



Hidden Charm Pentaquarks and the Nature of P_c States Observed at LHCb

隐粲五夸克与 LHCb 观测到的 P_c 态 的本质到底是什么？

紧致五夸克 (compact), 还是强子分子 (molecule)?

Zhi-Biao Liang · Jun-Jie Liu · Mu-Yang Chen · Xian-Hui Zhong · Qiang Zhao

湖南师范大学 / 中国科学院高能物理研究所

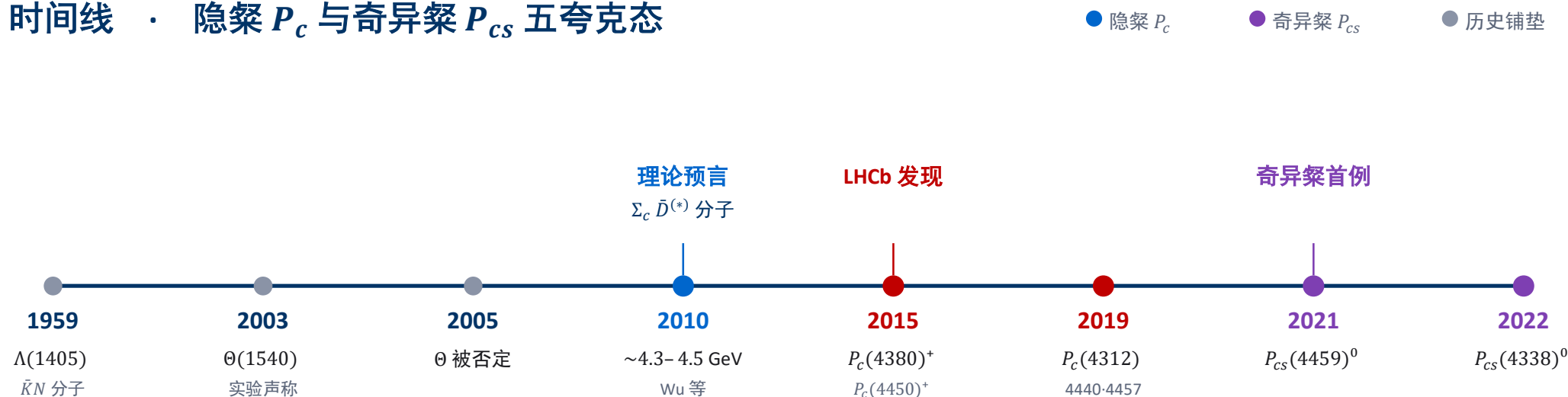
第九届强子谱与强子结构研讨会 · 2026.08.20

五夸克态简史

奇特态的确认历来审慎—— $\Theta(1540)$ 是反面教材。

- 常规强子：介子 ($q\bar{q}$) 与重子 (qqq)；五夸克 $qqqc\bar{c}$ 含隐粲对，属奇特态。
- $\Lambda(1405)$ 早在 1959 年被预言为 $\bar{K}N$ 分子（Dalitz–Tuan）。
- $\Theta(1540)^+$ ：2003 声称 → 2005 被高精度实验否定（多重判据的必要性）。

