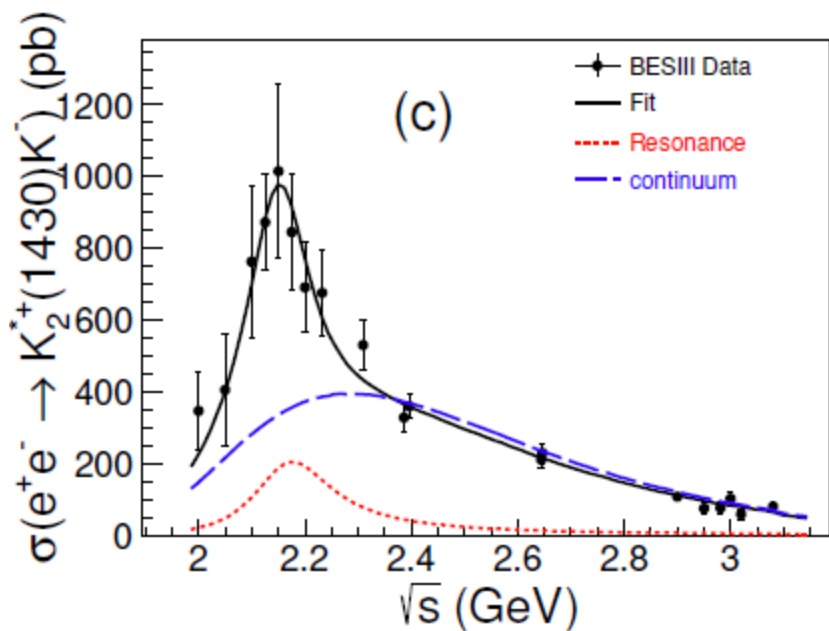
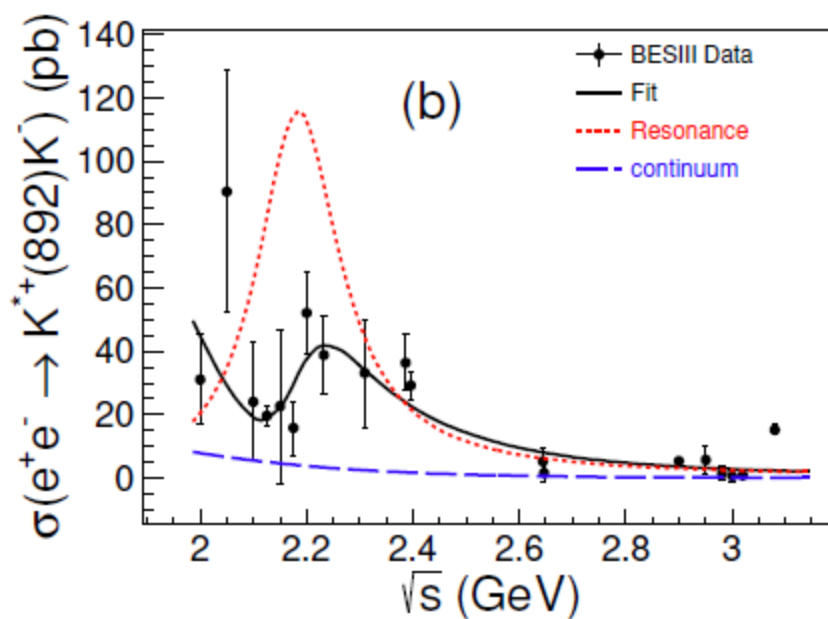
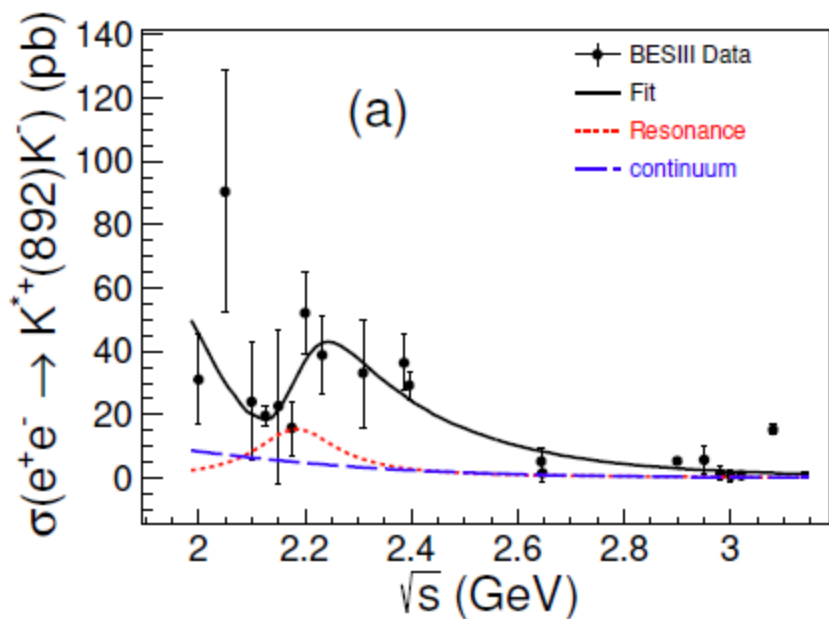
任务4：介子道截面及形状因子 (包括寻找 ρ^* , ω^* , ϕ^* 激发态)

