

# 北京谱仪III上奇异介子的研究及一种基于阈值效应的能散测量方法 (博士开题答辩报告)

答辩人：刘栋 (BZ13004003)

导 师：黄光顺

专 业：核与粒子物理

时 间：2017年10月

# 内容概要

- 粒子物理中的标准模型
- 北京谱仪的介绍
- 奇异介子的研究
  - 研究的背景
  - 研究方法与数据来源
  - 截面测量
  - 形状因子的测量
  - 系统误差的研究
  - 小结
- 基于阈值效应的能散测量方法
  - 研究背景
  - 方法介绍
  - 利用含粲重子对实现能散测量
  - 结果对比
  - 小结
- 后续计划

# 粒子物理中的标准模型

- 标准模型

- 相互作用

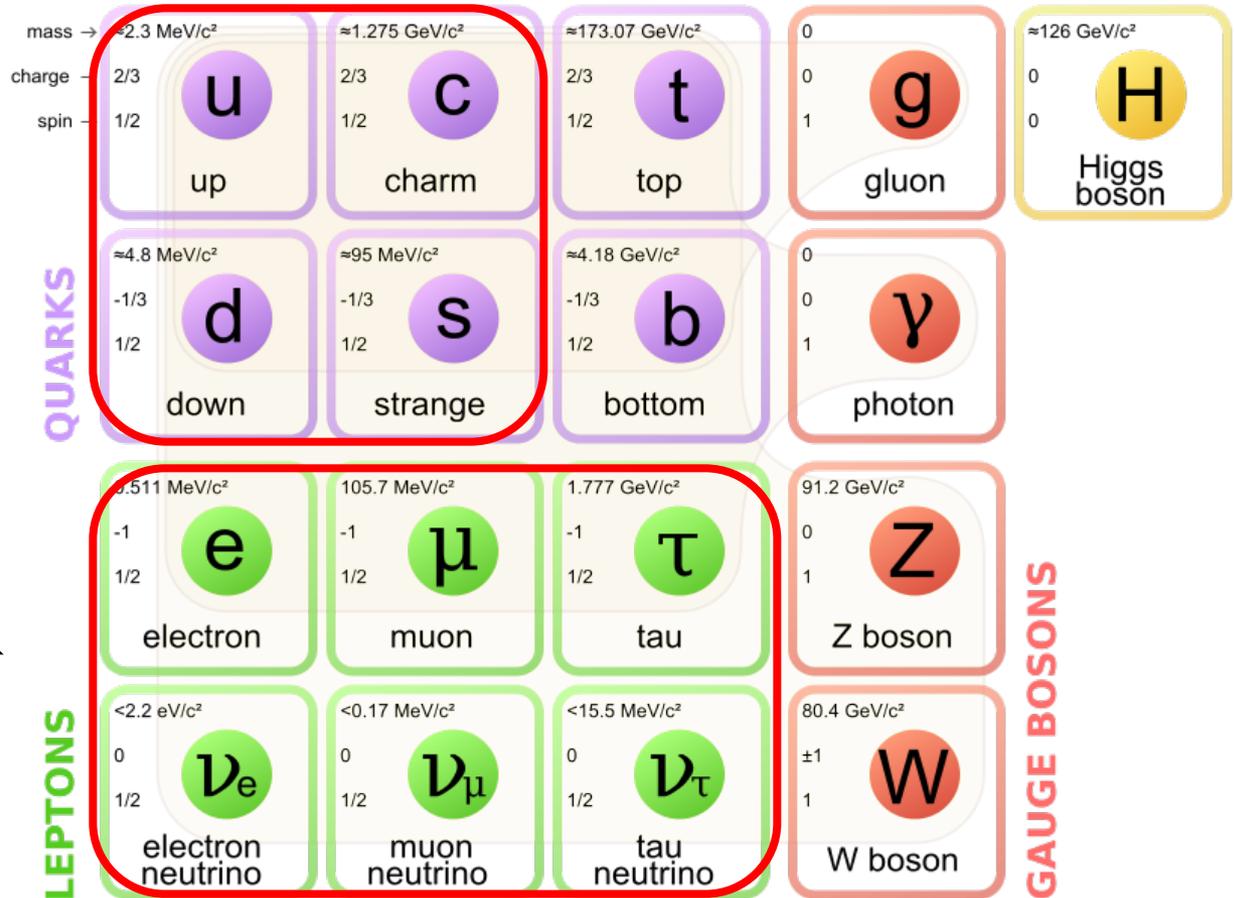
- 电磁
- 引力
- 弱
- 强

- 粒子分类

- 规范矢量玻色子
- Higgs标量玻色子
- 轻子
- 强子

- QCD

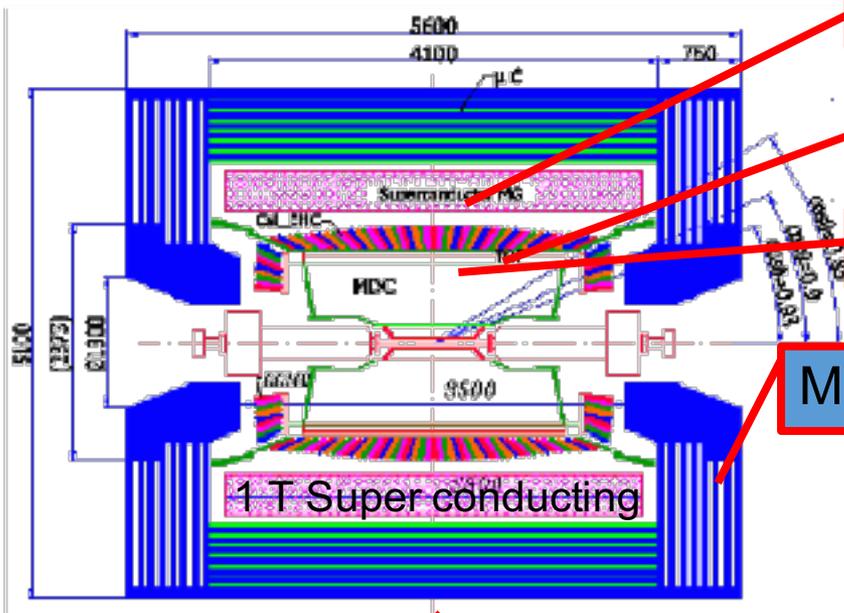
- 微扰：R值
- 非微扰：大多数强作用过程



# 北京谱仪

- 北京正负电子对撞机与第三代北京谱仪
  - 对撞机：双环结构，2-4.6 GeV， $10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$
  - 探测器：
    - 主漂移室：动量，能损
    - 飞行时间探测器：飞行时间
    - 电磁量能器：能量
    - $\mu$ 子计数器：鉴别 $\mu$ 子