时间线 · 隐粲 P_c 与奇异粲 P_{cs} 五夸克态

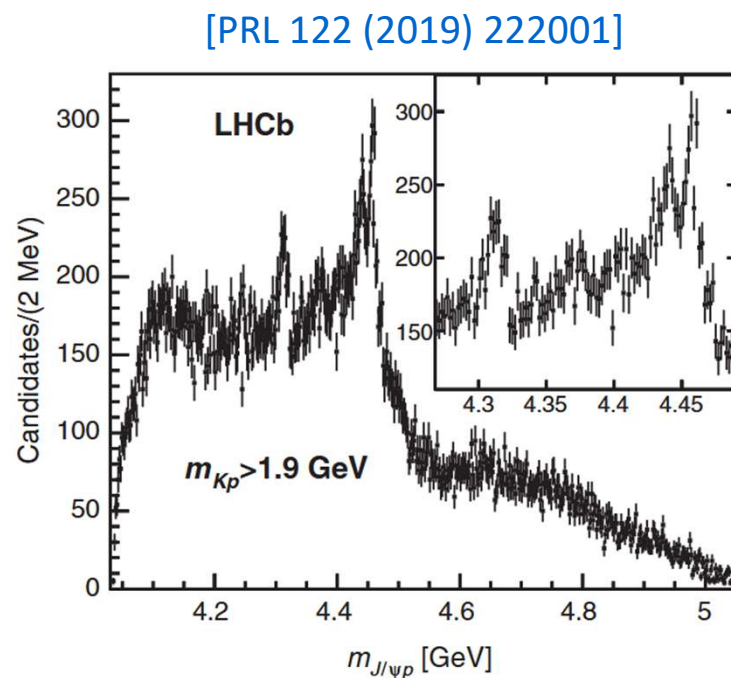


从 2010 理论预言到 2022 奇异粲 P_{cs} 发现——隐粲与奇异粲五夸克态均已获实验确认。

隐粲五夸克：从预言到发现

理论 2010 预言在前，LHCb 2015/2019 发现在后。

- 2010 邹冰松老师组预言 $\Sigma_c \bar{D}$ 、 $\Sigma_c \bar{D}^*$ 分子型窄共振， $\sim 4.3\text{--}4.5\text{ GeV}$ 。[PRL 105 (2010) 232001]
- LHCb 2015: $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K^-$ 的 $p\text{--}J/\psi$ 谱发现 $P_c(4380)^+$ 、 $P_c(4450)^+$ 。[PRL 115 (2015) 072001]
- 2019 Run 1+2: $P_c(4450)$ 拆为 $P_c(4440)$ 、 $P_c(4457)$ ，新增 $P_c(4312)$ 。[PRL 122 (2019) 222001]
- 观测质量落在预言区间；但 J^P 未定 $\rightarrow$ 需理论指认。



预言质量区间与 LHCb 观测一致——隐粲 P_c 的存在已获高统计确认。

核心问题： P_c 的三种可能

LHCb 看到的 P_c 是什么？ 三种可能

1 紧致五夸克

compact $qqqc\bar{c}$

[PLB 749 (2015) 289]

[PLB 749 (2015) 454]

[PRL 115 (2015) 132002]

[PRL 115 (2015) 172001]

[EPJ C 74 (2014) 3198]

2 强子分子态

molecule ($\Sigma_c \bar{D}^{(*)}$)

[PRL 105 (2010) 232001]

[CPC 36 (2012) 6]

[PLB 753 (2016) 547]

[PRD 100 (2019) 014021]

[PRD 101 (2020) 091502]

3 阈值效应

threshold / kinematical
三角奇异性 等虚假结构

[PRD 92 (2015) 071502]

[PRD 94 (2016) 074039]

[PRD 103 (2021) 111503]

[PLB 793 (2019) 144]

统一势夸克模型：OGE + OBE

总哈密顿量

$$H = \sum_i \sqrt{\vec{p}_i^2 + m_i^2} + \sum_{i < j} V_{ij}(r_{ij}), \quad V_{ij} = V_{ij}^{\text{OGE}} + V_{ij}^{\text{OBE}}$$