- $e^+e^- \rightarrow \omega \pi^0/\eta$, BAM327, [PLB813, 136059 \(2021\)](#)
- $e^+e^- \rightarrow \eta' \pi^+ \pi^-$, BAM416, [PRD103, 072007 \(2021\)](#)
- $e^+e^- \rightarrow \phi \eta$, BAM269, [PRD104, 032007 \(2021\)](#)
- $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$, BAM386, [PRD104, 092014 \(2021\)](#)
- $e^+e^- \rightarrow \omega \pi^0 \pi^0$, BAM454, [PRD105, 032005 \(2022\)](#)
- $e^+e^- \rightarrow K^+ K^- \pi^0$, BAM376, [JHEP07, 045 \(2022\)](#)
- $e^+e^- \rightarrow \phi \pi^+ \pi^-$, BAM417, submitted (tanyx)
- $e^+e^- \rightarrow \omega \pi^+ \pi^-$, BAM433, submitted (zhangbx)
- $e^+e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$, BAM546 (leizh)
- $e^+e^- \rightarrow \eta \pi^+ \pi^-$, BAM596 (huanglq)
- $e^+e^- \rightarrow \omega K^+ K^-$, with conveners (baixh)
- $e^+e^- \rightarrow \gamma \eta$, (liuwm)
- $e^+e^- \rightarrow \omega \eta'$, (wuy)

