

在 $B^- \rightarrow \bar{p} J/\psi \Lambda$ 反应中利用耦合道 模型抽取 $P_{cs}(4338)$ 极点

吴佳俊 (中国科学院大学)

合作者: Satoshi Nakamura

2208.11995

第三届LHCb前沿物理研讨会

2023年4月16日

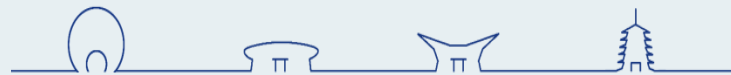


中国科学院大学


University of Chinese Academy of Sciences

目录

- 背景介绍
- 研究 $\bar{c}cqqq$ 的初衷
- 数据驱动型的耦合道模型
- $B^- \rightarrow \bar{p} J/\psi \Lambda$ 的实验数据分析
- 小结



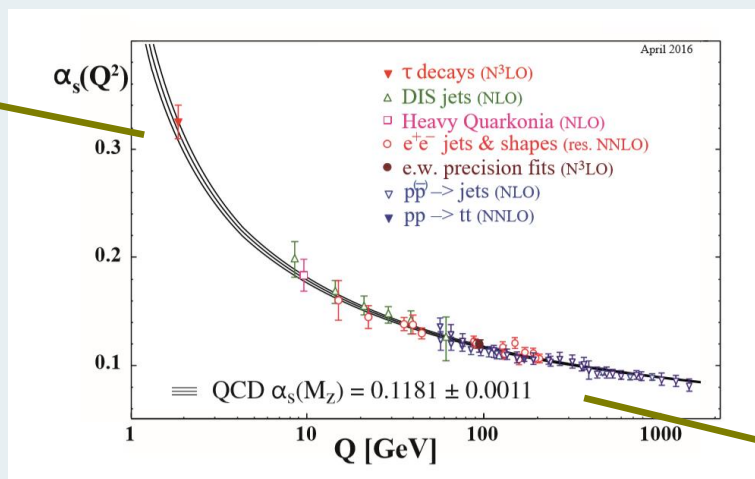
背景介绍



	Gravity	Weak	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	$W^+ W^- Z^0$	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and $W^+ W^-$	Quarks and Gluons

u	c	t
d	s	b
ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ

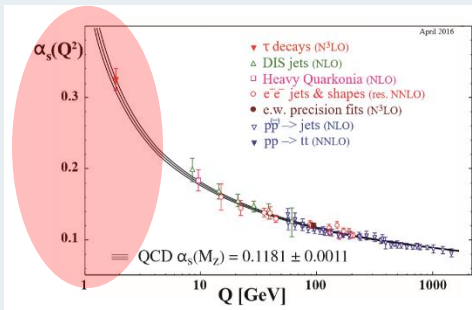
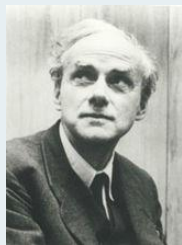
色禁闭
非微扰



QCD 理论

渐进自由

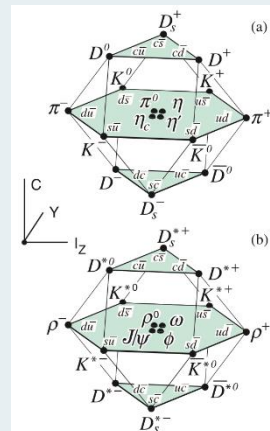
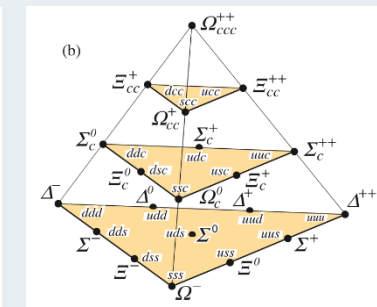
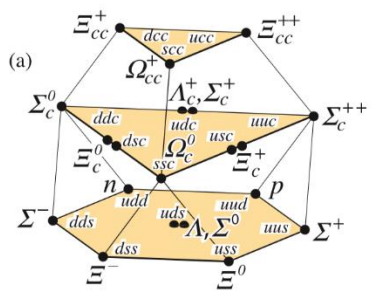
不能计算的痛苦!!!



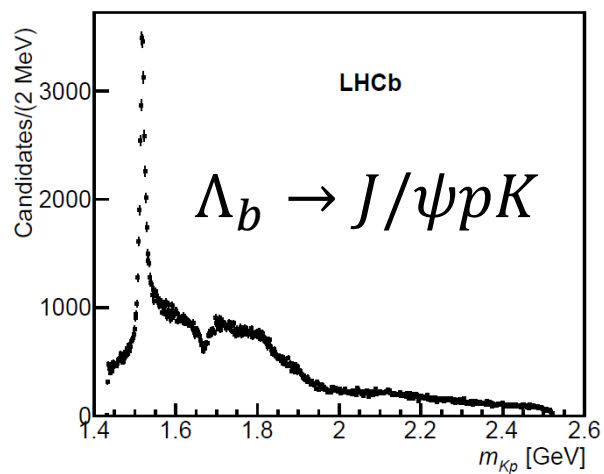
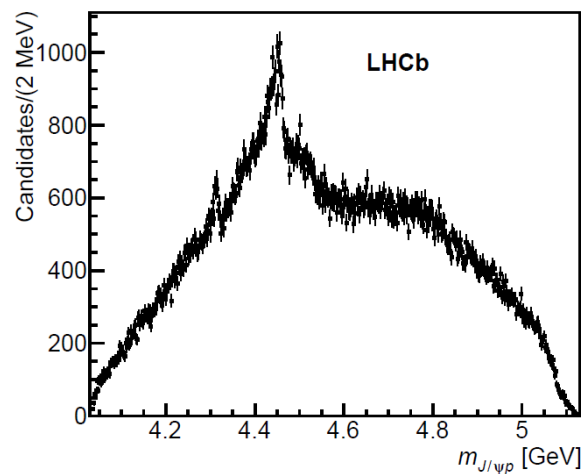
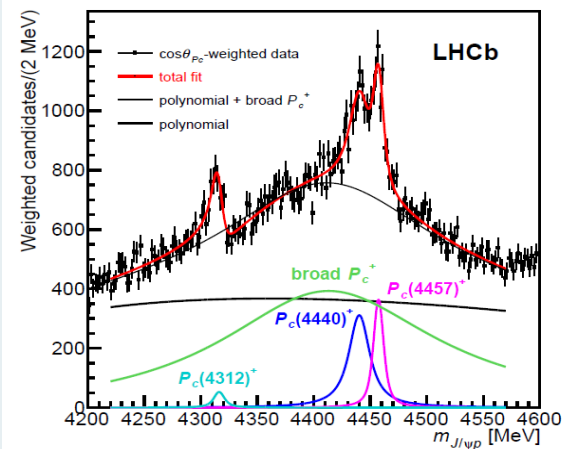
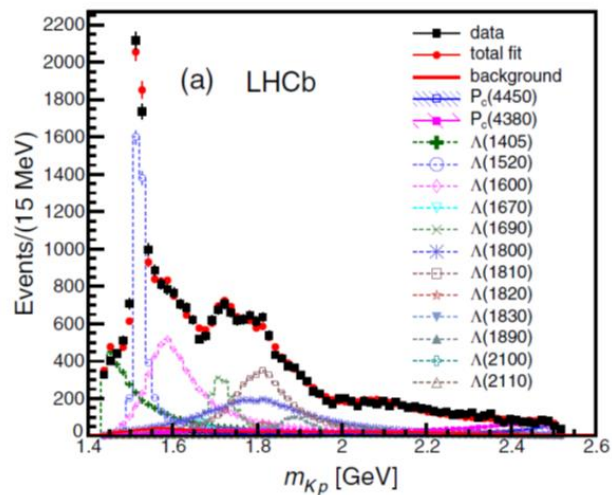
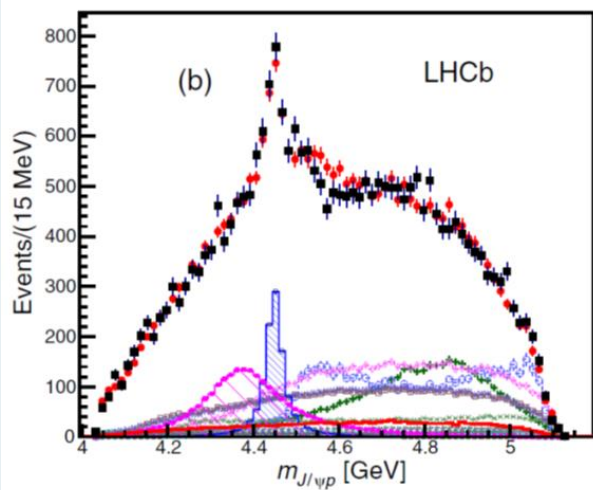
狄拉克: Methods in Theoretical Physics (《From a life of physics》)