本工作策略：在同一套统一势夸克模型（OGE + OBE）下，同时计算紧致态与分子态的质量谱与 fall-apart 衰变，并以衰变给出可观测道预言供交叉检验。

V^{OGE} 单胶子交换

色禁闭主导，提供紧致态骨架

- 线性囚禁 $b \cdot r + C$
- 色 Coulomb $-(4/3)\alpha/r$
- 色磁（自旋-自旋）项

V^{OBE} 单玻色子交换

夸克间介子交换，两态均含

- 赝标介子： π, η, η'
- 标量： σ （长程吸引）
- 矢量： ρ, ω

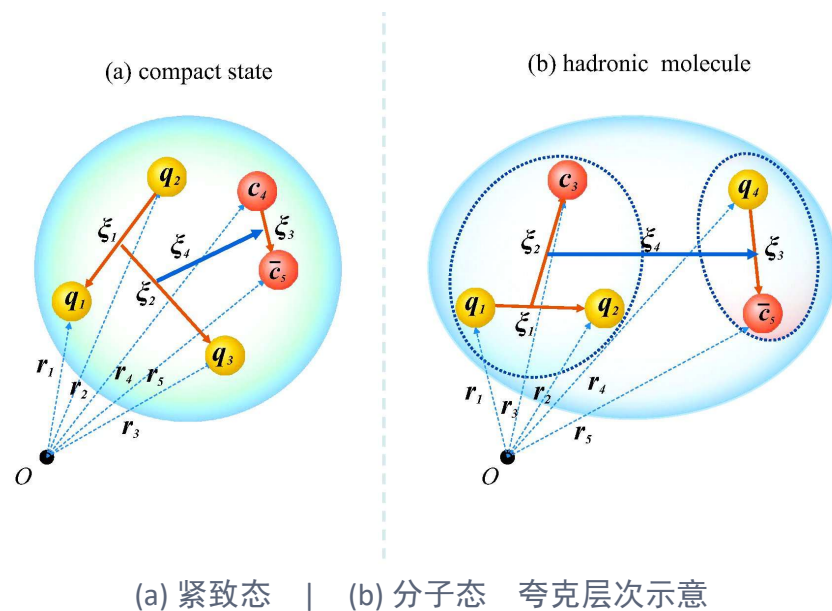
为什么要加 OBE？

- π 介子交换势可解释 $N(1440)$ 与 $N(1535)$ 的质量反转 [PRD 110 (2024) 116034]
- 矢量介子交换 ($\omega + \rho$) 对短程 u/d 夸克相互作用至关重要 [PoS HADRON2025 (2026) 093]

参数：由常规重子谱拟合确定

紧致态 vs 分子态：夸克层次的区别

两者色结构与对称性要求不同。



(a) 紧致态 compact

- 整体 5 夸克，须满足置换对称性
- 色组态 $1c \otimes 1c$ 与 $8c \otimes 8c$ 共存
- 夸克间 OGE + OBE 均作用