# 北京谱仪

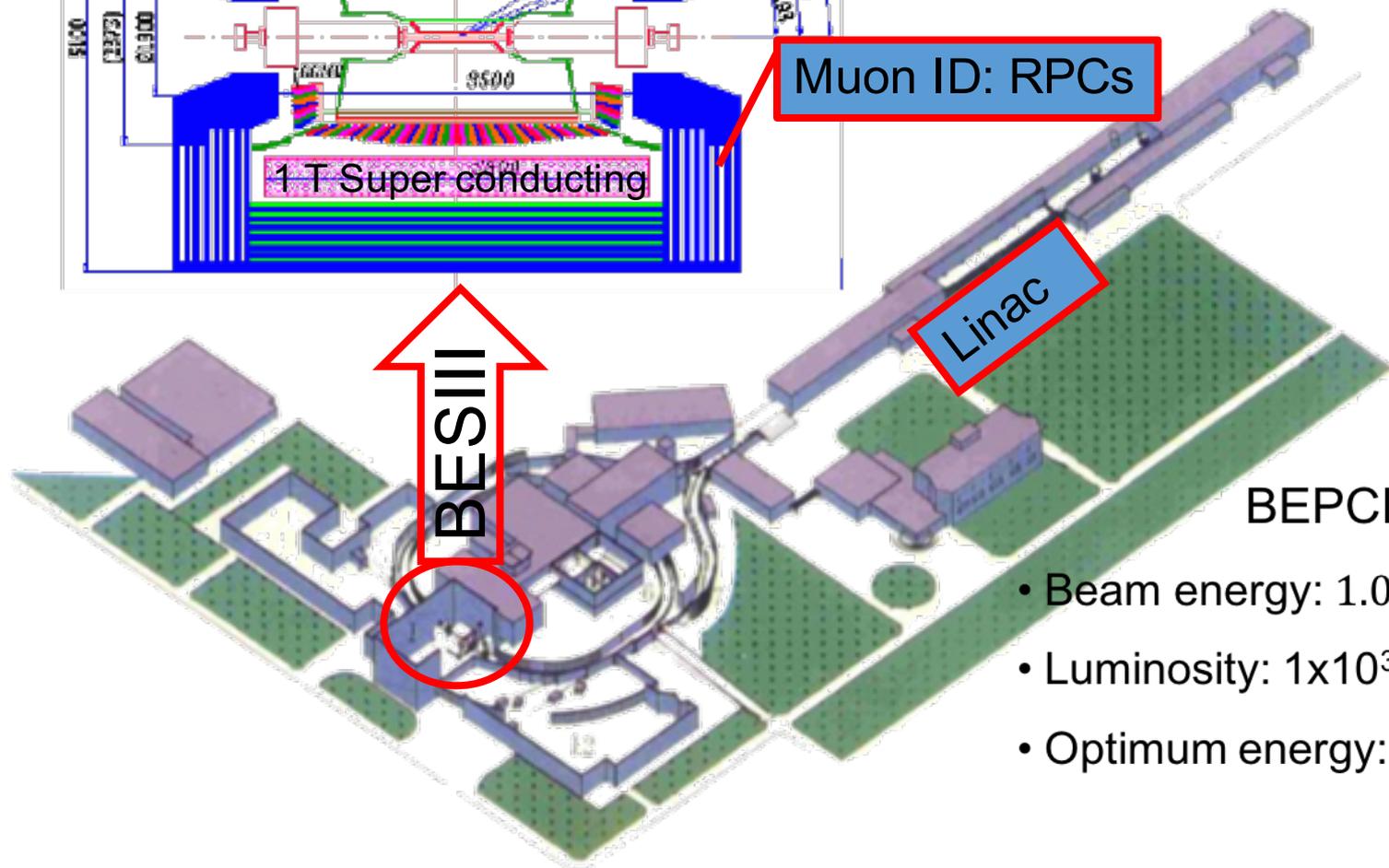


CsI crystal,  $\Delta E/E = 2.5\% @1 \text{ GeV}$

$\sigma_T = 100 \text{ ps}$  barrel, 65 ps endcaps

$\sigma_p/p = 0.5\% @1 \text{ GeV}$ ,  $\sigma dE/dx = 6\%$

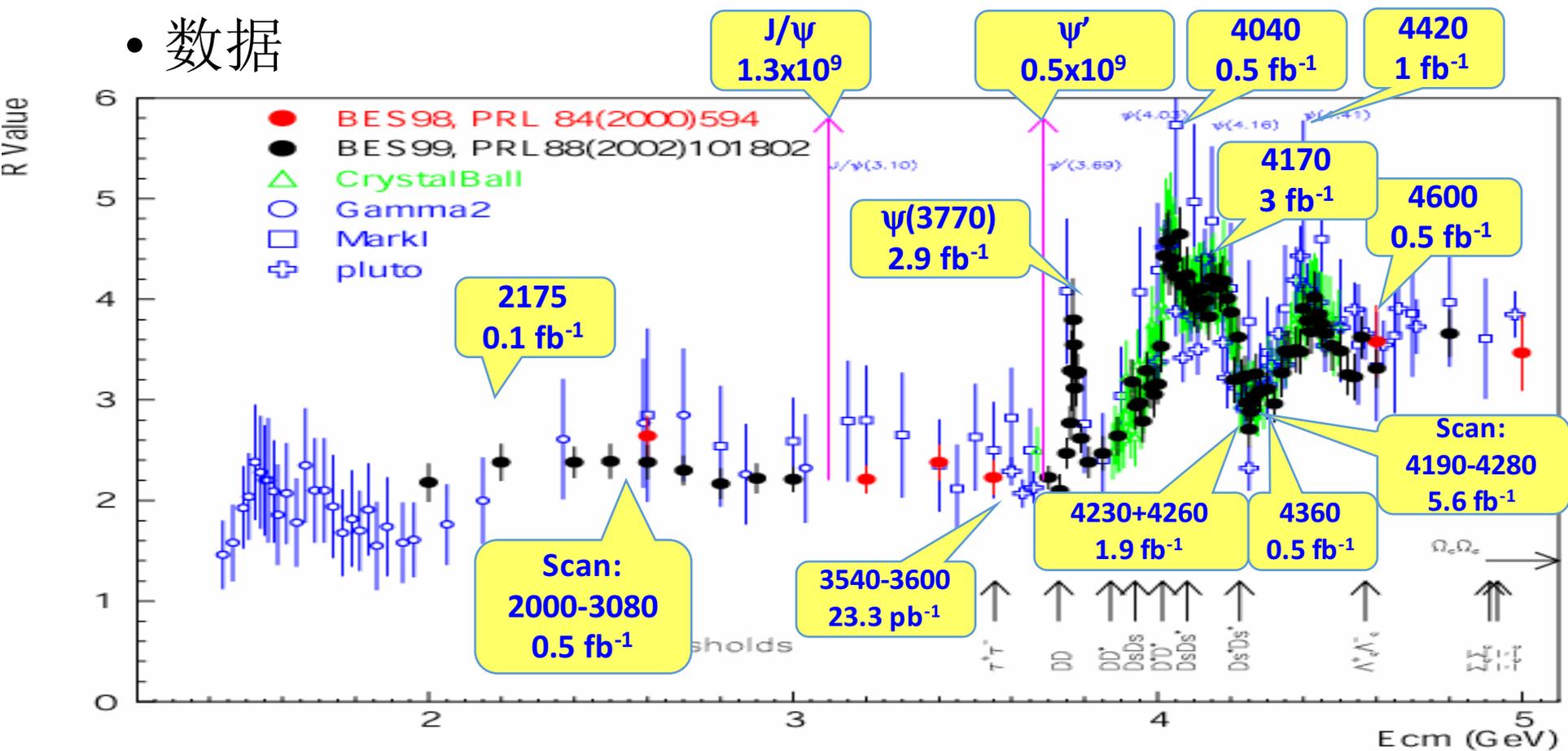
Muon ID: RPCs



- Beam energy: 1.0 – 2.3 GeV
- Luminosity:  $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Optimum energy: 1.89 GeV

# 北京谱仪上的物理

## • 数据



R scan at 130 energy points in 2-4.6 GeV (1.3 fb<sup>-1</sup>)

# 北京谱仪上的物理

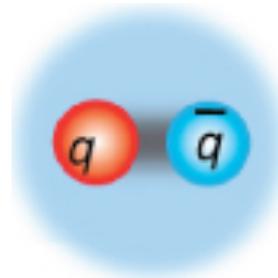
- 粲偶素谱及其衰变
  - QCD的检验
  - XYZ态
- 轻强子物理
  - 强子谱学
  - 寻找奇特态：胶球，混杂态，四夸克态， ...
- 粲物理
  - CKM矩阵，半轻衰变
  - 衰变参数的研究， $f_D$  和  $f_{D_s}$
  - 中性D介子的混合，CP破坏
- R-QCD
  - R值测量
  - $\tau$ 轻子物理
  - 强子的形状因子

# 奇异介子的产生截面测量

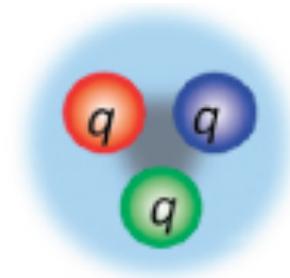
# 物理动机（夸克模型）

- 普通强子
  - 介子：2夸克组成
  - 重子：3夸克组成
- QCD允许的其他强子
  - 胶子球
  - 混杂态
  - 多夸克态
  - 分子态
  - 其他