对理论物理学家而言，主要有两种研究方式，其一是以实验为出发点，这就必须保持与实验物理学家紧密接触，获悉他们所得到的的一切结果，并试图将这些结果恰如其分地安排到令人满意，使人信服的物理框架中去。其二是以数学为基础，检验与批判现有的理论，准确找出并消除现有理论中的缺陷。这里困难在于，消除缺陷而不损坏现有理论的巨大成就，当然，这两种一般的研究方式的区别不是那样泾渭分明，在这两极端之间还存在着种种程度不同的方式。

盖尔曼和茨威格提出了夸克模型



两次LHCb实验结果



Pc(4380)	$4380 \pm 8 \pm 29$	$205 \pm 18 \pm 86$
Pc(4450)	$4449.8 \pm 1.7 \pm 2.5$	$39 \pm 5 \pm 19$
Pc(4312)	$4311.9 \pm 0.7^{+6.8}_{-0.6}$	$9.8 \pm 2.7^{+3.7}_{-4.5}$
Pc(4440)	$4440.3 \pm 1.3^{+4.1}_{-4.7}$	$20.6 \pm 4.9^{+8.7}_{-10.5}$
Pc(4457)	$4457.3 \pm 0.6^{+4.1}_{-1.7}$	$6.4 \pm 2.0^{+5.7}_{-1.9}$

LHCb PRL 115 (2015) 072001

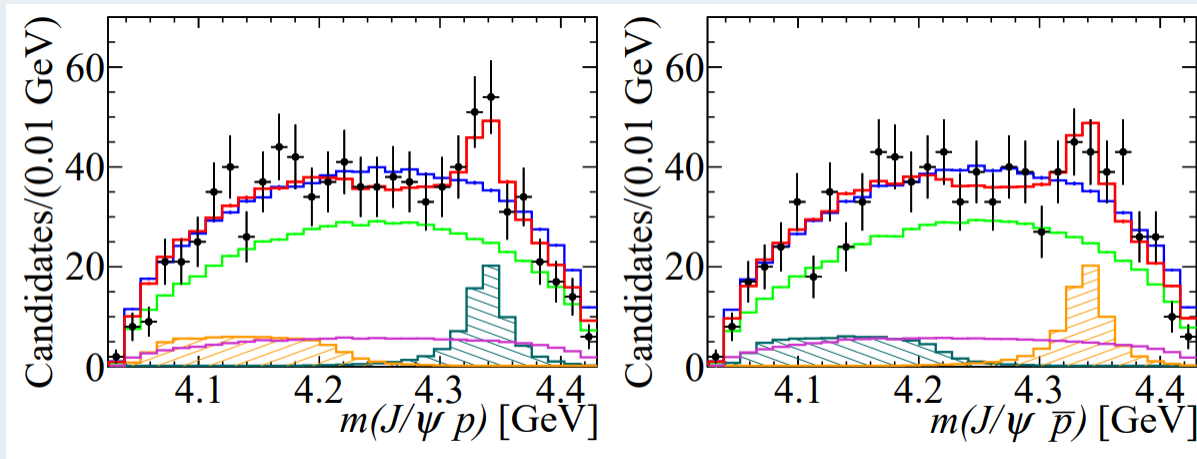
引用 1515

PRL 115 (2015) 072001

引用 548

P_c(4337)

LHCb collaboration Phys. Rev. Lett. 128 (2022) 6, 062001



$$B_s^0 \rightarrow J/\psi p \bar{p}$$

$$M_{P_c} = 4337_{-4}^{+7} {}_{-2}^{+2} \text{ MeV},$$

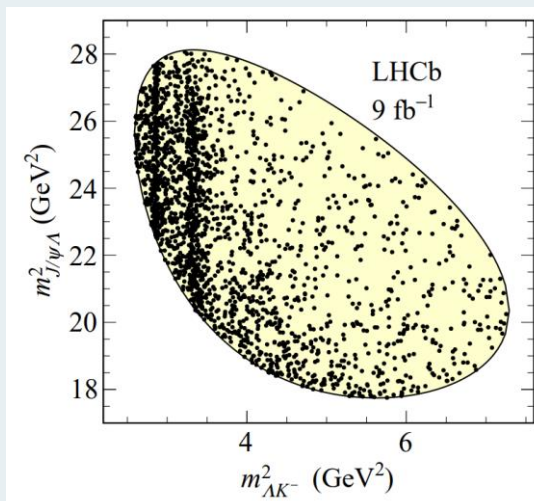
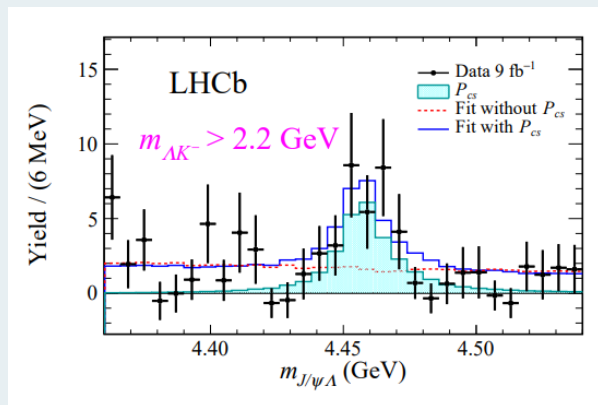
$$\Gamma_{P_c} = 29_{-12}^{+26} {}_{-14}^{+14} \text{ MeV},$$