(b) 分子态 molecule

- 两个强子各自色单态，不考虑强子间无置换约束
- 仅色单态 $1c \otimes 1c$
- 强子间相互作用仅来自 OBE

物理后果

色结构与对称性要求不同 → 质量谱与衰变性质不同 → 这是判别 P_c 本质的物理基础。

紧致组态：颜色三态与自旋,味道耦合

1S 空间全对称 $\Rightarrow$ $flavor \otimes spin \otimes color$ 全反

$I J^P$	Configuration	Wave function	$(qqq)_c \otimes (c\bar{c})_c$
$\frac{1}{2} \frac{5}{2}^-$	$1S_{1/2(5/2^-)}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}(F_2C_3 - F_3C_2)S_1$	$\mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$
$\frac{1}{2} \frac{3}{2}^-$	$1S_{1/2(3/2^-)_1}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}(F_2C_3 - F_3C_2)S_2$	$\mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$
	$1S_{1/2(3/2^-)_2}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}(F_2C_3 - F_3C_2)S_3$	$\mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$
	$1S_{1/2(3/2^-)_3}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}(F_2S_5 + F_3S_4)C_1$	$\mathbf{1}_c \otimes \mathbf{1}_c$
	$1S_{1/2(3/2^-)_4}$	$\frac{1}{2}F_2(-C_2S_4 - C_3S_5)$ $-\frac{1}{2}F_3(C_2S_5 - C_3S_4)$	$\mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$
$\frac{1}{2} \frac{1}{2}^-$	$1S_{1/2(1/2^-)_1}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}(F_2C_3 - F_3C_2)S_6$	$\mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$
	$1S_{1/2(1/2^-)_2}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}(F_2S_8 + F_3S_7)C_1$	$\mathbf{1}_c \otimes \mathbf{1}_c$
	$1S_{1/2(1/2^-)_3}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}(F_2S_9 + F_3S_{10})C_1$	$\mathbf{1}_c \otimes \mathbf{1}_c$
	$1S_{1/2(1/2^-)_4}$	$\frac{1}{2}F_2(-C_2S_7 - C_3S_8)$ $-\frac{1}{2}F_3(C_2S_8 - C_3S_7)$	$\mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$
	$1S_{1/2(1/2^-)_5}$	$\frac{1}{2}F_2(-C_2S_{10} - C_3S_9)$ $-\frac{1}{2}F_3(C_2S_9 - C_3S_{10})$	$\mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$
$\frac{3}{2} \frac{5}{2}^-$	$1S_{3/2(5/2^-)}$	$F_1C_1S_1$	$\mathbf{1}_c \otimes \mathbf{1}_c$
$\frac{3}{2} \frac{3}{2}^-$	$1S_{3/2(3/2^-)_1}$	$F_1C_1S_2$	$\mathbf{1}_c \otimes \mathbf{1}_c$
	$1S_{3/2(3/2^-)_2}$	$F_1C_1S_3$	$\mathbf{1}_c \otimes \mathbf{1}_c$
	$1S_{3/2(3/2^-)_3}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}F_1(C_2S_4 - C_3S_5)$	$\mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$
$\frac{3}{2} \frac{1}{2}^-$	$1S_{3/2(1/2^-)_1}$	$F_1C_1S_6$	$\mathbf{1}_c \otimes \mathbf{1}_c$
	$1S_{3/2(1/2^-)_2}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}F_1(C_2S_7 - C_3S_8)$	$\mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$
	$1S_{3/2(1/2^-)_3}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}F_1(C_2S_{10} - C_3S_9)$	$\mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$

共 17 个 1S 组态 = 10 个 $\mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$ + 7 个 $\mathbf{1}_c \otimes \mathbf{1}_c$

颜色三态（重子-介子色结构）

- $C_1: (qqq)_1 \cdot (c\bar{c})_1 \rightarrow \mathbf{1}_c \otimes \mathbf{1}_c$
- $C_2, C_3: (qqq)_8 \cdot (c\bar{c})_8 \rightarrow \mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$
- 空间全对称 $\Rightarrow$ 总波函数反对称化
- $\mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$ (10 个)：短程相互作用强 $\rightarrow$ 紧致束缚
- $\mathbf{1}_c \otimes \mathbf{1}_c$ (7 个)：不束缚，且不与 $\mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$ 混合
- $\Rightarrow$ 紧致束缚态均由 $\mathbf{8}_c \otimes \mathbf{8}_c$ 组态贡献

分子态组态：色单态重子-介子道

Isospin	Channel	Configuration
1/2	$\Lambda_c \bar{D}$	$[\Lambda_c \bar{D}]_{1/2-}^{1/2}$
1/2	$\Lambda_c \bar{D}^*$	$[\Lambda_c \bar{D}^*]_{1/2-,3/2-}^{1/2}$
1/2	$\Sigma_c \bar{D}$	$[\Sigma_c \bar{D}]_{1/2-}^{1/2}$
1/2	$\Sigma_c^* \bar{D}$	$[\Sigma_c^* \bar{D}]_{3/2-}^{1/2}$
1/2	$\Sigma_c \bar{D}^*$	$[\Sigma_c \bar{D}^*]_{1/2-,3/2-}^{1/2}$
1/2	$\Sigma_c^* \bar{D}^*$	$[\Sigma_c^* \bar{D}^*]_{1/2-,3/2-,5/2-}^{1/2}$
3/2	$\Sigma_c \bar{D}$	$[\Sigma_c \bar{D}]_{1/2-}^{3/2}$
3/2	$\Sigma_c^* \bar{D}$	$[\Sigma_c^* \bar{D}]_{3/2-}^{3/2}$
3/2	$\Sigma_c \bar{D}^*$	$[\Sigma_c \bar{D}^*]_{1/2-,3/2-}^{3/2}$
3/2	$\Sigma_c^* \bar{D}^*$	$[\Sigma_c^* \bar{D}^*]_{1/2-,3/2-,5/2-}^{3/2}$