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

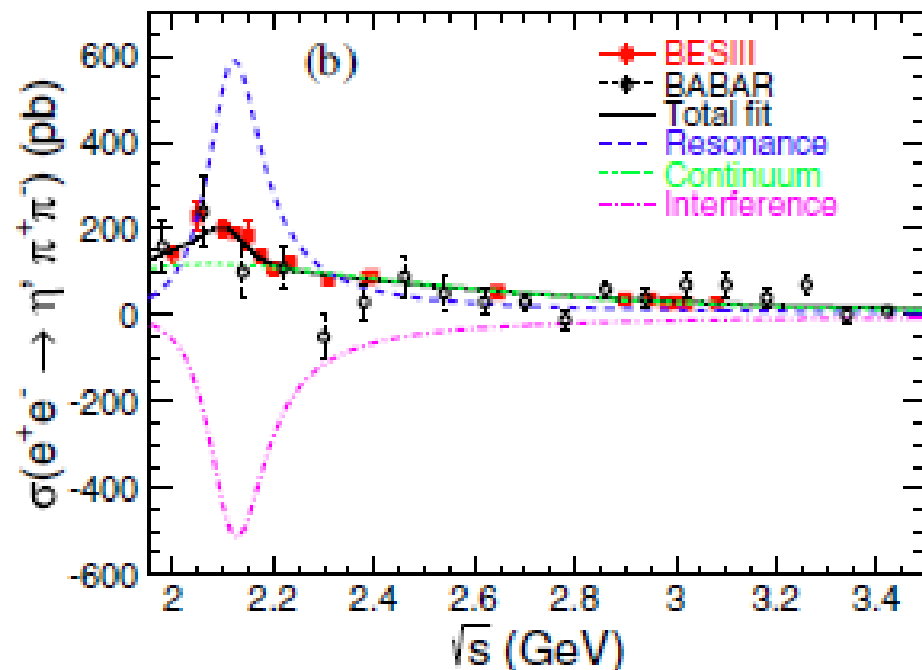
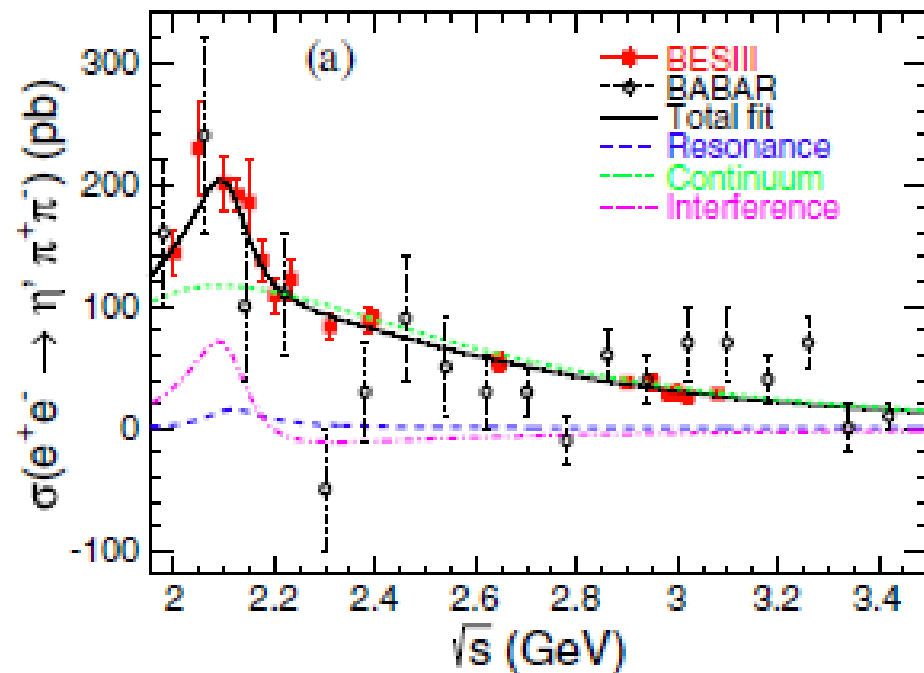
- $M=2190 \pm 19 \pm 37 \text{ MeV}/c^2$, $\Gamma=191 \pm 28 \pm 60 \text{ MeV}$ from PWA of $K^*(892)K$ and $K_2^*(1430)K$;
- JHEP07, 045 (2022).