$$3.1 - 3.7\sigma$$



Pcs的实验结果

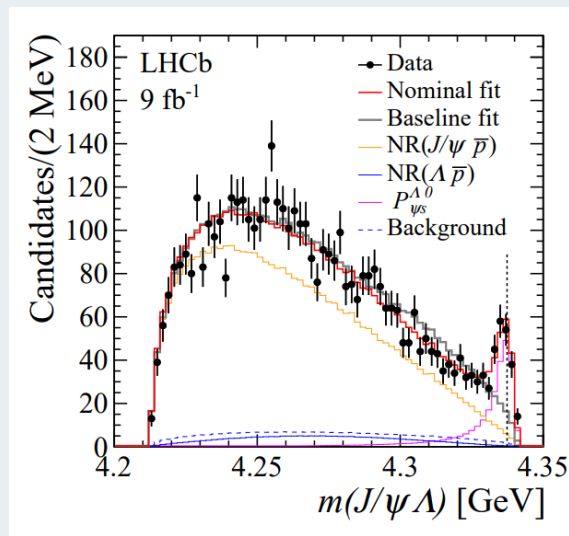
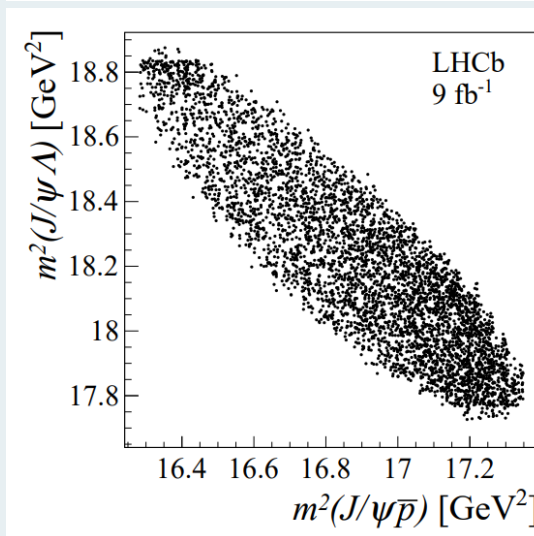
$P_{cs}(4459)$ $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$
Sci.Bull. 66 (2021) 1278-1287



质量
 $4458.8 \pm 2.9_{-1.1}^{+4.7}$ MeV
 宽度
 $17.3 \pm 6.5_{-5.7}^{+8.0}$ MeV
 置信度
 $P \sim 3\sigma$

$P_{cs}(4338)$ $B^- \rightarrow J/\psi \Lambda \bar{p}$
arXiv:2210.10346

质量
 $4338.2 \pm 0.7 \pm 0.4$ MeV
 宽度
 $7.0 \pm 1.2 \pm 1.3$ MeV
 置信度 $J^P = \frac{1}{2}^-$
 $P > 15\sigma$

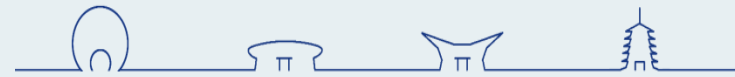


为什么BW形式不好

- 这里的关键在于接近于 $E_c \bar{D}$ 的阈值，接近阈值会有两个明显的效应。
- 1. 运动学的cusp效应，这类效应可能不对应到一个复平面的极点，自然BW形式也不能用。
- 2. 在阈上，宽度的能量依赖性由于衰变道的打开会变得和能量非常敏感。 $\Gamma(\delta E = E - m_1 - m_2 > 0) \propto q^{2L+1} = \sqrt{2\delta E \mu}^{2L+1}$
- 3. 在阈下，宽度的会有一个纯虚数的贡献，也就是说裸质量实际上是能量依赖的，而BW形式中没有这种依赖性。

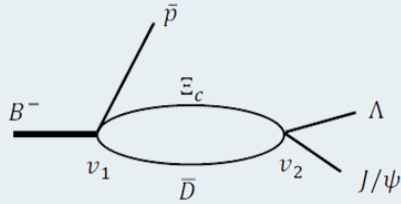
$$\Gamma(-\delta E = -E + m_1 + m_2 > 0) \propto q^{2L+1} = \left(i\sqrt{-2\delta E \mu}\right)^{2L+1}$$

当然单道单态用Flatten形式代替BW形式可以近似替代2, 3的效应，但是最佳的办法还是应用耦合道模型进行满足么正化的计算。

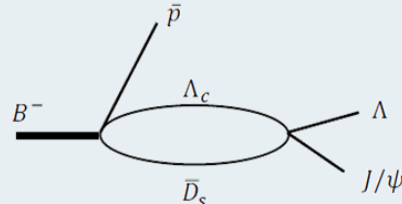


Data-driven 耦合道模型

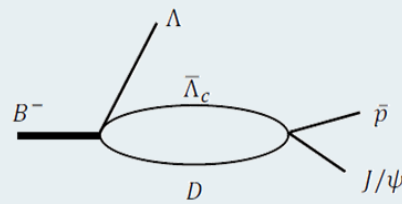
2208.11995



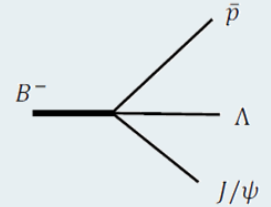
(a)



(b)



(c)



(d)

$$v_1 = c_{\Xi_c \bar{D} \bar{p}, B^-}^{1/2^-} \langle t_{\bar{D}} t_{\bar{D}}^z t_{\Xi_c} t_{\Xi_c}^z | 00 \rangle f_{\Xi_c \bar{D}}^0 F_{\bar{p} B^-}^0 \quad f_{ij}^L = \frac{(1 + q_{ij}^2/\Lambda^2)^{-2-\frac{L}{2}}}{\sqrt{E_i E_j}}, \quad F_{kl}^L = \frac{(1 + \tilde{p}_k^2/\Lambda^2)^{-2-\frac{L}{2}}}{\sqrt{E_k E_l}},$$

$$v_2 = h_{\gamma, \alpha} \langle t_{\alpha 1} t_{\alpha 1}^z t_{\alpha 2} t_{\alpha 2}^z | T T^z \rangle \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\epsilon}_\psi f_\gamma^0 Y_{00} f_\alpha^0 Y_{00} \quad \text{顶点相互作用}$$

$$\sigma_\alpha(E) = \sum_{t^z} \int dq q^2 \frac{\langle t_{\alpha 1} t_{\alpha 1}^z t_{\alpha 2} t_{\alpha 2}^z | T T^z \rangle^2 [f_\alpha^0(q)]^2}{E - E_{\alpha 1}(q) - E_{\alpha 2}(q) + i\varepsilon} \quad [G^{-1}(E)]_{\beta\alpha} = \delta_{\beta\alpha} - h_{\beta, \alpha} \sigma_\alpha(E)$$