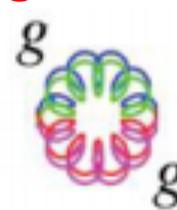
Meson



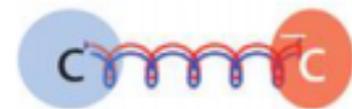
Baryon



glueball



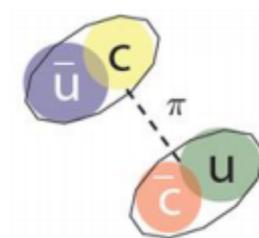
qqg hybrid



multiquark

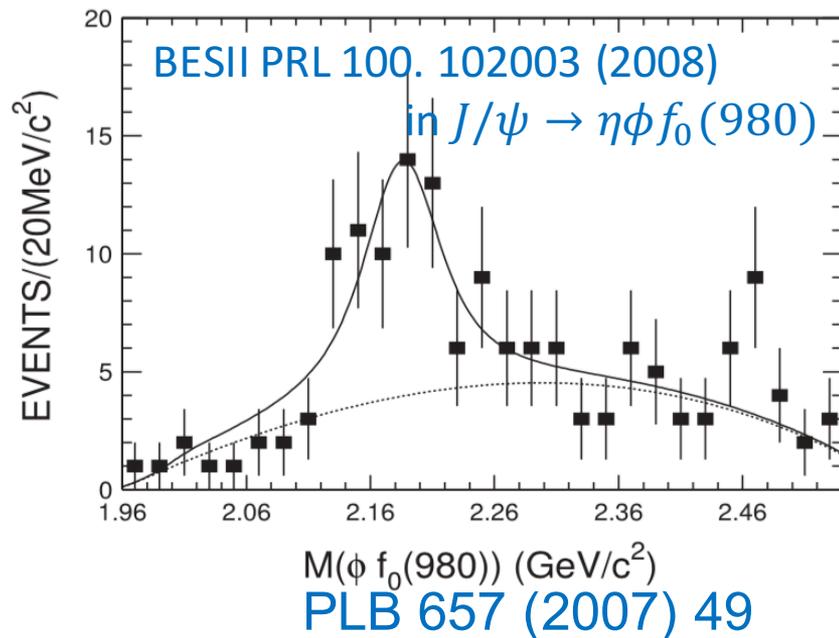
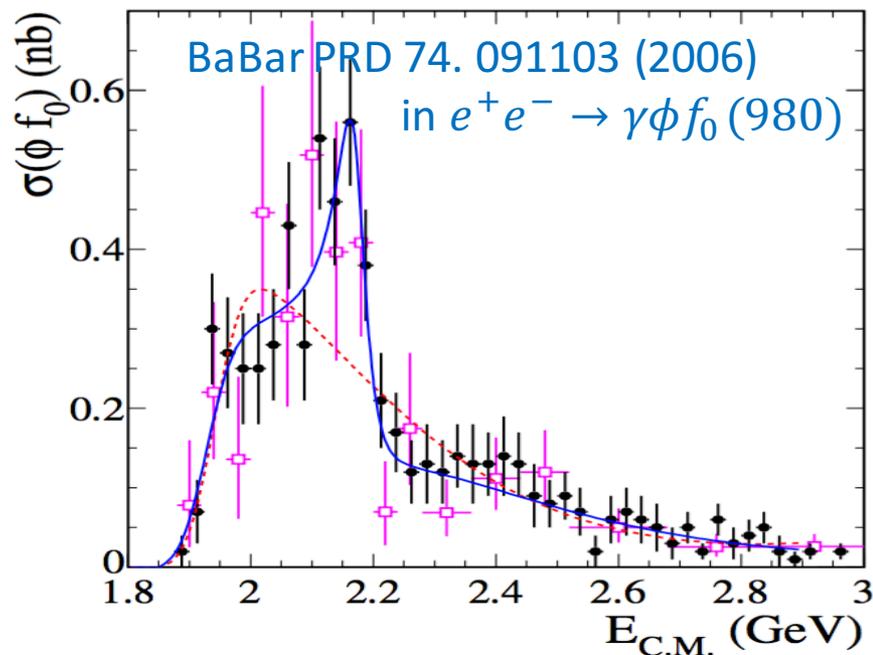


molecule



# 奇异介子的研究—奇特态的寻找

- $Y(2175)$ 的发现及理论预言



$Y(2175)$	As $2^3D_1$ $s\bar{s}$ quarkonium		As $s\bar{s}g$ hybrid	As $3^3S_1$ $s\bar{s}$ quarkonium
	$\Gamma_{LJ}$ in $^3P_0$ Model	$\Gamma_{LJ}$ in Flux Tube Model	in Flux Tube Model	in $^3P_0$ Model
$\Gamma_{KK}$ (MeV)	9.8	23.1	0	0
$\Gamma_{\text{tot}}$ (MeV)	167.21	211.9	148.7	378

# 奇异介子的研究—奇特态的寻找

As a normal phi state

Channel	$g_{(l_c=0)}^2$	$g_{(l_c=2)}^2$					Threshold (MeV)
	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$l_1$	$l_2$	$L$	$S$	
$KK$	27.8	9.26	0	0	1	0	987
$KK^*$	111	9.26	0	0	1	1	1388
$\eta\phi$	40.8	3.40	0	0	1	1	1567
$\eta'\phi$	70.3	5.86	0	0	1	1	1977
$K^*K^*$	9.26	3.09	0	0	1	0	1788
$K^*K^*$	185	0.62	0	0	1	2	1788
$\phi(1020)f_0(980)$	83.3	0	0	1	0	1	1999
$K^*K_0^*(800)$	83.3	0	0	1	0	1	1639
$\phi(1020)f_0(980)$	0	14.7	0	1	2	1	1999
$K^*K_0^*(800)$	0	14.7	0	1	2	1	1639
$\eta h_1(1380)$	10.2	5.67	0	1	0	1	1928
$\eta' h_1(1380)$	17.6	9.76	0	1	0	1	2338
$KK_1(1270)$	83.3	20.6	0	1	0	1	1764
$KK_1(1400)$	0	2.57	0	1	0	1	1894
$K^*K_1(1270)$	167	10.3	0	1	0	1	2164
$K^*K_1(1400)$	0	1.29	0	1	0	1	2294
$\phi f_1(1420)$	111	3.86	0	1	0	1	2439

TABLE I: Included two-meson channels, their internal and relative angular momenta and spins, couplings squared for  $n = 0$ , and thresholds. See Ref. [3] for properties of listed mesons, except for the  $K_0^*(800)$ , discussed in the text.

Pole	${}^3S_1$ only		${}^3S_1 + {}^3D_1$		Type of Pole
	$\Re$	$\Im$	$\Re$	$\Im$	
1	1027.5	-2.7	1019.5	-2.2	conf., $n = 0$ , $1 {}^3S_1$
2	1537	-13	1516	-23	conf., $n = 1$ , $2 {}^3S_1$
3	-	-	1602	-6	conf., $n = 0$ , $1 {}^3D_1$
4	1998	-16	1932	-24	conf. $n = 2$ , $3 {}^3S_1$
5	-	-	1996	-14	conf. $n = 1$ , $2 {}^3D_1$
6	2397	-214	<b>2186</b>	<b>-246</b>	continuum
7	2415	-6	2371	-29	conf., $n = 3$ , $4 {}^3S_1$
8	-	-	2415	-8	conf., $n = 2$ , $3 {}^3D_1$
9	2501	-236	2551	-193	continuum

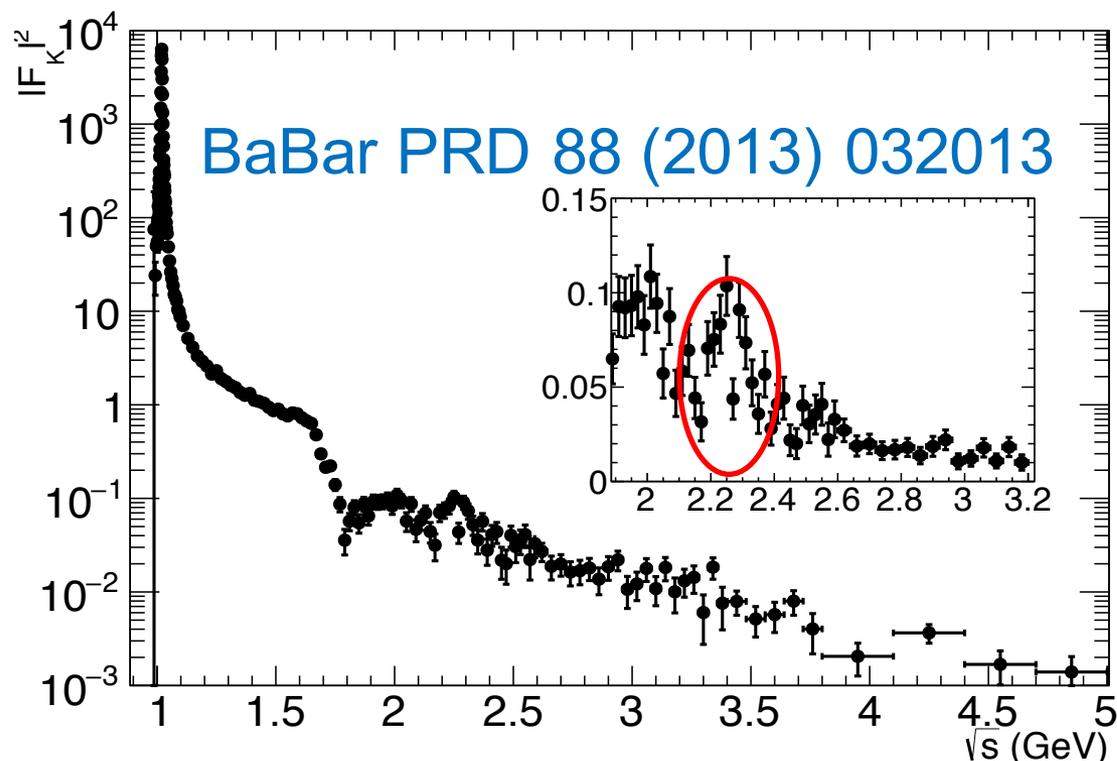
TABLE V: Complex-energy poles in MeV, for  ${}^3S_1$   $s\bar{s}$  channel only, and for both  ${}^3S_1$  and  ${}^3D_1$ . See text for further details.

