兰州大学物理科学与技术学院

分子态、正反偶夸克态的混合效应
----隐粲四夸克态的研究进展

孙志峰

3月23日

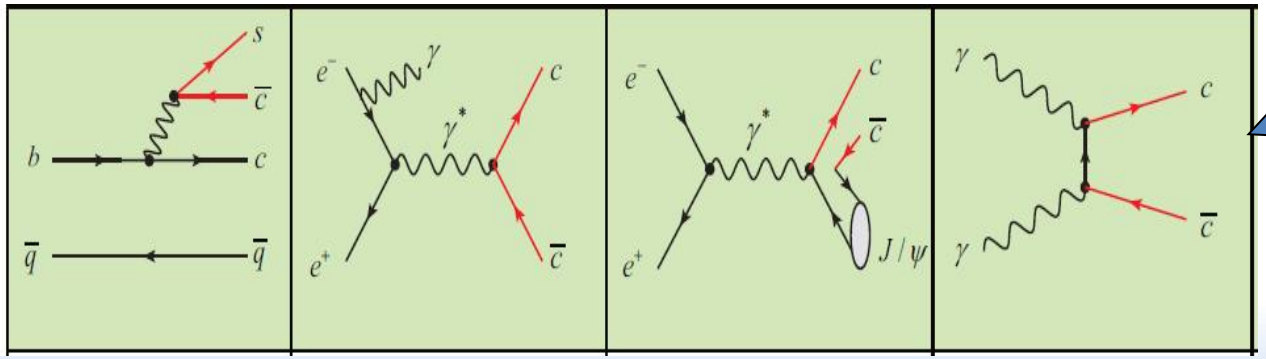
提纲

- 引言
- Z_{cs}粒子的实验发现
- 分子态、正反偶夸克态的混合效应
- X(4500)及Z_c(3900)的研究
- 总结

引言

世界各大高能物理实验: BaBar, CDF, D0, Belle, BES, LHC…

➢ **发现大量的强子(~GeV)** → **非微扰问题**



- 正负电子湮灭
- 双光子熔合
- B 介子衰变
- 初态电子辐射

强子分类

介子：由一对正反夸克构成

重子：由三个夸克构成

奇特强子： 电荷、自旋、宇称等性质在介子、重子框架下无法解释

奇特强子分为：分子态，正反偶夸克态，胶球，混杂态 ...

理论研究方法：

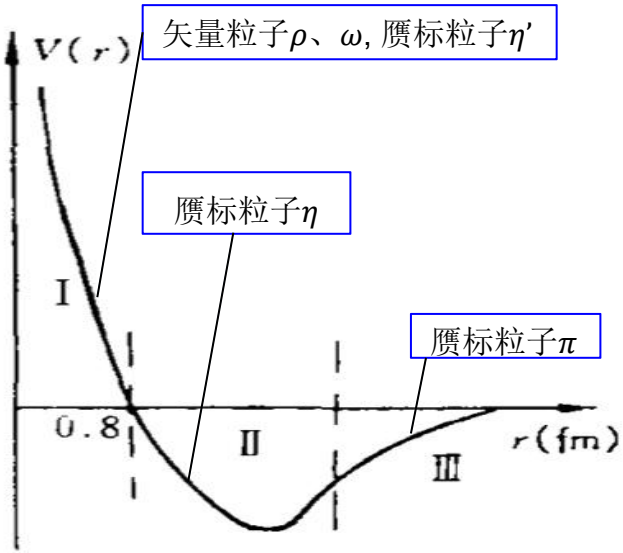
有效场论：局域隐规范理论、手征微扰理论等

唯象模型：夸克模型、QCD求和规则等

格点QCD

有效场论框架下的相互作用

- 强子与强子之间的作用力
- 强相互作用在强子之外的剩余相互作用
- 我们将引入偶夸克交换势
  (可以研究分子态与正反偶夸克态的混合)