耦合道效应

总振幅

$$A_{\psi \Lambda(1/2^-)}^{\text{loop}} = \sum_{\alpha, \beta} \Xi_c \bar{D}, \Lambda_c \bar{D}_s \quad h_{\psi \Lambda, \beta} c_{\alpha \bar{p}, B^-}^{1/2^-} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\epsilon}_\psi f_{\psi \Lambda}^0(p_\psi) \sigma_\beta(M_{\psi \Lambda}) G_{\beta\alpha}(M_{\psi \Lambda}) F_{\bar{p} B^-}^0,$$

$$A_{\psi \bar{p}(1/2^+)}^{\text{dir}} = c_{\psi \bar{p} \Lambda, B^-}^{1/2^+} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\epsilon}_\psi f_{\psi \bar{p}}^0 F_{\Lambda B^-}^0$$

$$A_{\psi \bar{p}(1/2^+)}^{\text{loop}} = h_{\psi \bar{p}, \bar{\Lambda}_c D} c_{\bar{\Lambda}_c D \Lambda, B^-}^{1/2^+} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\epsilon}_\psi f_{\psi \bar{p}}^0(p_\psi) \sigma_{\bar{\Lambda}_c D}(M_{\psi \bar{p}}) G_{\bar{\Lambda}_c D, \bar{\Lambda}_c D}(M_{\psi \bar{p}}) F_{\Lambda B^-}^0.$$



Data-driven 耦合道模型参数 [2208.11995](https://arxiv.org/abs/2208.11995)

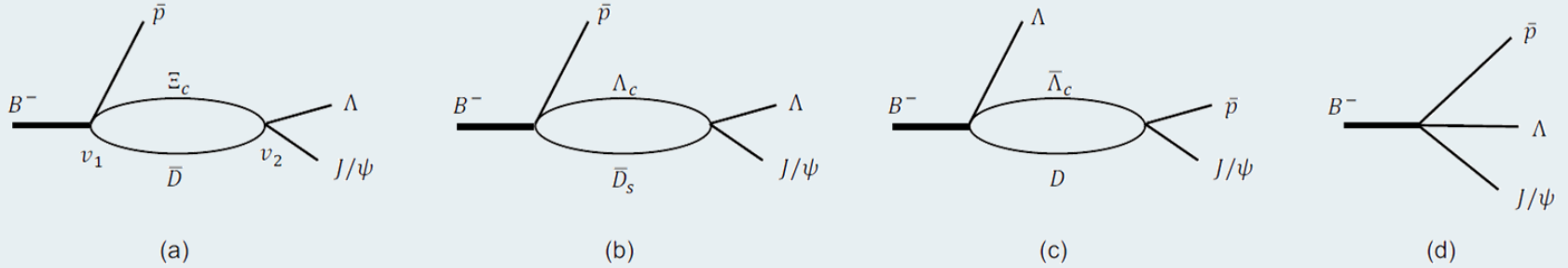
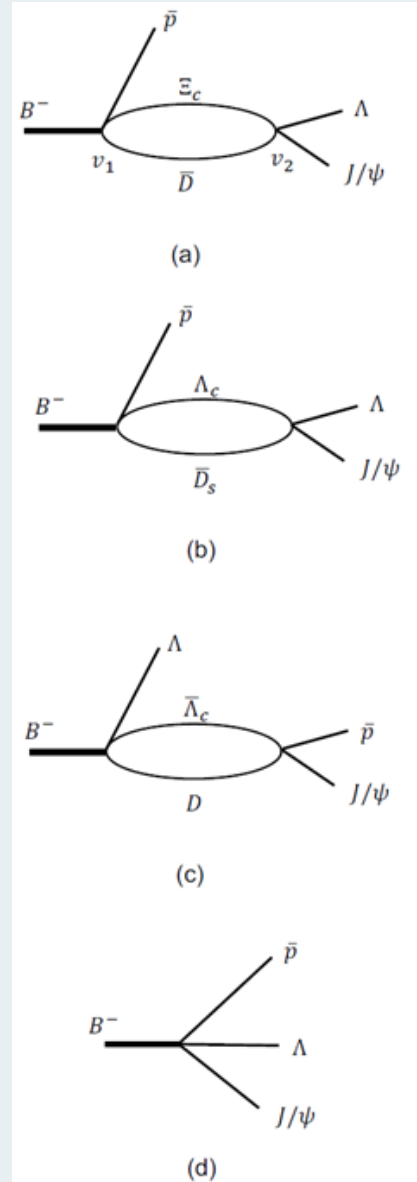
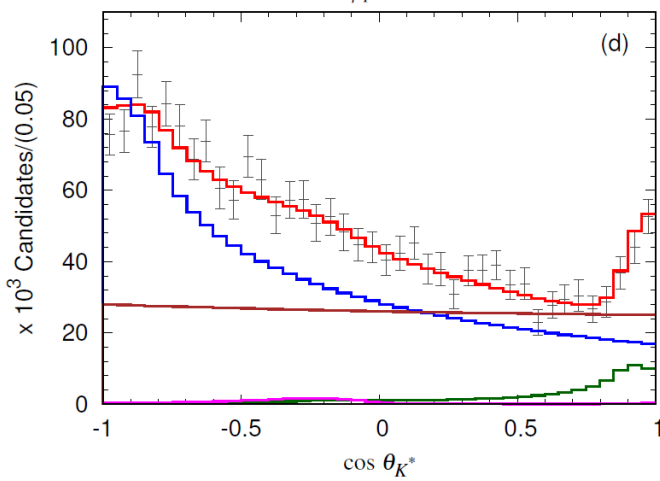
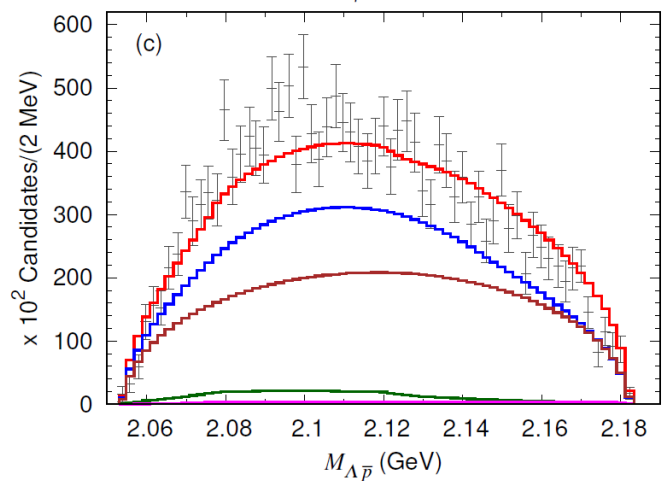
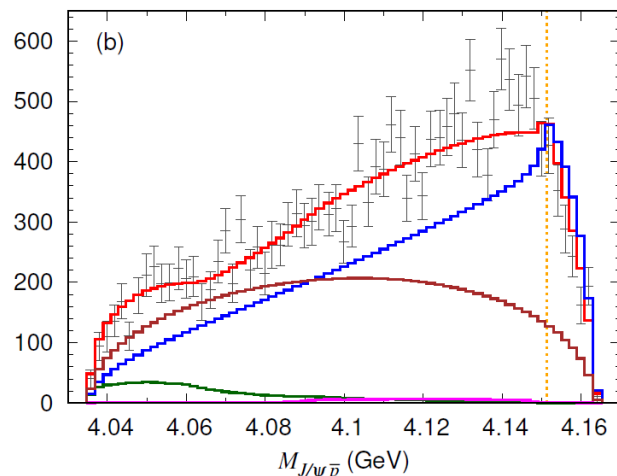
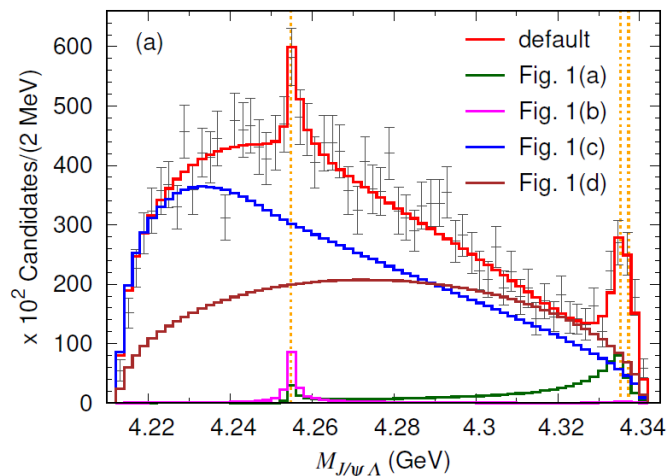