Real part: close to  $m(\phi(2170))$  by BABAR and BES.

Imaginary part: too large than width

# 奇异介子的研究—精确测量

- 截面的测量  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ 
  - 在2GeV以上精度很差>15%
  - 可能存在未知共振态



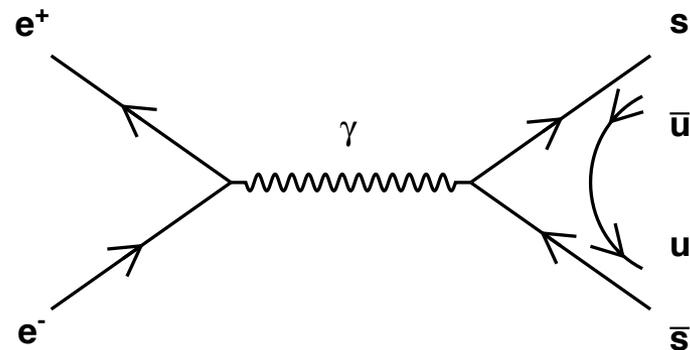
# 奇异介子的研究—精确测量

- 形状因子的测量
  - 描述强子内部的荷分布

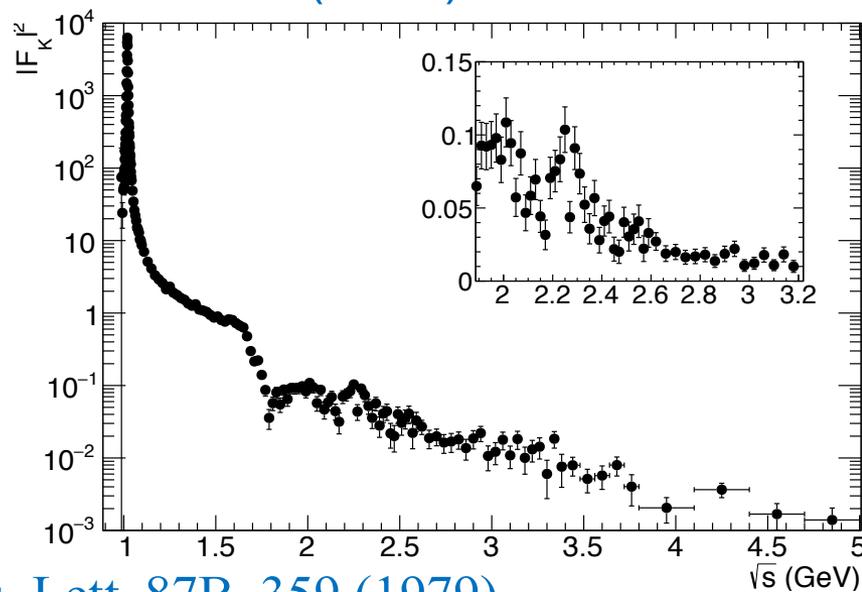
$$F(q^2) = \int d^3r \rho(r) e^{iq \cdot r}$$

- 强子内部动力学和强子波函数的细节
- 在2GeV以上，精度差
  - >15%
- 检测QCD预言

$$F_K = 16\pi\alpha_s(s) f_K^2 / s$$



PRD 88 (2013) 032013



Phys. Lett. 87B, 359 (1979)

# 数据来源

- 实验数据

$E_{cm}$ (GeV)	runNo	$\mathcal{L}(\text{offline})$ ( $\text{pb}^{-1}$ )	$E_{cm}$ (GeV)	runNo	$\mathcal{L}(\text{offline})$ ( $\text{pb}^{-1}$ )
2	41729-41909	10.074	2.5	40771-40776	1.098
2.05	41911-41958	3.343	2.6444	40128-40296	33.722
2.1	41588-41727	12.167	2.6464	40300-40435	34.003
2.125	42004-43253	108.49	2.7	40436-40439	1.034
2.15	41533-41570	2.841	2.8	40440-40443	1.008
2.175	41416-41532	10.625	2.9	39775-40069	105.253
2.2	40989-41121	13.699	2.95	39619-39650	15.942
2.2324	41122-41239	11.856	2.981	39651-39679	16.071
2.3094	41240-41411	21.089	3	39680-39710	15.881
2.3864	40806-40951	22.549	3.02	39711-39738	17.290
2.396	40459-40769	66.869	3.08	39355-39618	126.185

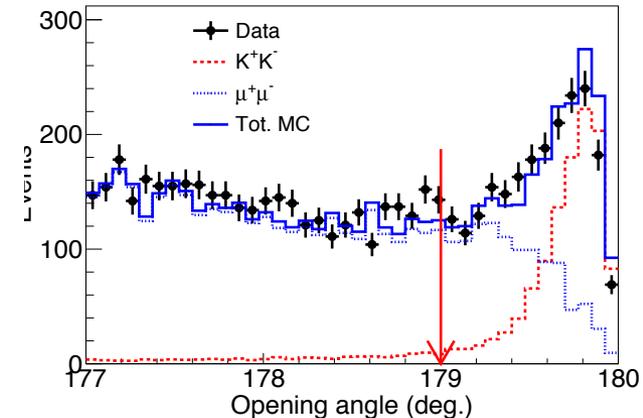
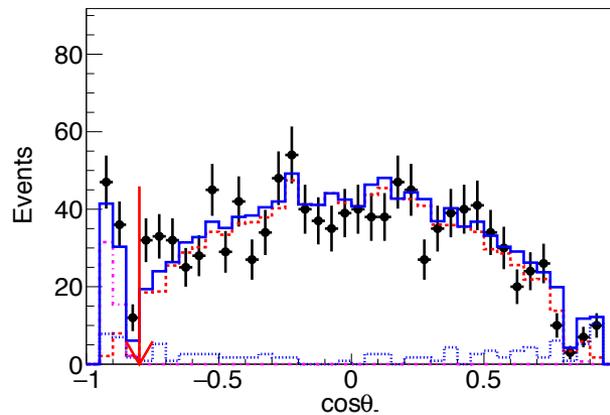
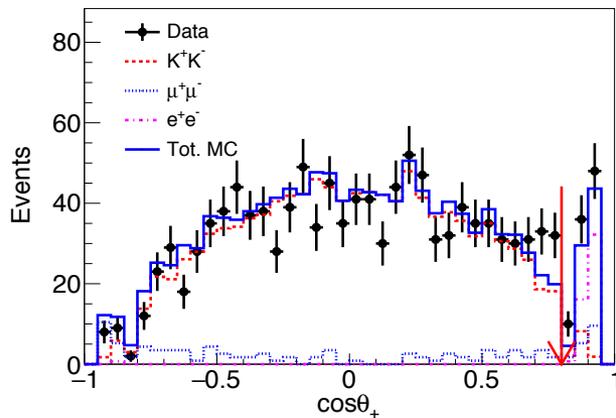
- 模拟数据

$1\text{M } e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ ,  $0.5\text{M } e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ ,  $0.5\text{M } e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ ,  
 $0.5\text{M } e^+e^- \rightarrow e^+e^-X$ ,  $1\text{M } e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

# 事件的筛选

- Good charged tracks: (MDC)
  - $|V_r| < 1 \text{ cm}$ ,  $|V_z| < 10 \text{ cm}$ ,  $|\cos\theta| < 0.93$ ,  $N_+ = N_- = 1$
  - $\cos\theta_+ < 0.8$ ,  $\cos\theta_- > -0.8$
- E/p: (EMC+MDC)
  - $E/p < (E/p)_{\text{cut}}$ , cut optimized with signal to noise ratio  $S/\sqrt{S+N}$ , cut value  $\sim 0.6 - 0.8$
- Back to back:  $\text{angle}(1,2) > 179^\circ$
- TOF:  $|\text{TOF1}-\text{TOF2}| < 3 \text{ ns}$  (TOF)