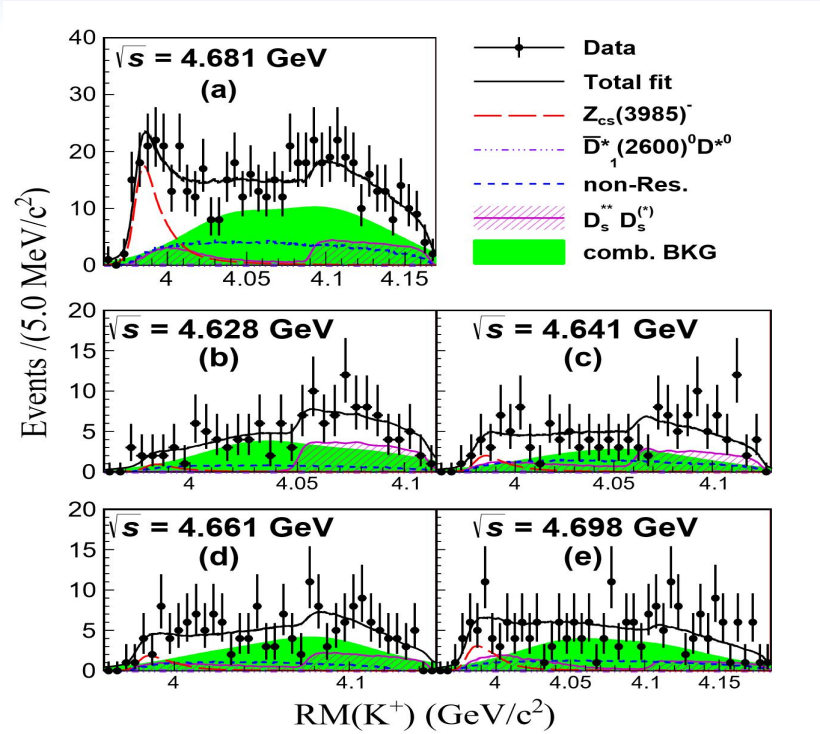


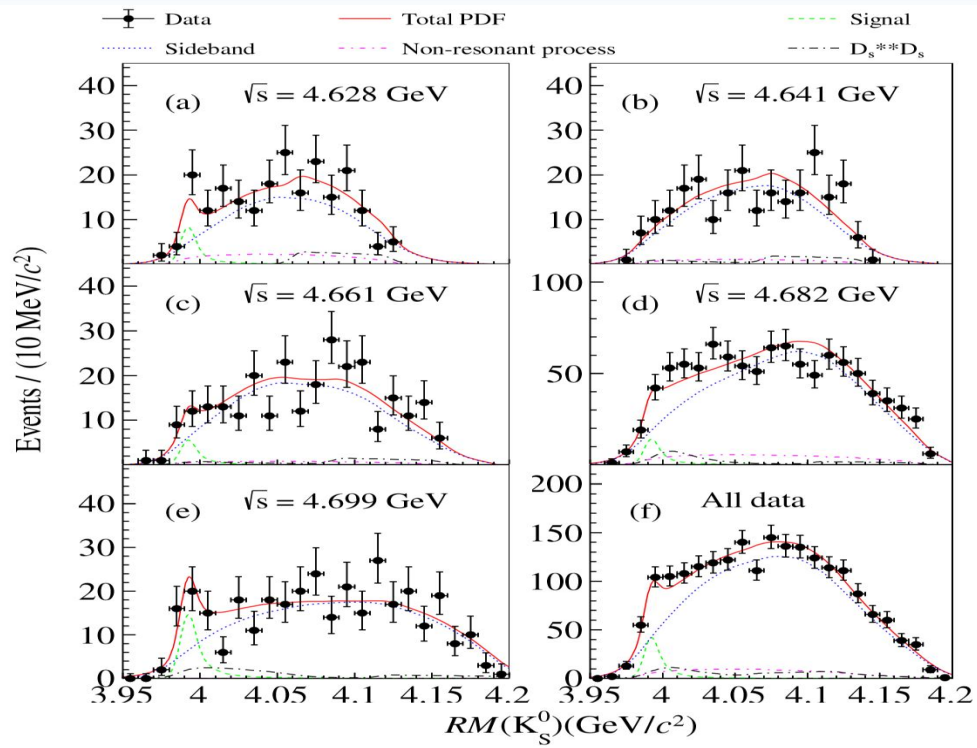
注：偶夸克(diquark)是由两个“正”夸克构成的集团

正反偶夸克态(diquark-antidiquark state)是由偶夸克、反偶夸克构成的集团

Z_{cs}粒子的实验发现

$Z_{cs}(3985)$:





$$m = 3982.5^{+1.8}_{-2.6} \pm 2.1 \text{ MeV}$$

$$\Gamma = 12.8^{+5.3}_{-4.4} \pm 3.0 \text{ MeV}$$

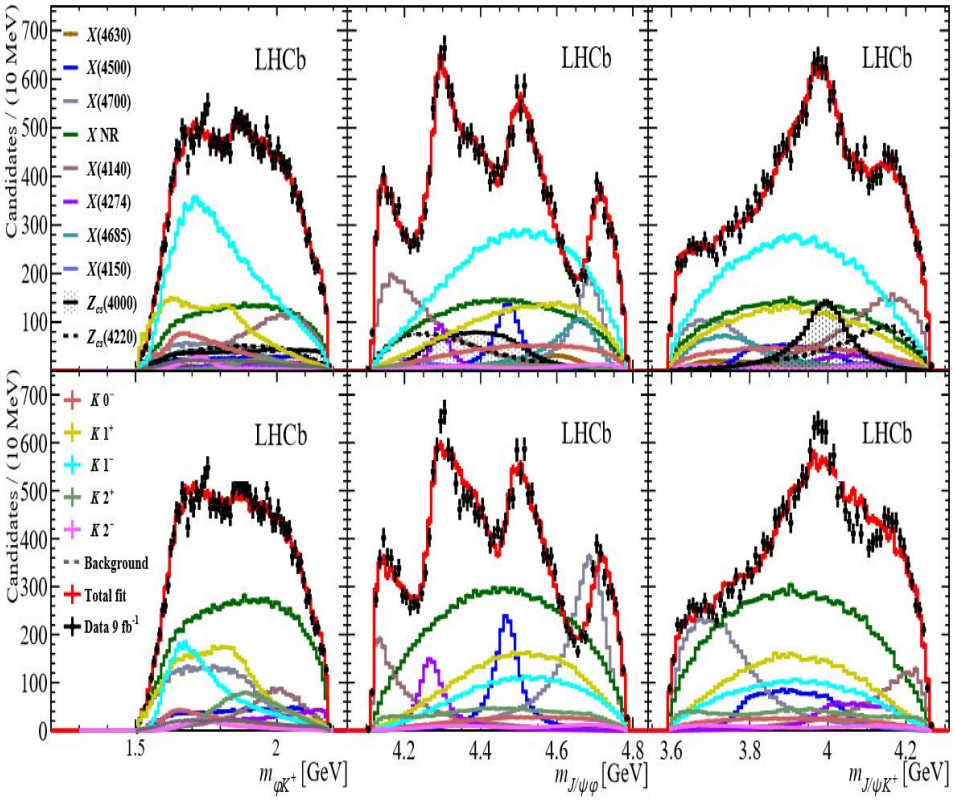
$$m = (3992.2 \pm 1.7 \pm 1.6) \text{ MeV}$$

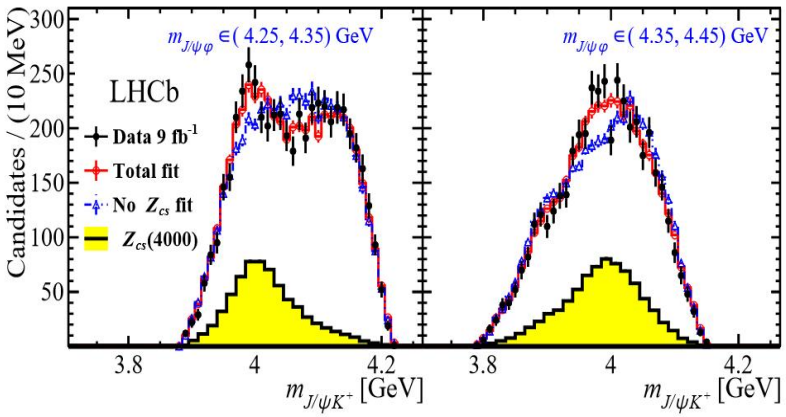
$$\Gamma = (7.7^{+4.1}_{-3.8} \pm 4.3) \text{ MeV}$$