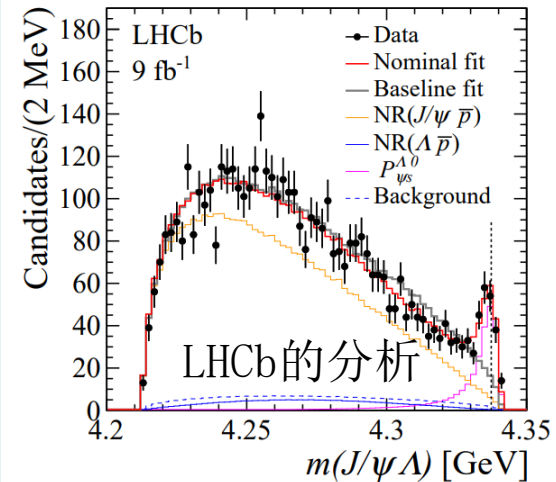
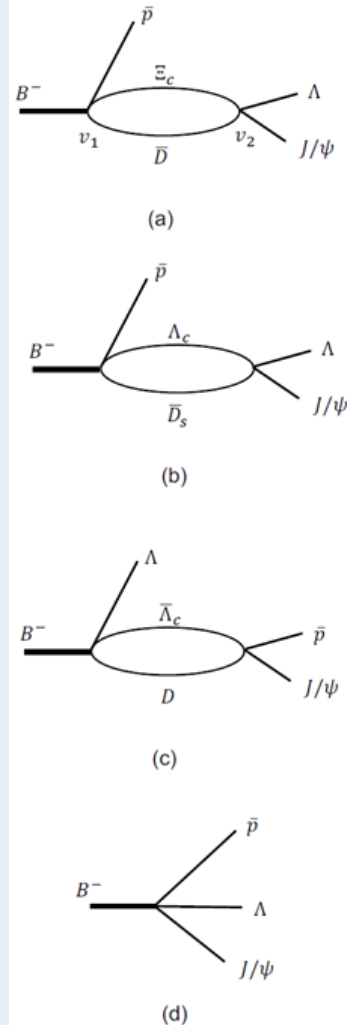
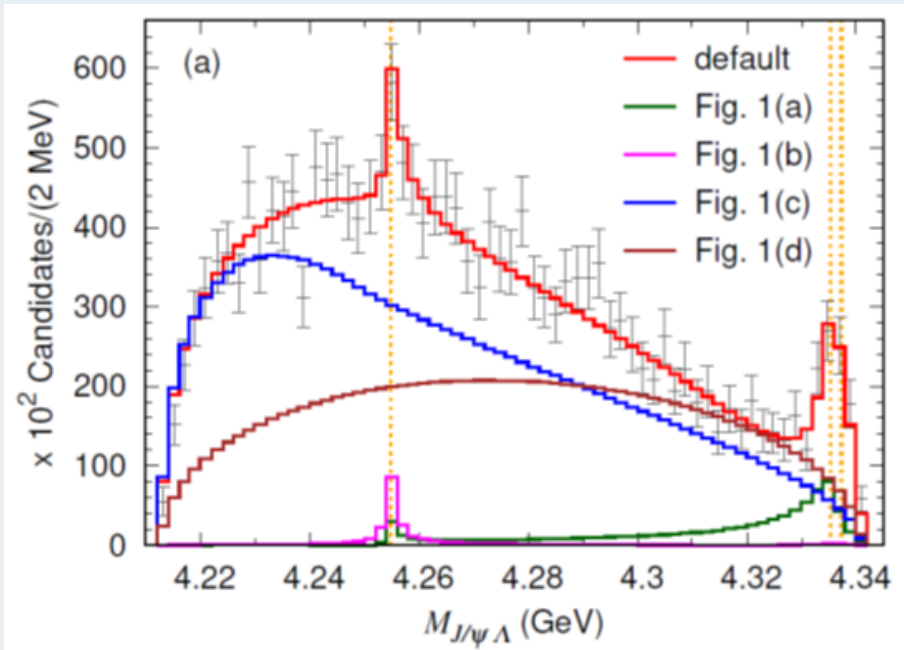
TABLE II. Parameter values for $B^- \rightarrow J/\psi \Lambda \bar{p}$ models. The second, third, and fourth columns are for the default, alternative ($h_{\Lambda_c \bar{D}_s, \Lambda_c \bar{D}_s} = 0$), and no-pole models, respectively. For the arbitrariness, we may multiply a common overall complex factor to the parameters in the 1-4th rows. $h_{\psi \Lambda, \alpha} = h_{\psi \Lambda, \Lambda_c \bar{D}_s} = h_{\psi \Lambda, \Xi_c \bar{D}}$.