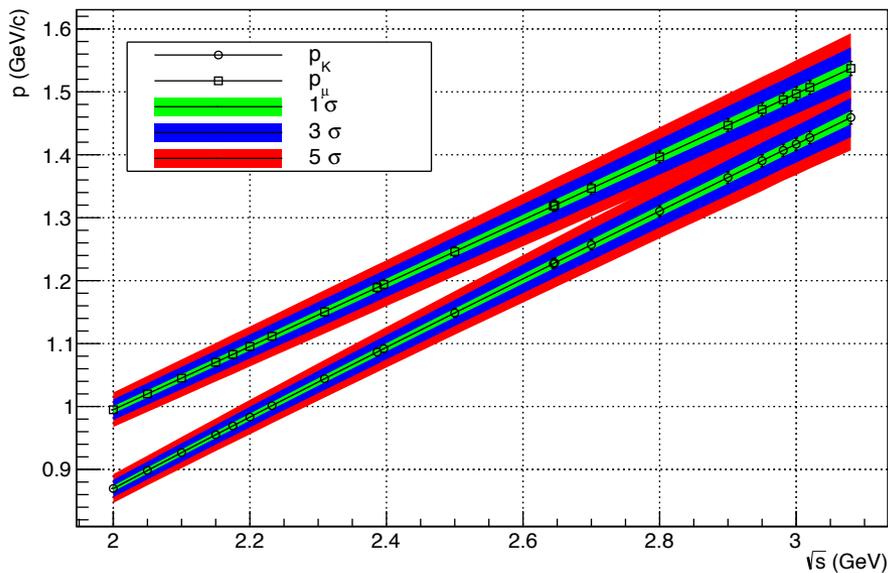
@2.6444 GeV



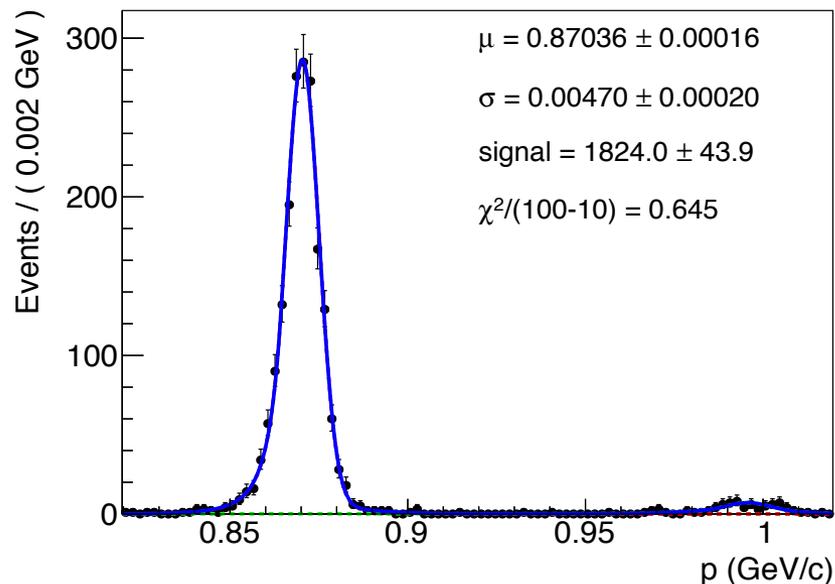
# 信号提取

$$p_{\text{exp}} = \sqrt{\left(\frac{E}{2}\right)^2 - m_K^2}$$

p of 2 prong process



K和 $\mu$ 在不同质心能量下  
预期动量分布



@2.0 GeV

信号: MC  $\otimes$  Gaus

本底: MC  $\otimes$  Gaus

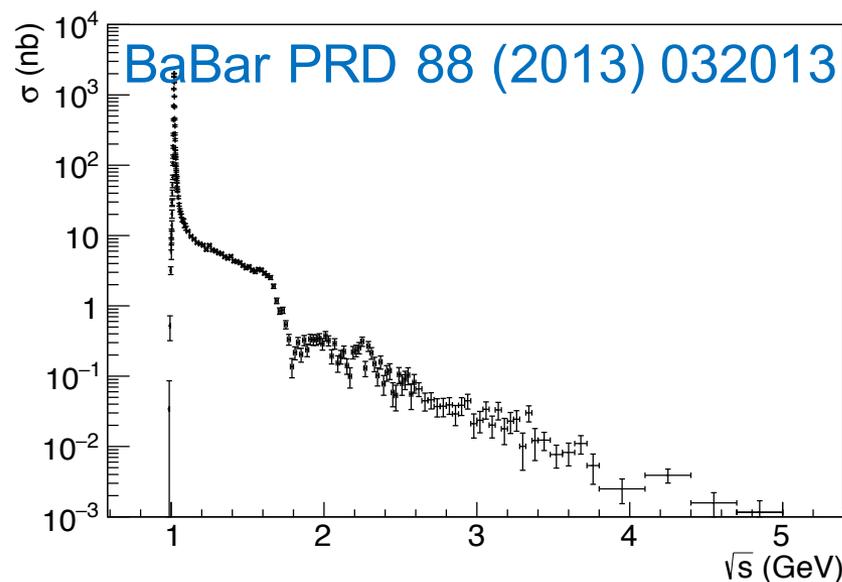
# 效率与修正

- 信号过程用ConExc产生子描述
- 利用输入截面谱形计算初态辐射和真空极化修正

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \gamma X_i} = \int d\sqrt{s'} \frac{2\sqrt{s'}}{s} W(s, x) \frac{\sigma^B(s')}{[1 - \Pi(s')]^2}$$

- 统计经过筛选的事例数给出探测效率

$$\sigma = \frac{N}{\mathcal{L} \cdot \varepsilon \cdot (1 + \delta)}$$



# 截面测量结果

$E_{cm}$ (GeV)	$\epsilon$	$(1 + \delta)$	$\mathcal{L}$ (pb $^{-1}$ )	$N_{sig}$	$\sigma$ (nb)
2	0.1888	2.7130	10.074 $\pm$ 0.005 $\pm$ 0.073	1824.0 $\pm$ 43.9	0.3546 $\pm$ 0.0085 $\pm$ 0.0147
2.05	0.1810	2.8670	3.343 $\pm$ 0.003 $\pm$ 0.024	524.0 $\pm$ 22.9	0.3020 $\pm$ 0.0132 $\pm$ 0.0236
2.1	0.1565	3.3810	12.167 $\pm$ 0.006 $\pm$ 0.077	1418.7 $\pm$ 38.2	0.2203 $\pm$ 0.0059 $\pm$ 0.0140
2.125	0.1414	3.7170	*108.49 $\pm$ 0.02 $\pm$ 0.92	11088.7 $\pm$ 107.4	0.1945 $\pm$ 0.0019 $\pm$ 0.0101
2.15	0.1305	4.0118	2.841 $\pm$ 0.003 $\pm$ 0.022	263.0 $\pm$ 16.3	0.1769 $\pm$ 0.0110 $\pm$ 0.0053
2.175	0.1476	3.5351	10.625 $\pm$ 0.006 $\pm$ 0.069	1029.1 $\pm$ 33.9	0.1857 $\pm$ 0.0061 $\pm$ 0.0082
2.2	0.1773	2.9787	13.699 $\pm$ 0.007 $\pm$ 0.108	1697.6 $\pm$ 41.4	0.2346 $\pm$ 0.0057 $\pm$ 0.0145
2.2324	0.1975	2.6937	11.856 $\pm$ 0.007 $\pm$ 0.077	1613.5 $\pm$ 40.4	0.2558 $\pm$ 0.0064 $\pm$ 0.0141
2.3094	0.1671	3.2601	21.089 $\pm$ 0.009 $\pm$ 0.156	2080.3 $\pm$ 47.2	0.1811 $\pm$ 0.0041 $\pm$ 0.0083
2.3864	0.1177	4.5809	22.549 $\pm$ 0.010 $\pm$ 0.192	1269.4 $\pm$ 36.1	0.1044 $\pm$ 0.0030 $\pm$ 0.0085
2.396	0.1137	4.7256	66.869 $\pm$ 0.017 $\pm$ 0.461	3841.7 $\pm$ 70.6	0.1069 $\pm$ 0.0020 $\pm$ 0.0109
2.5	0.0985	5.6227	1.098 $\pm$ 0.002 $\pm$ 0.009	53.4 $\pm$ 7.5	0.0878 $\pm$ 0.0123 $\pm$ 0.0102
2.6444	0.0892	6.2873	33.722 $\pm$ 0.013 $\pm$ 0.223	1107.3 $\pm$ 40.2	0.0585 $\pm$ 0.0021 $\pm$ 0.0066
2.6464	0.0884	6.2972	34.003 $\pm$ 0.013 $\pm$ 0.262	1145.1 $\pm$ 42.7	0.0605 $\pm$ 0.0023 $\pm$ 0.0078
2.7	0.0855	6.5641	1.034 $\pm$ 0.002 $\pm$ 0.008	22.1 $\pm$ 5.1	0.0381 $\pm$ 0.0088 $\pm$ 0.0026
2.8	0.0797	7.1355	1.008 $\pm$ 0.002 $\pm$ 0.007	28.0 $\pm$ 6.5	0.0488 $\pm$ 0.0113 $\pm$ 0.0083
2.9	0.0738	7.8308	105.253 $\pm$ 0.025 $\pm$ 0.905	1997.6 $\pm$ 58.5	0.0328 $\pm$ 0.0010 $\pm$ 0.0039
2.95	0.0697	8.1982	15.942 $\pm$ 0.010 $\pm$ 0.108	265.1 $\pm$ 21.5	0.0291 $\pm$ 0.0024 $\pm$ 0.0058
2.981	0.0676	8.4299	16.071 $\pm$ 0.010 $\pm$ 0.108	287.0 $\pm$ 21.0	0.0314 $\pm$ 0.0023 $\pm$ 0.0063
3	0.0667	8.5760	15.881 $\pm$ 0.010 $\pm$ 0.137	223.7 $\pm$ 18.8	0.0246 $\pm$ 0.0021 $\pm$ 0.0021
3.02	0.0658	8.7326	17.290 $\pm$ 0.011 $\pm$ 0.121	264.6 $\pm$ 23.3	0.0266 $\pm$ 0.0023 $\pm$ 0.0041
3.08	0.0570	9.2017	126.185 $\pm$ 0.029 $\pm$ 0.959	1417.1 $\pm$ 70.5	0.0214 $\pm$ 0.0011 $\pm$ 0.0027