PRL126,102001(2021)

PRL129, 112003(2022)

$Z_{cs}(4000)$、$Z_{cs}(4220)$：





$$m_{Z_{cs}(4000)^+} = 4003 \pm 6^{+4}_{-14}\ \text{MeV},$$
$$\Gamma_{Z_{cs}(4000)^+} = 131 \pm 15 \pm 26\ \text{MeV},$$
$$m_{Z_{cs}(4220)^+} = 4216 \pm 24^{+43}_{-30}\ \text{MeV},$$
$$\Gamma_{Z_{cs}(4220)^+} = 233 \pm 52^{+97}_{-73}\ \text{MeV}.$$

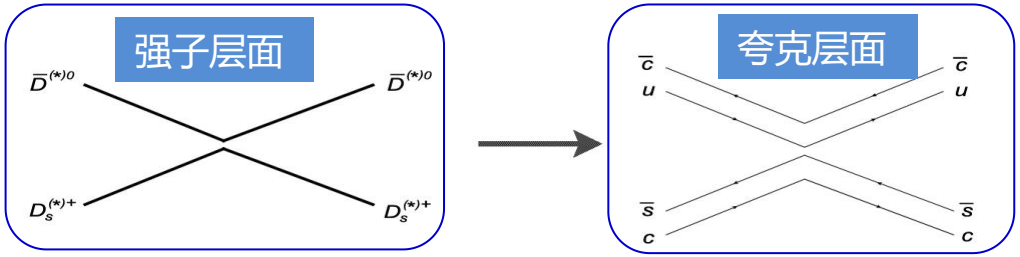
夸克组分：$c\bar{c}u\bar{s}$

PRL127, 082001 (2021)

分子态、正反偶夸克态的混合效应

Z_{cs}作为纯分子态的问题：

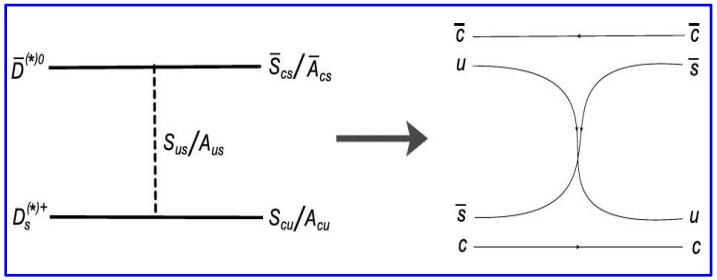
- 该过程OZI压低
- 有效势能可能不足以使系统形成束缚态或共振态



OZI规则：
对于夸克层面的费曼图（省略胶子线），如果不越过强子以及夸克线，可将该图分成两个及两个以上部分，则该图对应的振幅是压低的。

解决方案：

- 引入偶夸克交换势，解决OZI压低问题
- 从而在四夸克物质中引入分子态与正反偶夸克态的混合效应
- 只考虑色三重态的偶夸克 (夸克之间吸引)
- 首次通过有效场论研究多夸克态中的偶夸克成分



偶夸克场的描述：

$$S^a = \begin{pmatrix} 0 & S_{ud} & S_{us} \\ -S_{ud} & 0 & S_{ds} \\ -S_{us} & -S_{ds} & 0 \end{pmatrix}^a \qquad A^a_\mu = \begin{pmatrix} A_{uu} & \frac{1}{\sqrt{2}}A_{ud} & \frac{1}{\sqrt{2}}A_{us} \\ \frac{1}{\sqrt{2}}A_{ud} & A_{dd} & \frac{1}{\sqrt{2}}A_{ds} \\ \frac{1}{\sqrt{2}}A_{us} & \frac{1}{\sqrt{2}}A_{ds} & A_{ss} \end{pmatrix}^a_\mu$$

$$S^a_c = \begin{pmatrix} S_{cu} & S_{cd} & S_{cs} \end{pmatrix}^a \qquad A^a_{c\mu} = \begin{pmatrix} A_{cu} & A_{cd} & A_{cs} \end{pmatrix}^a_\mu$$