$h_{\psi \Lambda, \alpha} c_{\Xi_c \bar{D} \bar{p}, B^-}^{1/2^-}$	$(0.81 \pm 0.23) i$	$(-1.24 \pm 0.27) + (0.40 \pm 0.74) i$	$(0.42 \pm 1.24) + (7.88 \pm 0.47) i$
$h_{\psi \Lambda, \alpha} c_{\Lambda_c \bar{D}_s \bar{p}, B^-}^{1/2^-}$	$(-0.24 \pm 0.07) + (0.28 \pm 0.14) i$	$(-1.40 \pm 0.28) i$	-2.09 ± 0.28
$h_{\psi \bar{p}, \bar{\Lambda}_c D} c_{\bar{\Lambda}_c D \Lambda, B^-}^{1/2^+}$	$(-1.28 \pm 4.23) + (11.48 \pm 3.00) i$	$(-6.19 \pm 3.72) + (10.32 \pm 2.69) i$	$(5.14 \pm 0.40) + (3.17 \pm 1.16) i$
$c_{\psi \bar{p} \Lambda, B^-}^{1/2^+}$	-9.84 ± 2.26	-8.51 ± 2.46	-2.98 ± 2.17
$h_{\Xi_c \bar{D}, \Xi_c \bar{D}}$	-5.29 ± 0.36	-4.02 ± 0.30	0 (fixed)
$h_{\Lambda_c \bar{D}_s, \Lambda_c \bar{D}_s}$	-3.38 ± 0.22	0 (fixed)	0 (fixed)
$h_{\Xi_c \bar{D}, \Lambda_c \bar{D}_s}$	2.68 ± 0.31	-1.43 ± 0.95	0 (fixed)
$h_{\bar{\Lambda}_c D, \bar{\Lambda}_c D}$	3.30 ± 1.57	2.81 ± 1.60	0 (fixed)
Λ (MeV)	1000 (fixed)	1000 (fixed)	1000 (fixed)
参数个数	9+1	8+1	5+1
χ^2/dof	1.21	1.19	1.25

拟合结果



讨论和结论(1): 各种机制贡献



图c, d贡献最大, 图a, b对峰贡献最大

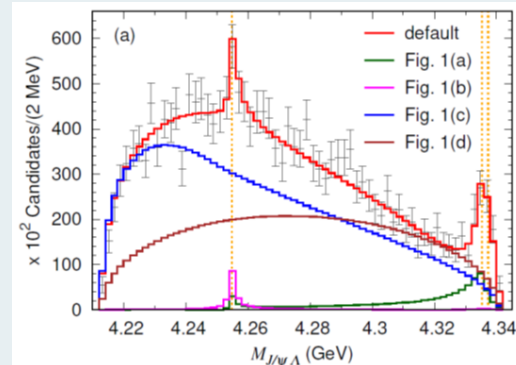
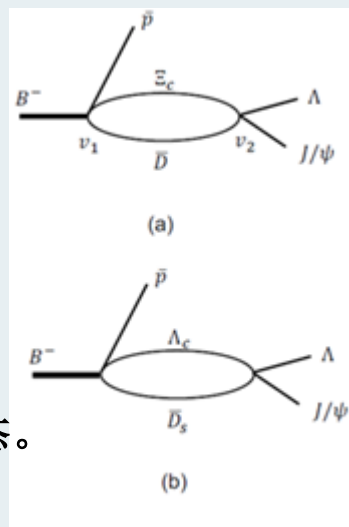
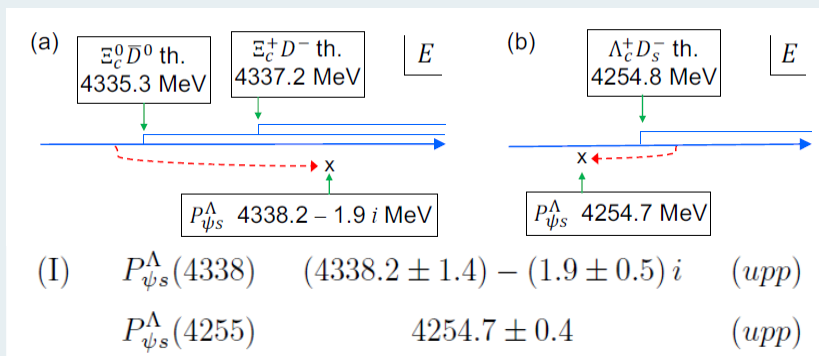
- a $\Xi_c \bar{D}$ 色压低
- b $\Lambda_c \bar{D}_s$, $\Lambda_c \bar{D}_s \rightarrow J/\psi \Lambda$ 交换 D_s
- c $\bar{\Lambda}_c D$, $\bar{\Lambda}_c D \rightarrow J/\psi \bar{p}$ 交换 D
- d 色压低但是没有圈图压低

1. 我们考虑了耦合道效应, LHCb的分析使用了BW模型。

2. $NR(J/\psi \bar{p})$ 中主要是p波的贡献, 但是我们都是s波, 整体的动量大约是130MeV

3. 我们9个拟合参数, 他们16个。

讨论和结论(2): pole的位置



所有pole都是在耦合道中得到，未直接加共振态。

$P_{CS}(4338)$ 是一个共振态

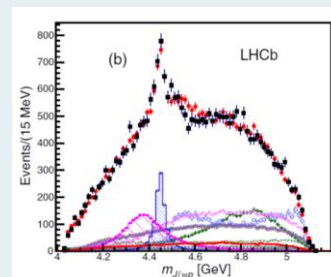
$P_{CS}(4254)$ 是一个虚态

$P_{CS}(4338)$ 主要是 $V_{\Xi_c \bar{D}, \Xi_c \bar{D}}$ 的吸引相互作用形成的。即使没有 $V_{\Xi_c \bar{D}, \Lambda_c \bar{D}_s}$ 的贡献，也有这个态，可以认为是 $\Xi_c \bar{D}$ 的束缚态。