两个色单态强子，仅 $1c \otimes 1c$ ，由 *OBE* 势提供束缚

构建原则

- 以两个色单态强子为基本自由度（不做跨强子的 Pauli 反对称化）
- 味空间：同位旋耦合 $I = I_1 \oplus I_2$
- 自旋空间：角动量耦合 $J = j_1 \oplus j_2$

⇒ 由 B_1 、 B_2 的 (I, j) 组合出各 channel 的 I 、 J^P

衰变模型：fall-apart 夸克交换

五夸克经内部夸克重排为 重子 + 介子

夸克交换模型

- OGE 势是驱动力：短程 OGE 诱导夸克重排为色单态强子对
- 初态取势模型真实波函数；末态用 SHO 近似（RMS 拟合）+ PDG 质量

可观测末态道 （隐粲 $P_c \rightarrow$ 重子 + 介子）

$$\eta_c p \quad \cdot J/\psi p \quad \cdot \quad \Lambda_c \bar{D}^{(*)} \quad \cdot \quad \Sigma_c^{(*)} \bar{D}^{(*)} \quad \cdot \quad \eta_c \Delta, J/\psi \Delta$$

衰变宽度公式

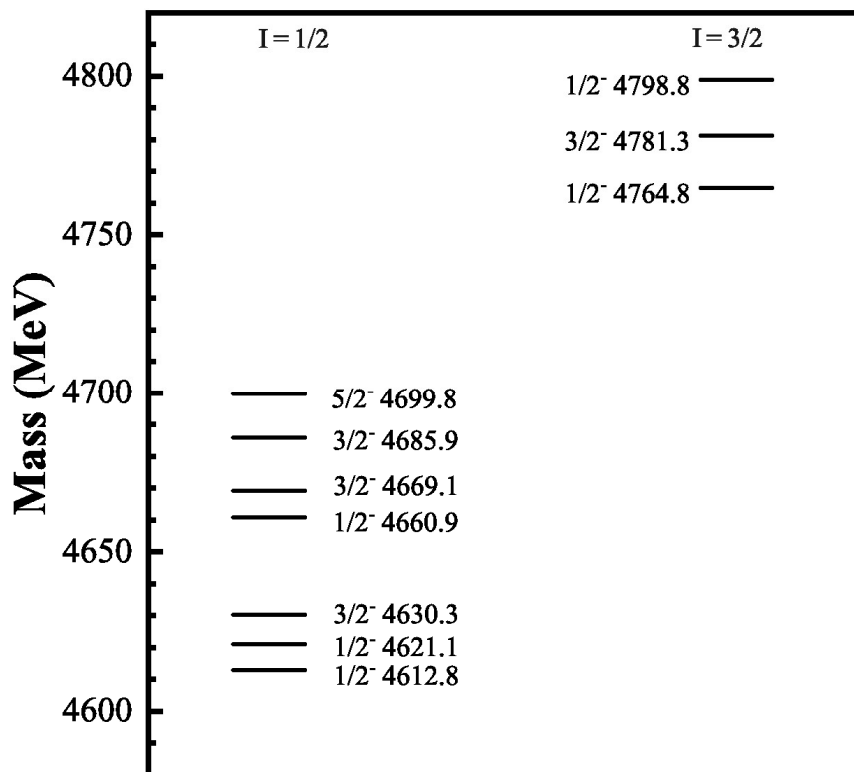
$$M(A \rightarrow BC) = \langle BC | \sum_{i \in B, j \in C} V_{ij}^{OGE} | A \rangle$$