# 截面谱形的拟合

拟合函数:

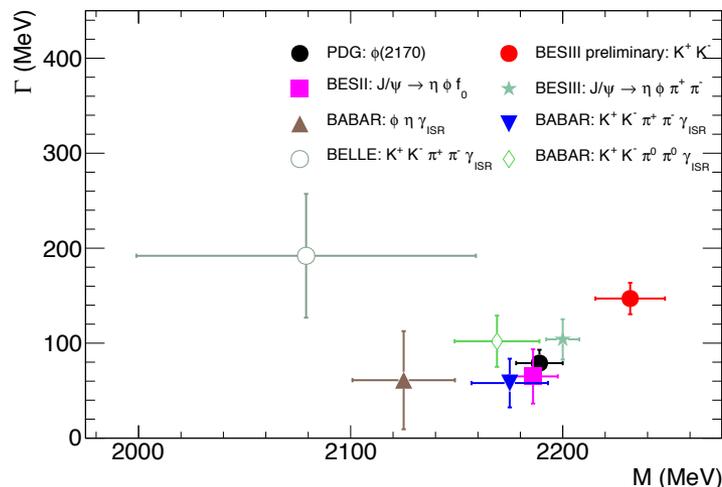
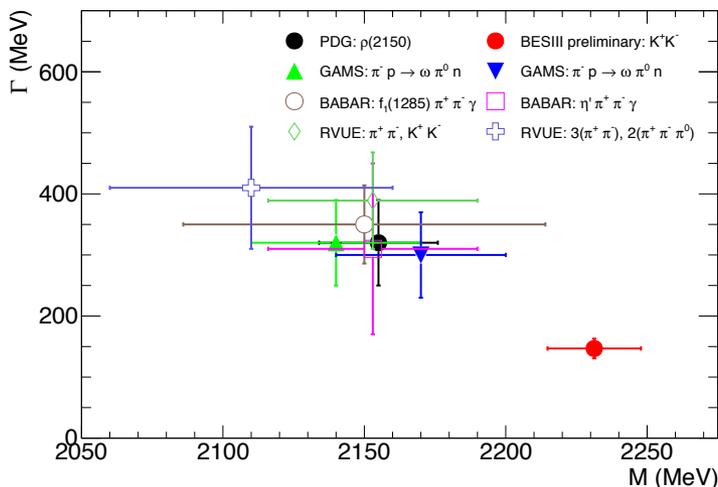
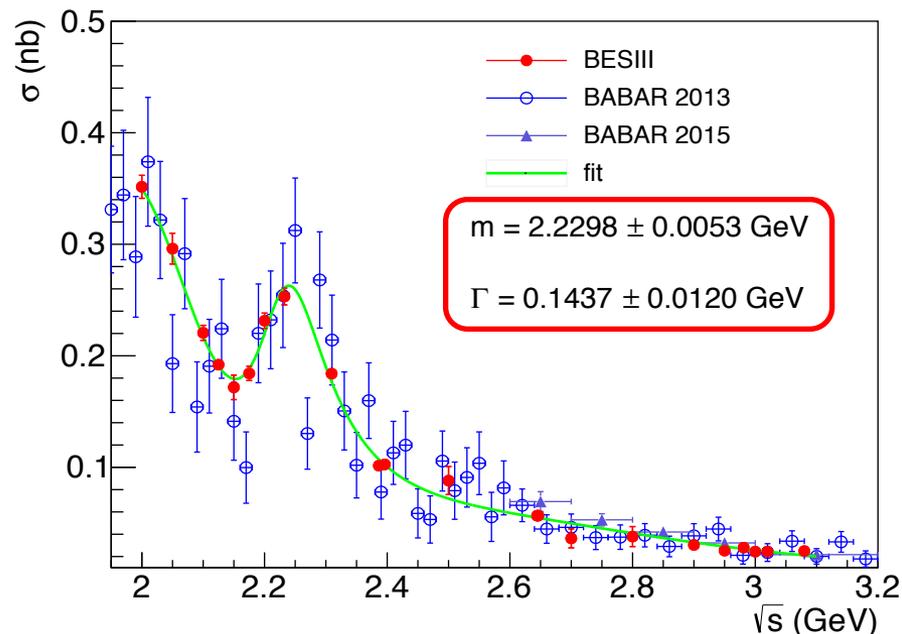
$$\sigma = |A|^2, A = \sum_r c_r \cdot BW_r + c_{\text{con}} \cdot s^{-\alpha} \cdot e^{i\theta}$$

r:  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$  及其激发态

BW: Breit-Wigner函数

拟合范围:

- 为描述本底, 引入BABAR实验结果
- 低于2GeV的态, 固定质量和宽度



# 形状因子的测量

- 形状因子的提取

$$|F_K|^2(s') = \frac{3s'}{\pi\alpha(0)^2 \beta_K^2} \frac{\sigma_{KK}(s')}{C_{FS}}$$

$$\sigma_{KK}(s') = \sigma_{KK}^0(s') \left( \frac{\alpha(s')}{\alpha(0)} \right)^2$$

- 谱形拟合

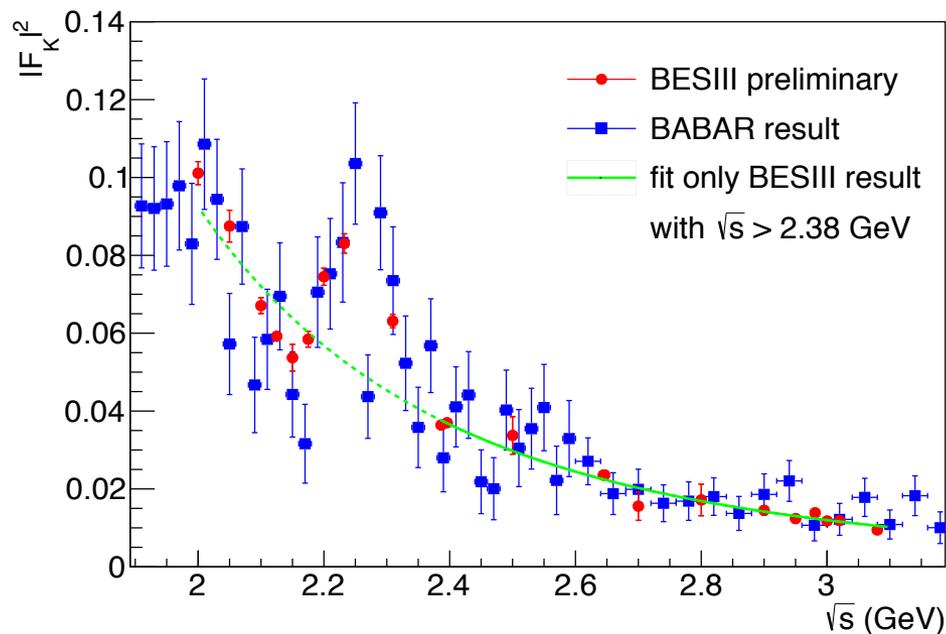
- 拟合函数

$$|F_K|^2 = A\alpha_s^2(s) / s^n$$

- 拟合结果

$$n_{\text{theory}} = 2$$

$$n = 1.94 \pm 0.09$$



# 形状因子的测量

$E_{cm}$ (GeV)	$ F_K ^2$	$E_{cm}$ (GeV)	$ F_K ^2$
2	$0.0992 \pm 0.0024 \pm 0.0041$	2.5	$0.0326 \pm 0.0046 \pm 0.0038$
2.05	$0.0868 \pm 0.0038 \pm 0.0068$	2.6444	$0.0236 \pm 0.0009 \pm 0.0027$
2.1	$0.0650 \pm 0.0018 \pm 0.0041$	2.6464	$0.0244 \pm 0.0009 \pm 0.0031$
2.125	$0.0582 \pm 0.0006 \pm 0.0030$	2.7	$0.0158 \pm 0.0036 \pm 0.0011$
2.15	$0.0537 \pm 0.0033 \pm 0.0016$	2.8	$0.0215 \pm 0.0050 \pm 0.0037$
2.175	$0.0572 \pm 0.0019 \pm 0.0025$	2.9	$0.0153 \pm 0.0004 \pm 0.0018$
2.2	$0.0732 \pm 0.0018 \pm 0.0045$	2.95	$0.0139 \pm 0.0011 \pm 0.0028$
2.2324	$0.0813 \pm 0.0020 \pm 0.0045$	2.981	$0.0152 \pm 0.0011 \pm 0.0030$
2.3094	$0.0601 \pm 0.0014 \pm 0.0028$	3	$0.0121 \pm 0.0010 \pm 0.0010$
2.3864	$0.0362 \pm 0.0010 \pm 0.0029$	3.02	$0.0132 \pm 0.0012 \pm 0.0020$
2.396	$0.0373 \pm 0.0007 \pm 0.0038$	3.08	$0.0110 \pm 0.0006 \pm 0.0014$