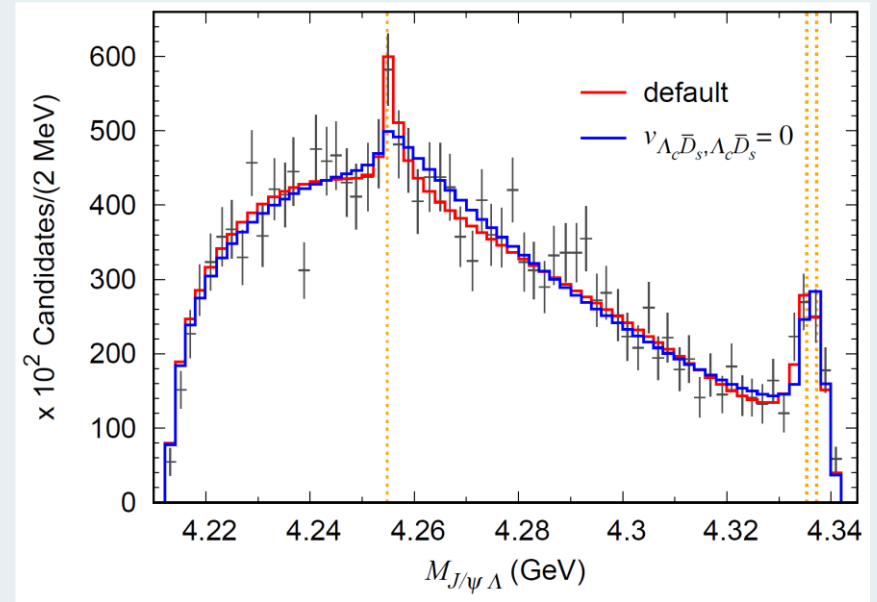
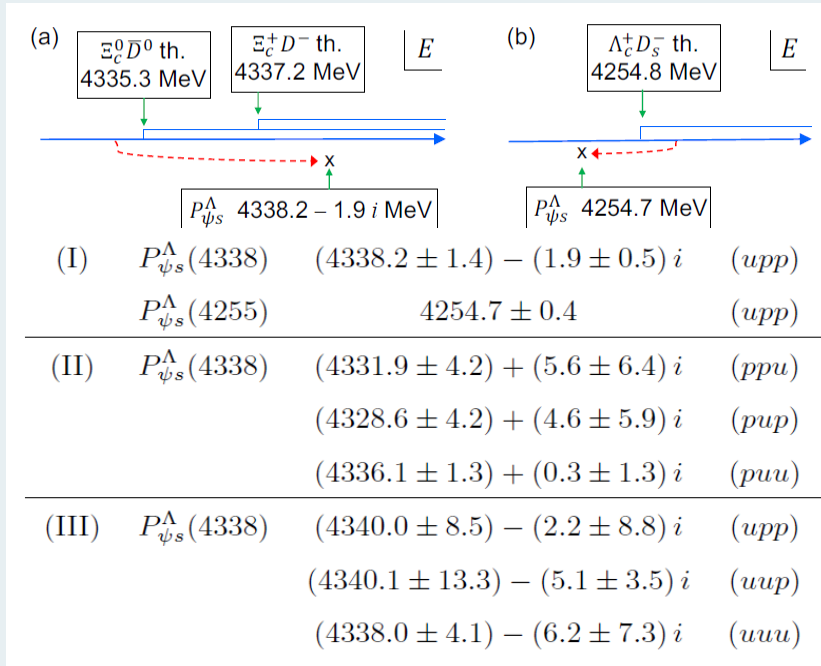
$P_{CS}(4254)$ 是一个虚态，说明 $V_{\Lambda_c \bar{D}_s, \Lambda_c \bar{D}_s}$ 的相互作用就很弱。

 这个和轻矢量介子交换模型是一致的。

能够出现 $P_{CS}(4254)$ 虚态，说明 $\Lambda_c \bar{D}_s \rightarrow \Lambda_c \bar{D}_s$ 至少是一个吸引势，这个吸引势能可能来自于一个双 π 交换，或者直接由于非对角元 $\Xi_c \bar{D} \rightarrow \Lambda_c \bar{D}_s$ 的作用。



讨论和结论(3): 虚态讨论



$P_{cs}(4254)$ 虚态也许仅仅是因为数据的涨落。

理论上我们可以遵循轻矢量介子交换模型, 那么 $V_{\Lambda_c \bar{D}_s, \Lambda_c \bar{D}_s} = 0$, 在该模型下, 这个虚态会消失。同时 $P_{cs}(4338)$ 的极点位置也会变化。

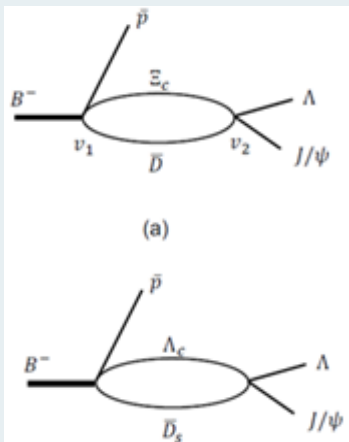
同时我们还尝试用能量依赖的 $V_{\Xi_c \bar{D}, \Xi_c \bar{D}}$, 也可以较好的拟合实验数据。

$h_{\psi\Lambda, \alpha} c_{\Xi_c \bar{D} \bar{p}, B^-}^{1/2-}$	$(0.81 \pm 0.23) i$	$(-1.24 \pm 0.27) + (0.40 \pm 0.74) i$	$(3.85 \pm 3.38) + (-4.29 \pm 10.31) i$
$h_{\psi\Lambda, \alpha} c_{\Lambda_c \bar{D}_s \bar{p}, B^-}^{1/2-}$	$(-0.24 \pm 0.07) + (0.28 \pm 0.14) i$	$(-1.40 \pm 0.28) i$	$(-0.92 \pm 0.49) i$
$h_{\psi \bar{p}, \bar{\Lambda}_c D} c_{\Lambda_c \bar{D}_s \bar{p}, B^-}^{1/2+}$	$(-1.28 \pm 4.23) + (11.48 \pm 3.00) i$	$(-6.19 \pm 3.72) + (10.32 \pm 2.69) i$	$(-11.54 \pm 3.60) + (10.83 \pm 0.64) i$
$c_{\psi \bar{p}, B^-}^{1/2+}$	-9.84 ± 2.26	-8.51 ± 2.46	-14.44 ± 4.21
$h_{\Xi_c \bar{D}, \Xi_c \bar{D}}$	-5.29 ± 0.36	-4.02 ± 0.30	-2.13 ± 1.89
$h_{\Lambda_c \bar{D}_s, \Lambda_c \bar{D}_s}$	-3.38 ± 0.22	0 (fixed)	0 (fixed)
$h_{\Xi_c \bar{D}, \Lambda_c \bar{D}_s}$	2.68 ± 0.31	-1.43 ± 0.95	-4.29 ± 7.51
$h_{\bar{\Lambda}_c \bar{D}, \bar{\Lambda}_c \bar{D}}$	3.30 ± 1.57	2.81 ± 1.60	3.55 ± 0.31
Λ (MeV)	1000 (fixed)	1000 (fixed)	1000 (fixed)
		$h'_{\Xi_c \bar{D}, \Xi_c \bar{D}}$ (MeV ⁻¹)	-0.69 ± 2.37
参数个数	9+1	8+1	9+1
χ^2/dof	1.21	1.19	1.15