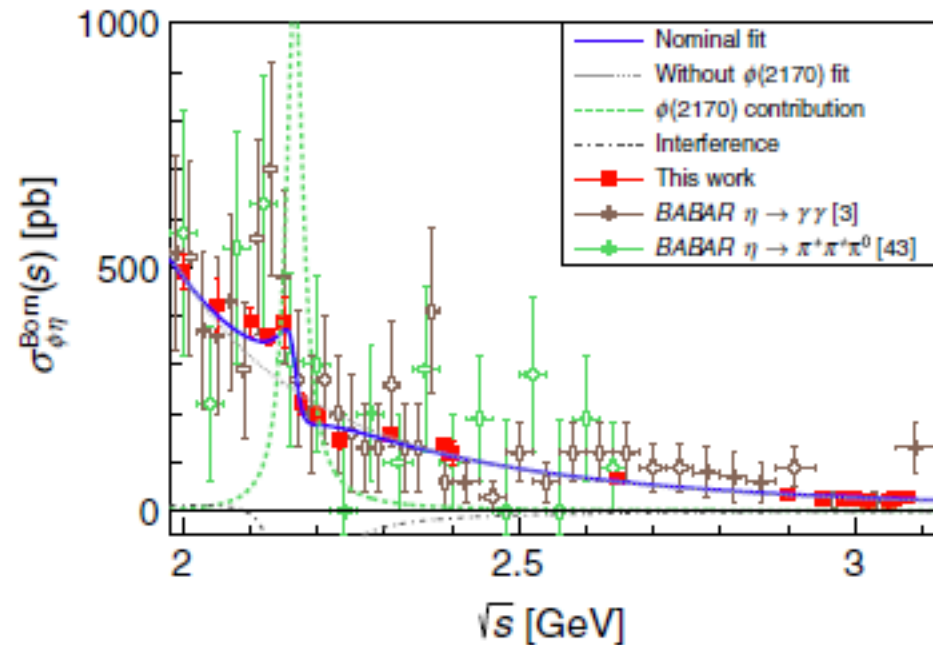
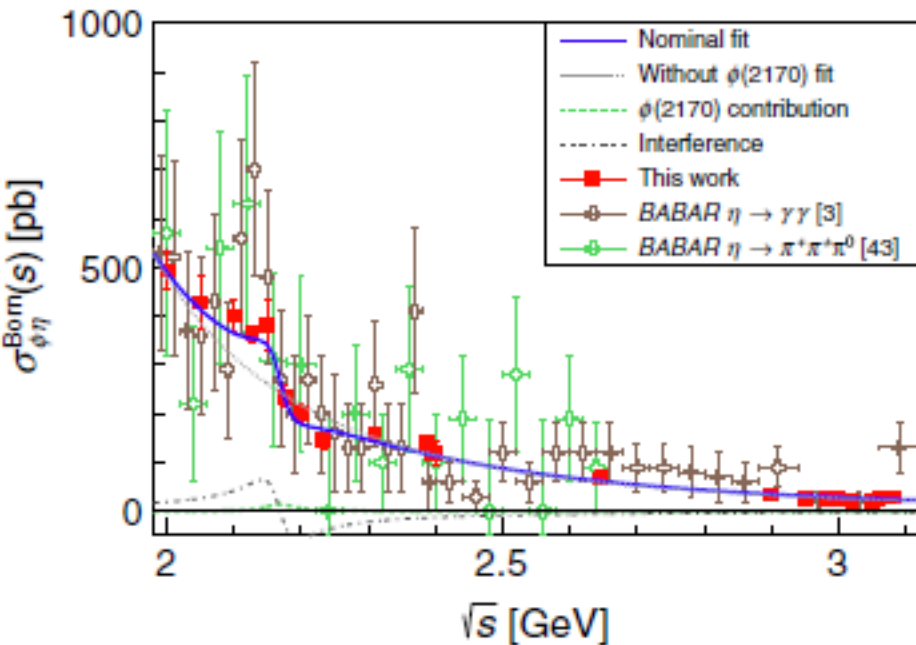
$$e^+e^- \rightarrow \eta' \pi^+ \pi^-$$