这些矩阵是SU(3)对称性下的张量结构

拉氏量(考虑局域隐规范、宇称、电荷共轭)：

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L} = \; & e_1(iPD_\mu S A_c^{\mu\dagger} - iA_c^\mu D_\mu S^\dagger P^\dagger) + e_2(iPA_\mu D^\mu S_c^\dagger - iD^\mu S_c A_\mu^\dagger P^\dagger) \\
& + e_3(\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} P A_{\mu\nu} A_{c\alpha\beta}^\dagger + \epsilon^{\mu\nu\alpha_\beta} A_{c\alpha\beta} A_{\mu\nu}^\dagger P^\dagger) + e_4(iP_\mu^* D^\mu S S_c^\dagger - iS_c D^\mu S^\dagger P_\mu^{*\dagger}) \\
& + e_5(\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} P_\mu^* D_\nu S A_{c\alpha\beta}^\dagger + \epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} A_{c\alpha\beta} D_\nu S^\dagger P_\mu^{*\dagger}) + e_6(\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} P_\mu^* A_{\nu\alpha} D_\beta S_c^\dagger + \epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} D_\beta S_c A_{\nu\alpha}^\dagger P_\mu^{*\dagger}) \\
& + e_7(iP_\mu^* A^{\mu\nu} A_{c\nu}^\dagger - iA_{c\nu} A^{\mu\nu\dagger} P_\mu^*) + e_8(iP_\mu^* A_\nu A_c^{\mu\nu\dagger} - iA_c^{\mu\nu} A_\nu^\dagger P_\mu^{*\dagger}) \\
& + e_9(iP_{\mu\nu}^* A^\mu A_c^{\nu\dagger} - iA_c^\nu A^{\mu\dagger} P_{\mu\nu}^{*\dagger}),
\end{aligned}
$$

$$P_\tau^* = (D^{*0}, D^{*+}, D_s^{*+})_\tau, \quad P = (D^0, D^+, D_s^+).$$

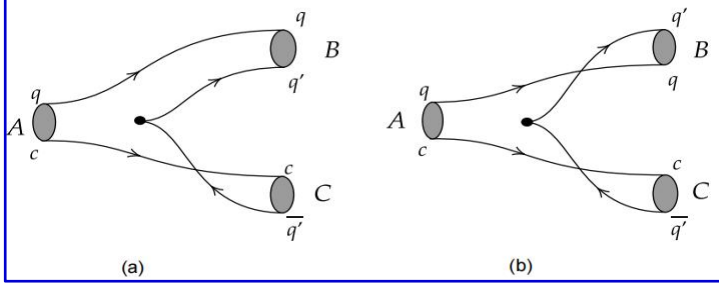
$$D_\mu P = \partial_\mu P + iP\alpha_{\|\mu}^\dagger = \partial_\mu P + iP\alpha_{\|\mu}, \quad D_\mu P_\tau^* = \partial_\mu P_\tau^* + iP_\tau^* \alpha_{\|\mu}^\dagger = \partial_\mu P_\tau^* + iP_\tau^* \alpha_{\|\mu},$$

运用$^3P_0$模型确定耦合常数

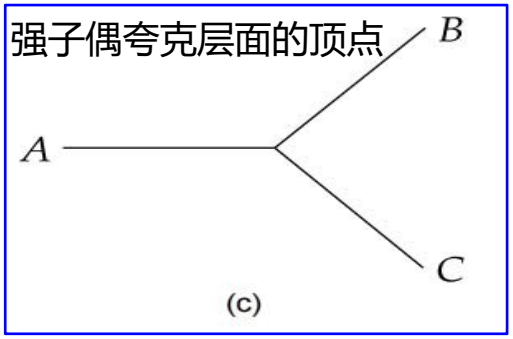
e_1 (GeV^{-1})	e_2 (GeV^{-1})	e_3 (GeV^{-2})	e_4 (GeV^{-1})	e_5 (GeV^{-2})
-6.939	4.161	±1.520	4.039	±1.588
e_6 (GeV^{-2})	e_7 (GeV^{-1})	e_8 (GeV^{-1})	e_9 (GeV^{-1})	
±2.595	-2.840	-16.778	11.098	