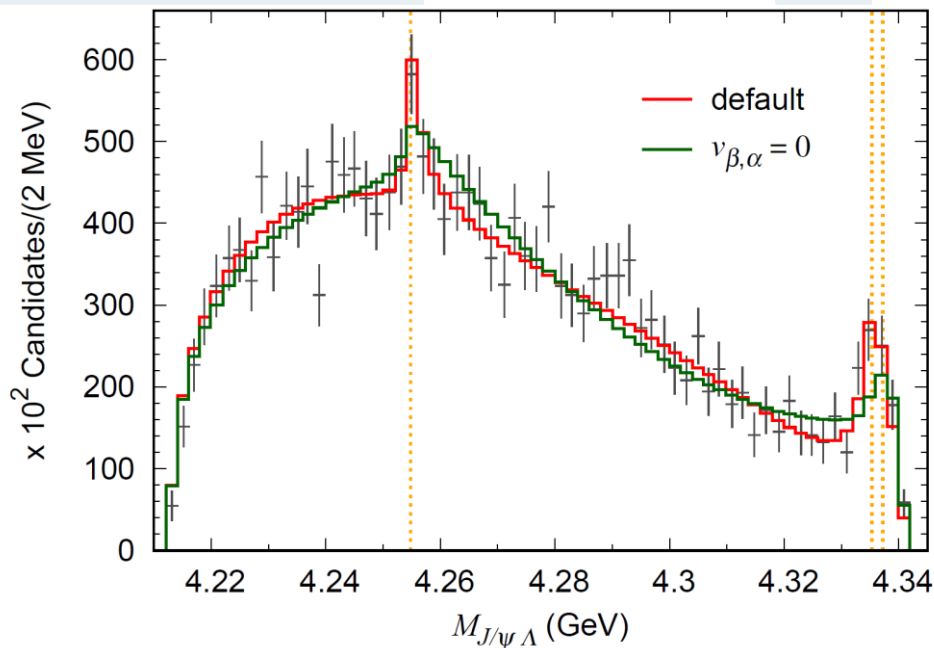
$$h_{\Xi_c \bar{D}, \Xi_c \bar{D}} + h'_{\Xi_c \bar{D}, \Xi_c \bar{D}} \frac{M_{J/\psi\Lambda}^2 - (m_{\Xi_c} + m_{\bar{D}})^2}{2(m_{\Xi_c} + m_{\bar{D}})},$$

讨论和结论(4): 运动学效应

为了检查运动学效应在 $\Xi_c \bar{D}$ 附近的cusp效应, 我们把耦合道效应关闭, 相当于直接求左图的单圈图贡献。重新拟合数据后如表所示。



$h_{\psi\Lambda, \alpha} C_{\Xi_c \bar{D} \bar{p}, B^-}^{1/2^-}$	$(0.81 \pm 0.23) i$	$(0.42 \pm 1.24) + (7.88 \pm 0.47) i$
$h_{\psi\Lambda, \alpha} C_{\Lambda_c \bar{D}_s \bar{p}, B^-}^{1/2^-}$	$(-0.24 \pm 0.07) + (0.28 \pm 0.14) i$	-2.09 ± 0.28
$h_{\psi \bar{p}, \Lambda_c D} C_{\Lambda_c D \Lambda, B^-}^{1/2^+}$	$(-1.28 \pm 4.23) + (11.48 \pm 3.00) i$	$(5.14 \pm 0.40) + (3.17 \pm 1.16) i$
$C_{\psi \bar{p} \Lambda, B^-}^{1/2^+}$	-9.84 ± 2.26	-2.98 ± 2.17
$h_{\Xi_c \bar{D}, \Xi_c \bar{D}}$	-5.29 ± 0.36	0 (fixed)
$h_{\Lambda_c \bar{D}_s, \Lambda_c \bar{D}_s}$	-3.38 ± 0.22	0 (fixed)
$h_{\Xi_c \bar{D}, \Lambda_c \bar{D}_s}$	2.68 ± 0.31	0 (fixed)
$h_{\Lambda_c \bar{D}, \Lambda_c \bar{D}}$	3.30 ± 1.57	0 (fixed)
Λ (MeV)	1000 (fixed)	1000 (fixed)
参数个数	9+1	5+1
χ^2/dof	1.21	1.25

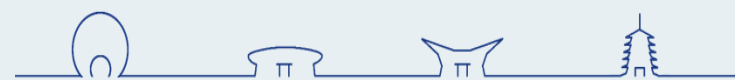


虽然整体的 χ^2 变化很小, 但是在 $P_{CS}(4338)$ 的峰影响很大, χ^2 变大的部分几乎全部来自峰, 因此我们认为:

纯粹的运动学效应不能形成 $P_{CS}(4338)$ 的峰结构。该峰结构应该预示一个五夸克态。

小结

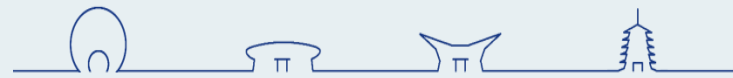
- 分析了LHCb对 $B^- \rightarrow J/\psi \Lambda \bar{p}$ 的观测结果。
- 主要结论如下：
 1. 通过耦合道模型搜索了 $P_{CS}(4338)$ 的pole位置， $(4338.2 \pm 1.4) - (1.9 \pm 0.5)i$ MeV
 2. 仔细探讨了实验在 $\Lambda_c \bar{D}_S$ 阈值处的涨落点，可能预示这里有一个 $P_{CS}(4255)$ 虚态，来自于 $\Lambda_c \bar{D}_S$ 的弱吸引势能。
 3. 排除了 $P_{CS}(4338)$ 的峰结构纯粹由运动学效应引起，预示存在 $P_{CS}(4338)$ 五夸克态。





谢谢!

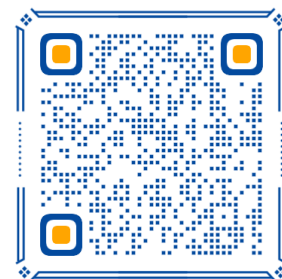
广告



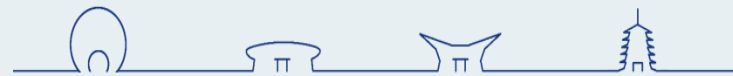
<https://indico.itp.ac.cn/event/106/>

第六届强子谱和强子结构研讨会

26-30 August 2023
Asia/Shanghai timezone



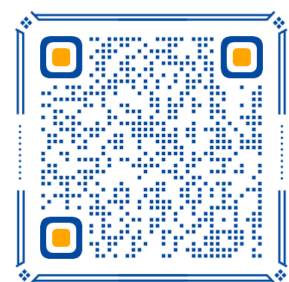
地方组织委员：傅金林、郭奉坤、黄飞、吴佳俊、谢聚军



<https://indico.itp.ac.cn/event/106/>

第六届强子谱和强子结构研讨会

26-30 August 2023
Asia/Shanghai timezone



地方组织委员：傅金林、郭奉坤、黄飞、吴佳俊、谢聚军