$$\Gamma = [1/(2J_A + 1)] \cdot |q|/(8\pi M_A^2) \cdot |M(A \rightarrow BC)|^2$$

→ 真实波函数 + 衰变分支比，为分子指认提供交叉检验。

紧致态无法解释 P_c

紧致态质量系统性偏高，与实验 P_c 无重叠。



紧致态无法解释

紧致态质量 $\sim 4.6 - 4.8$ GeV，比观测 P_c ($\sim 4.31 - 4.46$) 高

200 – 300 MeV

但 4.6– 4.7 GeV 或存在可观测的紧致窄态 ($J/\psi p$ 道分支 $\sim 10 - 20\%$)

→ 紧致图像无法解释已知 P_c ，但预言了新的窄态。

紧致态 Hamiltonian 各项分解

$I(J^P)$	State	$\langle T \rangle$	$\langle V^{\text{Conf}} \rangle$	$\langle V^{\text{Coul}} \rangle$	$\langle V^{SS} \rangle$	$\langle V^\pi \rangle$	$\langle V^\sigma \rangle$	$\langle V^\eta \rangle$	$\langle V^{\eta'} \rangle$	$\langle V^\rho \rangle$	$\langle V^\omega \rangle$	$R_{12/13/23}$	$R_{14/24/34}$	$R_{15/25/35}$	R_{45}
$\frac{1}{2}(\frac{5}{2}^-)$	$P_c^N(4700)\frac{5}{2}^-$	4898	363	-559	27.6	18.3	-44.7	-2.9	-0.7	-24.0	23.6	0.787	0.694	0.694	0.663
	$P_c^N(4630)\frac{3}{2}^-$	4969	321	-585	-14.6	-14.9	-47.9	2.5	0.6	-37.0	36.1	0.749	0.670	0.665	0.644
$\frac{1}{2}(\frac{3}{2}^-)$	$P_c^N(4669)\frac{3}{2}^-$	4929	344	-570	-1.6	17.2	-45.8	-2.8	-0.7	-25.1	24.7	0.773	0.678	0.684	0.651
	$P_c^N(4686)\frac{3}{2}^-$	4912	355	-564	16.6	15.1	-45.2	-2.4	-0.6	-25.4	24.9	0.780	0.689	0.689	0.660
	$P_c^N(4613)\frac{1}{2}^-$	4987	311	-591	-33.8	-13.4	-48.4	2.2	0.6	-37.1	36.2	0.742	0.661	0.660	0.636
$\frac{1}{2}(\frac{1}{2}^-)$	$P_c^N(4621)\frac{1}{2}^-$	4978	316	-588	-24.1	-14.7	-48.2	2.5	0.6	-37.2	36.3	0.745	0.666	0.662	0.641
	$P_c^N(4661)\frac{1}{2}^-$	4938	339	-573	-0.9	6.3	-46.3	-1.0	-0.2	-28.9	28.3	0.767	0.676	0.681	0.651
$\frac{3}{2}(\frac{3}{2}^-)$	$P_c^\Delta(4781)\frac{3}{2}^-$	4809	425	-524	36.9	14.8	-39.1	2.2	0.4	28.0	27.3	0.855	0.731	0.728	0.676
	$P_c^\Delta(4765)\frac{1}{2}^-$	4824	414	-529	20.6	15.1	-39.7	2.2	0.5	28.7	27.9	0.847	0.721	0.724	0.670
$\frac{3}{2}(\frac{1}{2}^-)$	$P_c^\Delta(4799)\frac{1}{2}^-$	4793	437	-517	53.6	14.5	-38.5	2.1	0.4	27.4	26.7	0.864	0.736	0.739	0.686

$\langle T \rangle$ 动能 主导项

$\langle V_{\text{conf}} \rangle$ 线性禁闭 主导项

$\langle V_{\text{Coul}} \rangle$ 色 Coulomb 主导项

$\langle T \rangle + \langle V_{\text{conf}} \rangle + \langle V_{\text{Coul}} \rangle \approx 4705 \text{ MeV}$