masses of diquarks are taken from [55]. Because the relative phase between the amplitudes obtained from the Lagrangian and the quark-pair-creation model can not be completely fixed, the values of (e_7, e_8, e_9) are possibly chosen as (2.840 GeV^{-1}, −11.098 GeV^{-1}, 16.778 GeV^{-1}) and (−16.778 GeV^{-1}, −2.840 GeV^{-1}, −2.840 GeV^{-1}), respectively, where we omit the unphysical ones. Next we use the values in Tab.

夸克层面的“顶点”



强子偶夸克层面的顶点

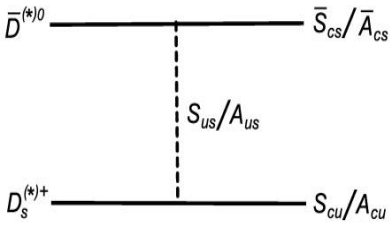


近似不为零的振幅：

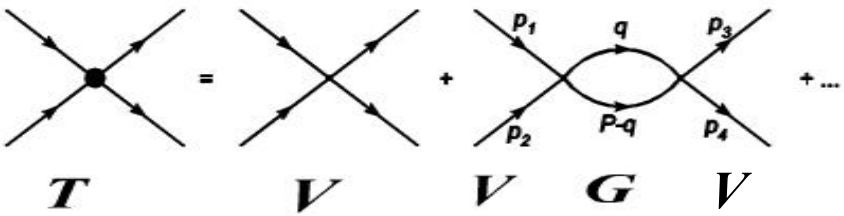
$$V^{\bar{D}^{*0}D_s^+\to\bar{A}^a_{cs}S^a_{cu}} = -\frac{e_2\sqrt{m_{S_{cu}}m_{D_s^+}m_{\bar{A}_{cs}}m_{\bar{D}^{*0}}}}{2m^2_{A_{us}}}\left(e_8\frac{s-m^2_{\bar{A}_{cs}}-m^2_{S_{cu}}}{2}\right.$$
$$\left.+e_9\frac{m^2_{\bar{D}^{*0}}+m^2_{S_{cu}}-u}{2}\right)\vec{\epsilon}_1\cdot\vec{\epsilon}_3^{\,\dagger}, \qquad (25)$$

$$V^{\bar{D}^{0}D_s^{*+}\to\bar{S}^a_{cs}A^a_{cu}} = -\frac{e_2\sqrt{m_{\bar{D}^{0}}m_{\bar{S}_{cs}}m_{A_{cu}}m_{D_s^{*+}}}}{2m^2_{A_{us}}}\left(e_8\frac{s-m^2_{\bar{S}_{cs}}-m^2_{A_{cu}}}{2}\right.$$
$$\left.+e_9\frac{m^2_{D_s^{*+}}+m^2_{\bar{S}_{cs}}-u}{2}\right)\vec{\epsilon}_2\cdot\vec{\epsilon}_4^{\,\dagger}, \qquad (26)$$

$$V^{\bar{D}^{*0}D_s^{*+}\to\bar{A}^a_{cs}A^a_{cu}} = -\frac{1}{2}\sqrt{m_{\bar{D}^{*0}}m_{\bar{A}_{cs}}m_{A_{cu}}m_{D_s^{*+}}}\left(e_8^2\frac{s-m^2_{\bar{A}_{cs}}-m^2_{A_{cu}}}{2}\right.$$
$$+e_8e_9\frac{m^2_{D_s^{*+}}+m^2_{\bar{A}_{cs}}+m^2_{\bar{D}^{*0}}+m^2_{A_{cu}}-2u}{2}$$
$$\left.+e_9^2\frac{s-m^2_{\bar{D}^{*0}}-m^2_{D_s^{*+}}}{2}\right)\frac{1}{m^2_{A_{us}}}\vec{\epsilon}_1\cdot\vec{\epsilon}_3^{\,\dagger}\vec{\epsilon}_2\cdot\vec{\epsilon}_4^{\,\dagger} \quad (27)$$