# 系统误差—截面测量

$\sqrt{s}$ (GeV)	$\mathcal{L}$	$\epsilon$	$1 + \delta$	$p$	$E/p$	Angle	Tracking	Fit	Sig. shape	Bck. shape	Total
2.0000	0.9	0.2	0.2	0.7	0.6	0.8	0.9	0.0	0.2	0.4	1.8
2.0500	0.9	0.2	0.1	< 0.1	0.7	0.7	0.2	0.7	0.2	0.4	1.6
2.1000	0.9	0.2	0.3	0.2	0.5	0.8	0.1	0.1	0.2	0.4	1.5
2.1250	0.8	0.2	0.3	< 0.1	0.6	0.7	0.5	0.3	0.2	0.4	1.5
2.1500	0.9	0.3	0.5	< 0.1	0.6	0.7	0.5	0.1	0.3	0.4	1.5
2.1750	0.9	0.2	0.3	0.3	0.6	0.7	0.6	0.1	0.4	0.4	1.6
2.2000	0.9	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	0.6	0.5	0.4	0.4	1.7
2.2324	0.9	0.2	0.5	0.1	0.5	0.8	0.5	0.2	0.5	0.4	1.6
2.3094	0.9	0.2	0.2	< 0.1	0.6	0.7	0.1	0.6	0.7	0.5	1.7
2.3864	0.9	0.3	0.4	0.2	0.4	0.9	0.7	0.5	1.0	0.5	2.0
2.3960	0.9	0.3	0.4	0.3	0.4	1.0	0.8	0.4	1.0	0.6	2.1
2.5000	0.9	0.3	0.2	1.4	0.6	0.8	2.1	0.3	1.3	0.6	3.2
2.6444	0.9	0.3	0.3	0.4	0.6	0.9	1.1	2.7	1.7	0.7	3.8
2.6464	0.9	0.3	0.3	0.5	0.6	0.8	1.2	0.8	1.7	0.8	2.8
2.7000	0.9	0.3	0.3	0.5	0.4	0.9	1.5	1.0	2.0	1.2	3.3
2.8000	0.9	0.3	0.3	0.5	0.7	1.3	1.4	1.0	2.5	2.1	4.1
2.9000	0.9	0.4	0.3	0.1	0.4	0.8	1.0	1.1	3.0	3.0	4.7
2.9500	0.9	0.4	0.3	0.1	0.4	0.9	1.3	0.3	3.3	3.5	5.2
2.9810	0.9	0.4	0.3	0.5	0.5	1.2	1.6	0.2	3.4	3.8	5.6
3.0000	0.9	0.4	0.3	1.6	0.4	0.9	1.7	0.7	3.5	3.9	6.0
3.0200	0.9	0.4	0.3	1.1	0.5	0.9	1.7	0.7	3.6	4.1	6.1
3.0800	0.9	0.4	0.3	1.1	0.4	1.0	1.9	0.8	3.9	4.6	8.8

# 系统误差—共振态参数提取

- BW参数化
- 引用PDG的参数

# 小结

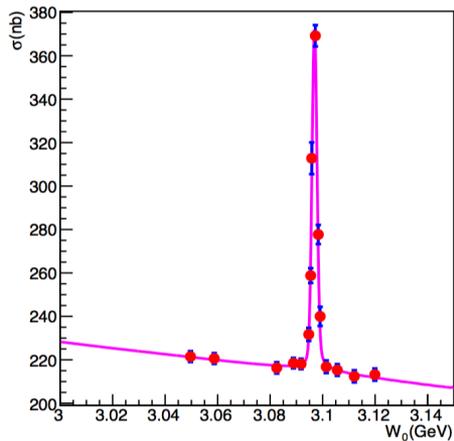
- 已完成截面和形状因子的测量
- 谱形拟合结果还需进一步完善

# 能散测量

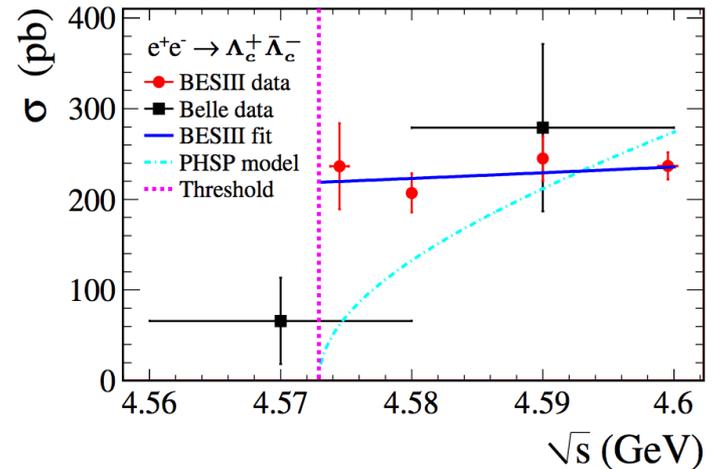
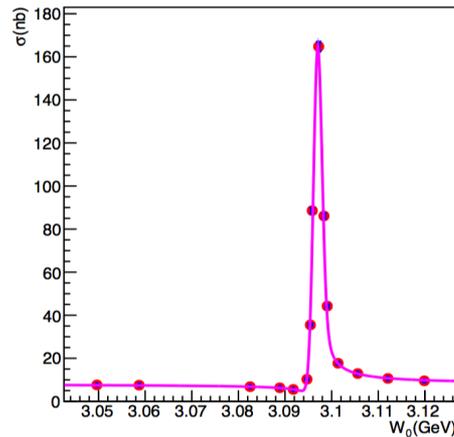
# 物理意义

- 能量信息在对撞实验中至关重要
- 能散信息可以提高实验精度
- 能散可以修正对物理过程的描述

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$



$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

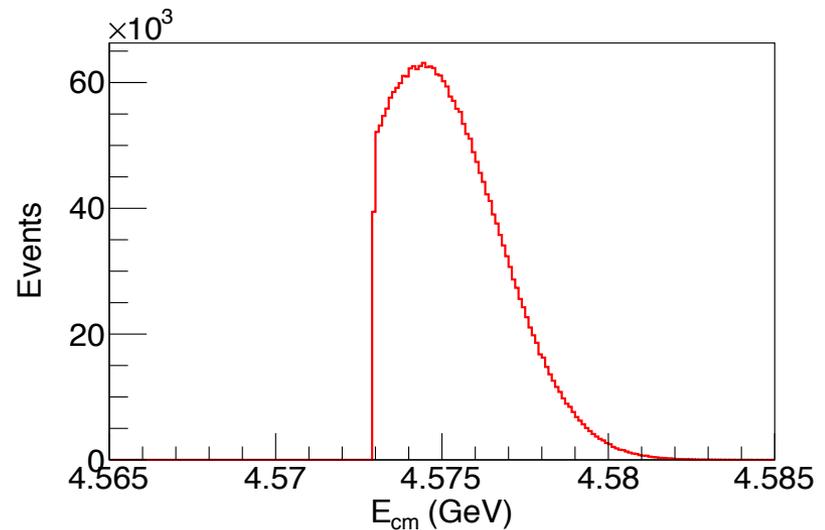


# 测量方法

- 对窄共振态的扫描
- 利用能散随能量的变化

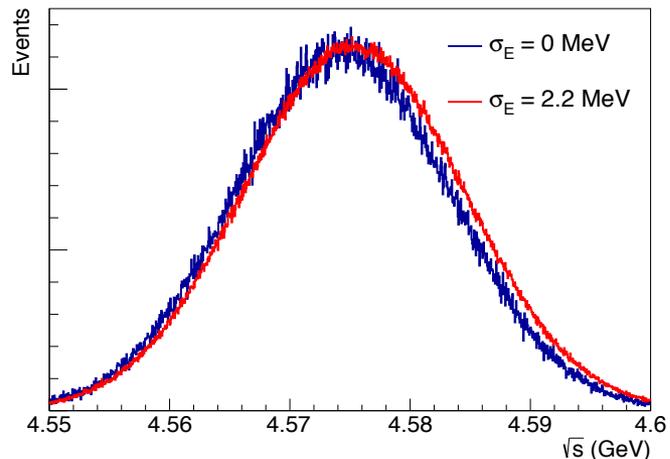
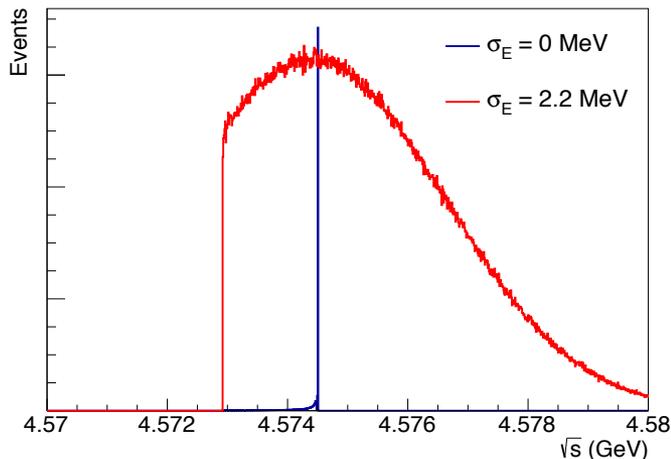
# 利用阈值效应测能散