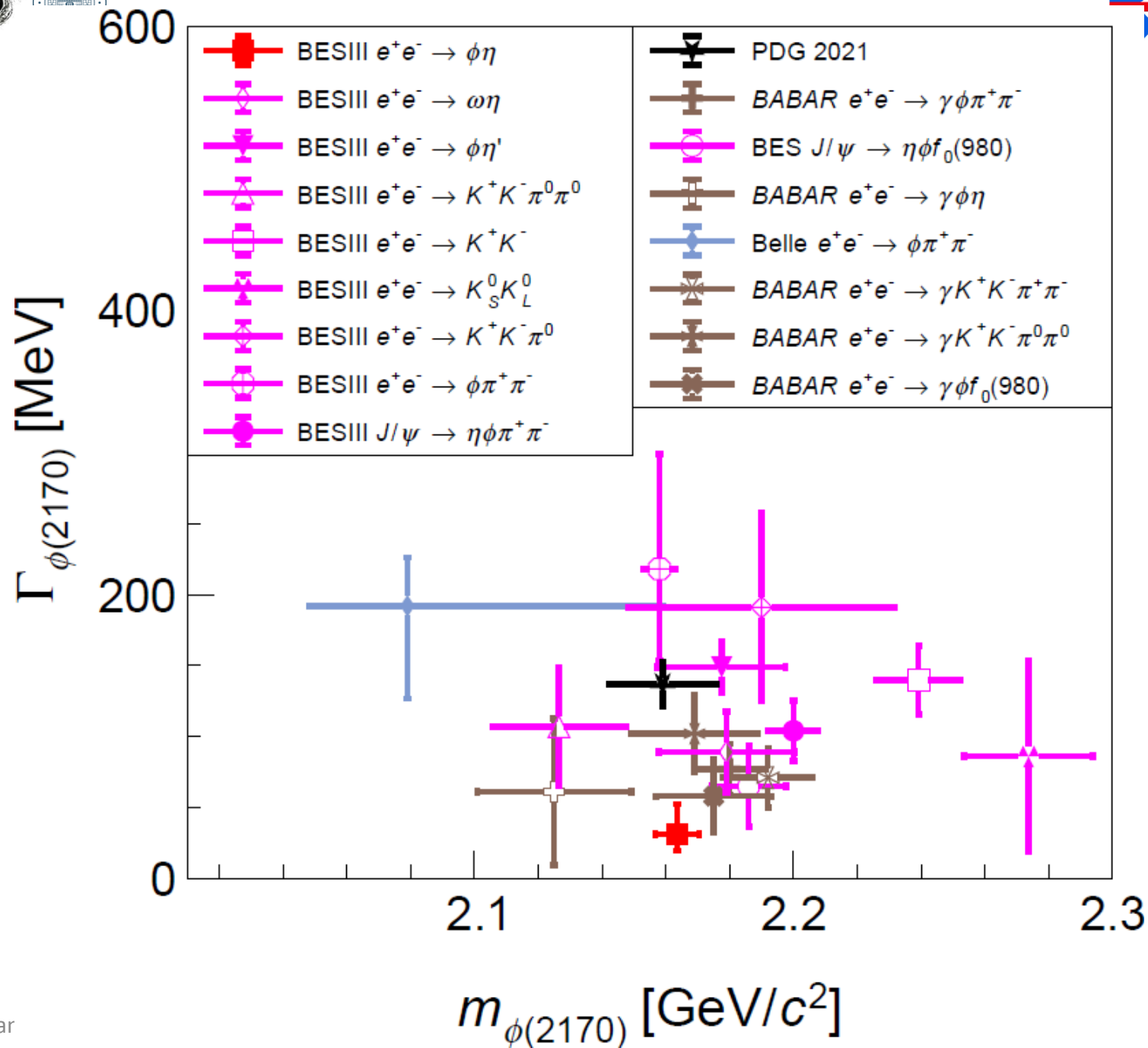
- $M=2111 \pm 43 \pm 25 \text{ MeV}/c^2$, $\Gamma=135 \pm 34 \pm 30 \text{ MeV}$;
- PRD103, 072007 (2021).



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

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





利用初态辐射技术测量介子形状因子

- $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, 600 – 900 MeV 结果已发表在 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, 已投 PRD;
- $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0(\pi^0)$, BAM271;
- Transition Form Factors:
 - π^0 : BAM283;
 - $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^+\pi^-$, BAM378;
 - $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0\pi^0$;
 - $\gamma\gamma^* \rightarrow \eta, \eta'$.

目标：完成约20个介子道测量，超越考核指标(4-6个).

理论研究进展

- 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 (2021) 5, 054045.
- 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 (2021) 5, 094001.
- Detecting the polarization in $\chi_{cJ} \rightarrow \phi\phi$ decays to probe hadronic loop effect, Qi Huang, Jun-Zhang Wang, Rong-Gang Ping, and Xiang Liu, Phys. Rev. D 103 (2021) 096006.
- Glueball content of η_c , Renqiang Zhang, Wei Sun, Ying Chen, Ming Gong and Zhaofeng Liu, Phys. Lett. B 827, 136960 (2022).
- 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).

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



总 结

- QCD强子产生研究课题进展良好;
- $2.23\text{--}3.67\text{GeV}$ 能区R值精度好于3%, 发表在PRL;
- $2.0\text{--}4.6\text{GeV}$ 全能区R值测量正在进行;
- 遍举方法测量R值(2.0GeV)已在BESIII会议汇报;
- 重子近阈产生研究及形状因子测量基本完成;
- Bose-Einstein关联函数测量已经起步;
- 轻介子形状因子测量及新共振态研究多项并进。