BS方程(在壳近似)：



$$T = (I - VG)^{-1}V.$$

$$G_{ii} = i\int \frac{d^4q}{(2\pi)^4}\frac{1}{q^2 - m_{i1}^2 + i\epsilon}\frac{1}{(P-q)^2 - m_{i2}^2 + i\epsilon}$$

解析延拓：

$$G_{ii}^{II} = G_{ii}^{I} + i\frac{\nu}{8\pi s}.$$

第一黎曼面的极点：束缚态；
第二黎曼面的极点：共振态、虚态

数值结果：

q_{max}		1360	1385	1410
$\bar{D}^{*0}D_s^+/\bar{A}_{cs}S_{cu}$	RS-II	$4018 \pm i46$	$4013 \pm i42$	$4009 \pm i39$
	RS-II	$4209 \pm i13$	$4208 \pm i13$	$4207 \pm i12$
$\bar{D}^{*0}D_s^{*+}/\bar{A}_{cs}A_{cu}$	RS-II	4105	4106	4107
	RS-I	4088	4091	4093
$\bar{D}^0D_s^{*+}/\bar{S}_{cs}A_{cu}$	RS-II	$4115 \pm i69$	$4112 \pm i66$	$4108 \pm i64$

$Z_{cs}(4000)^+$

自旋为0、1、2

注：表格中数值的单位为MeV

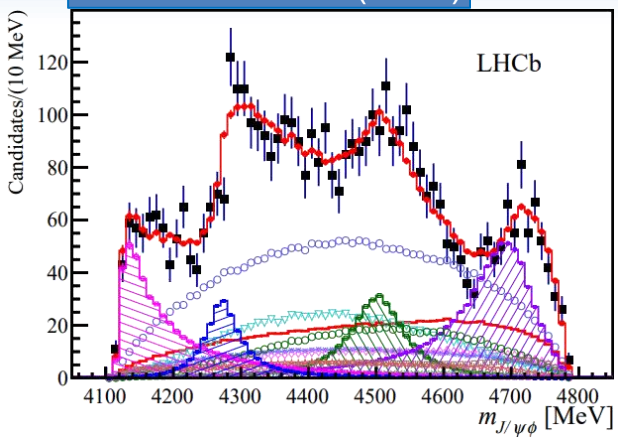
$$
\begin{aligned}
m_{Z_{cs}(4000)^+} &= 4003 \pm 6^{+4}_{-14}\ \text{MeV}, \\
\Gamma_{Z_{cs}(4000)^+} &= 131 \pm 15 \pm 26\ \text{MeV}, \\
m_{Z_{cs}(4220)^+} &= 4216 \pm 24^{+43}_{-30}\ \text{MeV}, \\
\Gamma_{Z_{cs}(4220)^+} &= 233 \pm 52^{+97}_{-73}\ \text{MeV}.
\end{aligned}
$$

- $Z_{cs}(4000)^+$可解释为$\bar{D}^{*0}D_s^+/\bar{A}_{cs}S_{cu}$混合粒子
- $Z_{cs}(4220)^+$质量与$\bar{D}^{*0}D_s^{*+}/\bar{A}_{cs}A_{cu}$混合态符合，但宽度相差很大；由于LHCb实验结果误差较大，我们期待更为精确的实验研究。

X(4500)及Z_c(3900)的研究

X(4500)的实验发现：

PRL118.022003(2017)