- 利用反应过程，可利用末态粒子的四动量信息重建初态质心能量
- 当质心能量接近反应过程的阈值时，质心能量的平均值随能散变化
- 利用MC模拟，找到平均质心能量与能散的关系，从而测量能散
- $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-$



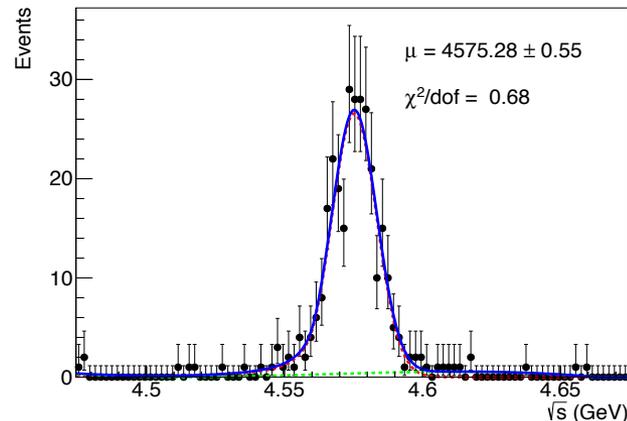
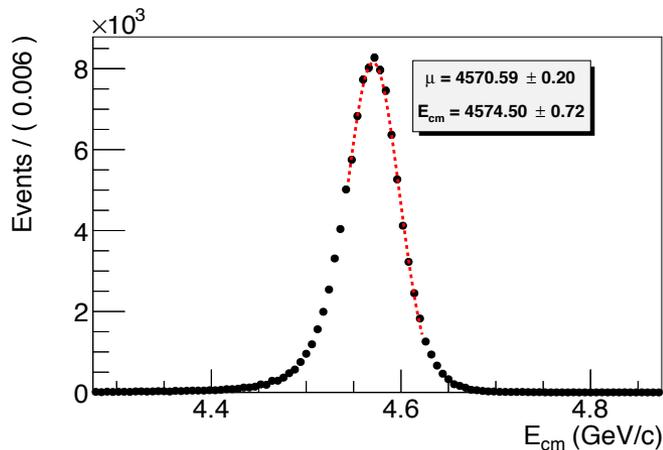
# MC模拟

- 模拟重现能散造成的质心能量偏移
- 低于阈值的对撞实例不会贡献到  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-$
- 探测器的响应用高斯分布模拟
- 当能散与  $E_{cm} - E_{th}^{\Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-}$  接近时，质心能量偏移明显



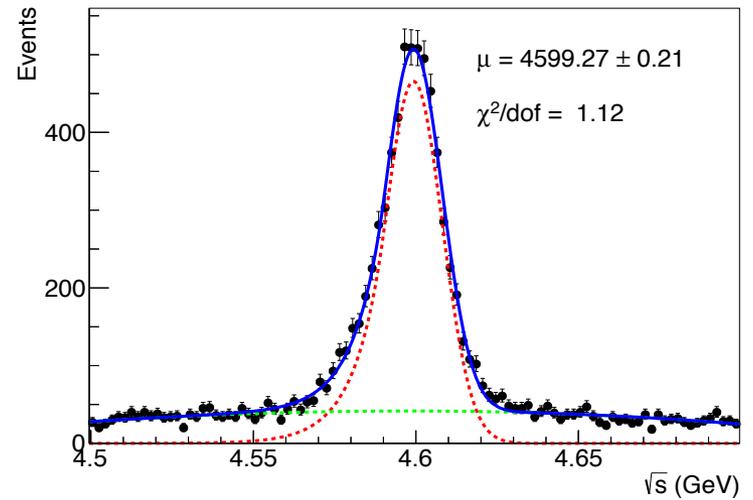
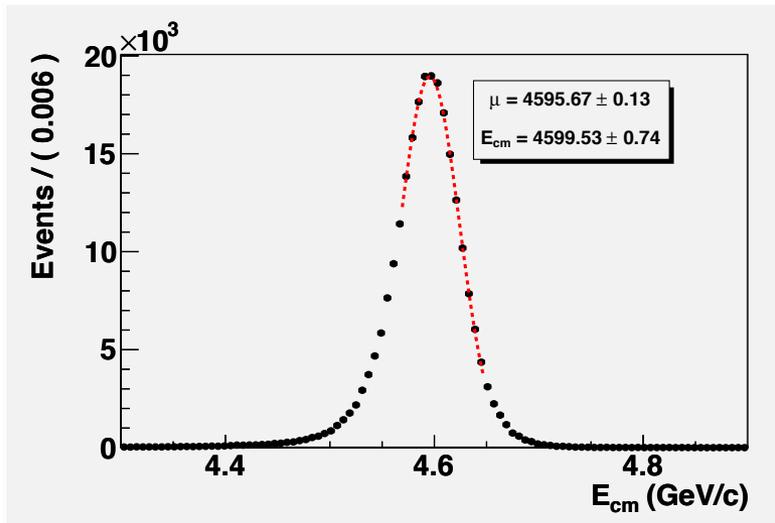
# 数据实测1

- 利用BESIII在4575 MeV取的数据
- $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  过程测得的能量作为实际质心能量
- $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$  过程测能散造成的质心能量偏移
  - 用  $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$  及共轭过程重建中间粒子
  - 利用单标记方法测 $\Lambda_c$ 对中的一个，提高统计量
  - 修正可能的动量偏移，要求  $M(pK\pi) = m(\Lambda_c)$



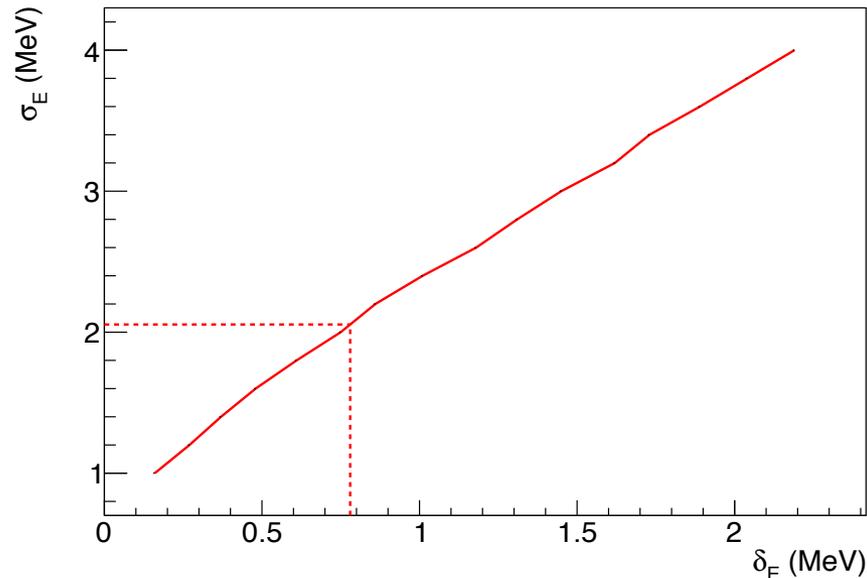
# 数据实测2

- 利用4600 MeV的数据



# 能散与质心能量偏移的关系

- 利用MC
- 假设：
  - 阈值附近截面阶跃
  - 质心能量按高斯展宽
  - 初态辐射：
$$p(k) \sim \beta k^{\beta-1} (1 - k^{1-\beta} + 0.5k^{2-\beta})$$
  - $\Lambda_c$ 参数的不确定性按PDG抽样
  - 高斯分布描述探测器响应
  - $\delta E = 0.78 \text{ MeV}, \sigma E = 2.1 \text{ MeV}$



# 小结

- 已完成方法的模拟与实验验证
- 进一步完善

# 后续工作计划

- 完成奇异介子产生截面谱形拟合的误差分析
- 完善能散测量的结果
- 准备文章
- 完成毕业论文的撰写
- 完成一些其他工作