夸克组分：$c\bar{c}q\bar{q}$

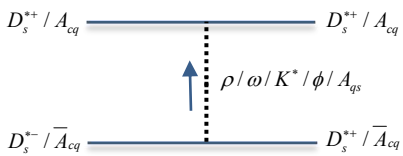
$I^G(J^{pc}) = 0^+0^{++}$

$m = 4474 \pm 3 \pm 3$ MeV

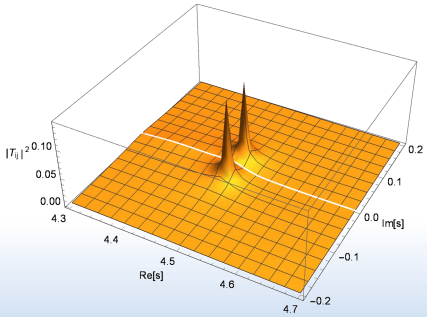
$\Gamma = 77 \pm 6^{+10}_{-8}$ MeV

数值结果：

- ✓ X(4500) 由分子态和正反偶夸克态混合而成
- ✓ X(4500) 与正反偶夸克态成分耦合更强

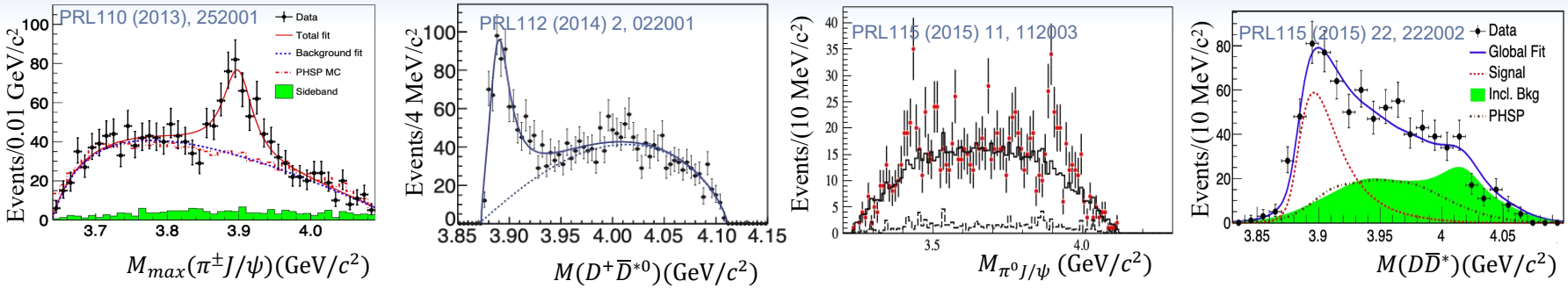


$q_{max}[MeV]$	900	1000	1100
$Pole[MeV]$	4488.0±i 29.6	4485.8±i 24.9	4482.2±i 21.3
$\lvert g_{D_s^{*+}D_s^{*-}}\rvert$	5244	5408	5340
$\lvert g_{A_{cq}\bar{A}_{cq}}\rvert$	3784	3726	3610
$\lvert g_{A_{cs}\bar{A}_{cs}}\rvert$	10513	9795	9122



arXiv:2410.05749

$Z_c(3900)$ 的实验发现：



夸克组分：$c\bar{c}n\bar{n}$

$I^G(J^{PC}) = 1^+(1^{+-})$

$m_{Z_c(3900)} = 3893.1 \pm 2.2 \pm 3.0$ MeV

$\Gamma_{Z_c(3900)} = 44.4 \pm 5.2 \pm 14.0$ MeV

Phys. Rev. D 102 (2020) 1, 012009

数值结果：

q_{max} (MeV)	1400	1450	1500
Pole (MeV)	3901±i26	3894±i22	3888±i17
$\lvert g_{D\bar{D}^*}\rvert$ (MeV)	8606	8488	8412
$\lvert g_{S_{cq}\bar{A}_{cq}}\rvert$ (MeV)	15727	15248	14874

- ✓ $Z_c(3900)$ 可解释为分子态和正反偶夸克态的混合
- ✓ $Z_c(3900)$ 与正反偶夸克态耦合强度更大

arXiv:2412.11144

总结

- 构造包含偶夸克的有效拉氏量，研究了分子态与正反偶夸克态的混合
  - 引入双夸克交换势
  - 解决了将Z_{cs}粒子视为纯分子态时的OZI压低问题
- $Z_{cs}(4000)^+$可被解释为$\bar{D}^{*0}D_s^+/\bar{A}_{cs}S_{cu}$混合态
- $Z_{cs}(4220)^+$质量与$\bar{D}^{*0}D_s^{*+}/\bar{A}_{cs}A_{cu}$混合态符合，但宽度相差很大；由于LHCb实验结果误差较大，我们期待更为精确的实验研究。
- X(4500) 和 X(3900) 均可解释为分子态与正反偶夸克态的混合

谢谢！