- 劈裂由自旋相关微扰项决定：SS (OGE) + OBE (π, ω, ρ)
- $I = 1/2$: ω 与 ρ 显著相消，矢量项净贡献 ≈ 0
- $I = 3/2$: $\langle V_\rho + V_\omega \rangle \approx +50 \text{ MeV}$ 强排斥 $\rightarrow$ 抬高 $\sim 100 \text{ MeV}$
- $V_\sigma \approx (-50, -40) \text{ MeV}$ 对所有态普适吸引
- η, η' 交换贡献可忽略

紧致态的衰变与可观测预言

State	$p\eta_c$	pJ/ψ	$\Delta\eta_c$	$\Delta J/\psi$	$\Lambda_c\bar{D}$	$\Lambda_c\bar{D}^*$	$\Sigma_c\bar{D}$	$\Sigma_c\bar{D}^*$	$\Sigma_c^*\bar{D}$	$\Sigma_c^*\bar{D}^*$	Γ
$P_c^N(4700)\frac{5}{2}^-$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.48	4.48
$P_c^N(4630)\frac{3}{2}^-$	—	0.33	—	—	—	<0.01	—	0.95	0.83	0.31	2.43
$P_c^N(4669)\frac{3}{2}^-$	—	0.10	—	—	—	1.01	—	4.26	0.24	<0.01	5.63
$P_c^N(4686)\frac{3}{2}^-$	—	0.12	—	—	—	1.27	—	1.00	1.74	0.99	5.12
$P_c^N(4613)\frac{1}{2}^-$	1.73	0.30	—	—	0.10	0.06	0.37	0.85	—	2.31	5.72
$P_c^N(4621)\frac{1}{2}^-$	0.05	0.71	—	—	0.32	0.22	0.02	2.32	—	6.35	9.99
$P_c^N(4661)\frac{1}{2}^-$	0.47	0.39	—	—	<0.01	2.31	0.68	0.36	—	0.41	4.62
$P_c^\Delta(4781)\frac{3}{2}^-$	—	—	0.87	<0.01	—	—	—	0.32	1.18	1.44	3.81
$P_c^\Delta(4765)\frac{1}{2}^-$	—	—	—	1.24	—	—	1.14	1.98	—	0.05	4.41
$P_c^\Delta(4799)\frac{1}{2}^-$	—	—	—	1.17	—	—	0.12	0.93	—	4.74	6.96

- 紧致态 远高于 $J/\psi p$ 阈值 $\rightarrow$ 经内部夸克重排为重子+介子
- fall-apart 宽度仅 **几 MeV**
- $I = 1/2$ 态 $J/\psi p$ 道分支占 **10–20%**
- 候选: $P_c^N(4630, 4669, 4686) 3/2^-$; $(4613, 4621, 4661) 1/2^-$

窄态

fall-apart 宽度~ **几 MeV**

可观测预言

紧致 $I = 1/2$ 态在 **4.6–4.7 GeV**
 $J/\psi p$ 道值得实验搜寻

分子态计算策略

分子态质量 $M_{\text{mole}} = M_{H_1}^{\text{exp}} + M_{H_2}^{\text{exp}} - B.E., \quad B.E. = -\langle V^{\text{OBE}} \rangle$

用实验强子质量定阈值、只让 OBE 决定束缚能——最大程度减少模型依赖。

- 束缚能 $B.E. = -\langle V^{\text{OBE}} \rangle$ （仅簇间 OBE 贡献）
- 松束缚结构：RMS 半径达数 fm（弱束缚）
- 不同分子组态间混合可忽略 → 指认清晰

计算 5 个分子系统： $\Sigma_c \bar{D}$ 、 $\Sigma_c \bar{D}^*$ 、 $\Sigma_c^* \bar{D}$ 、 $\Sigma_c^* \bar{D}^*$ 、 $\Lambda_c \bar{D}$

$$\Sigma_c \bar{D} \rightarrow P_c(4312)$$

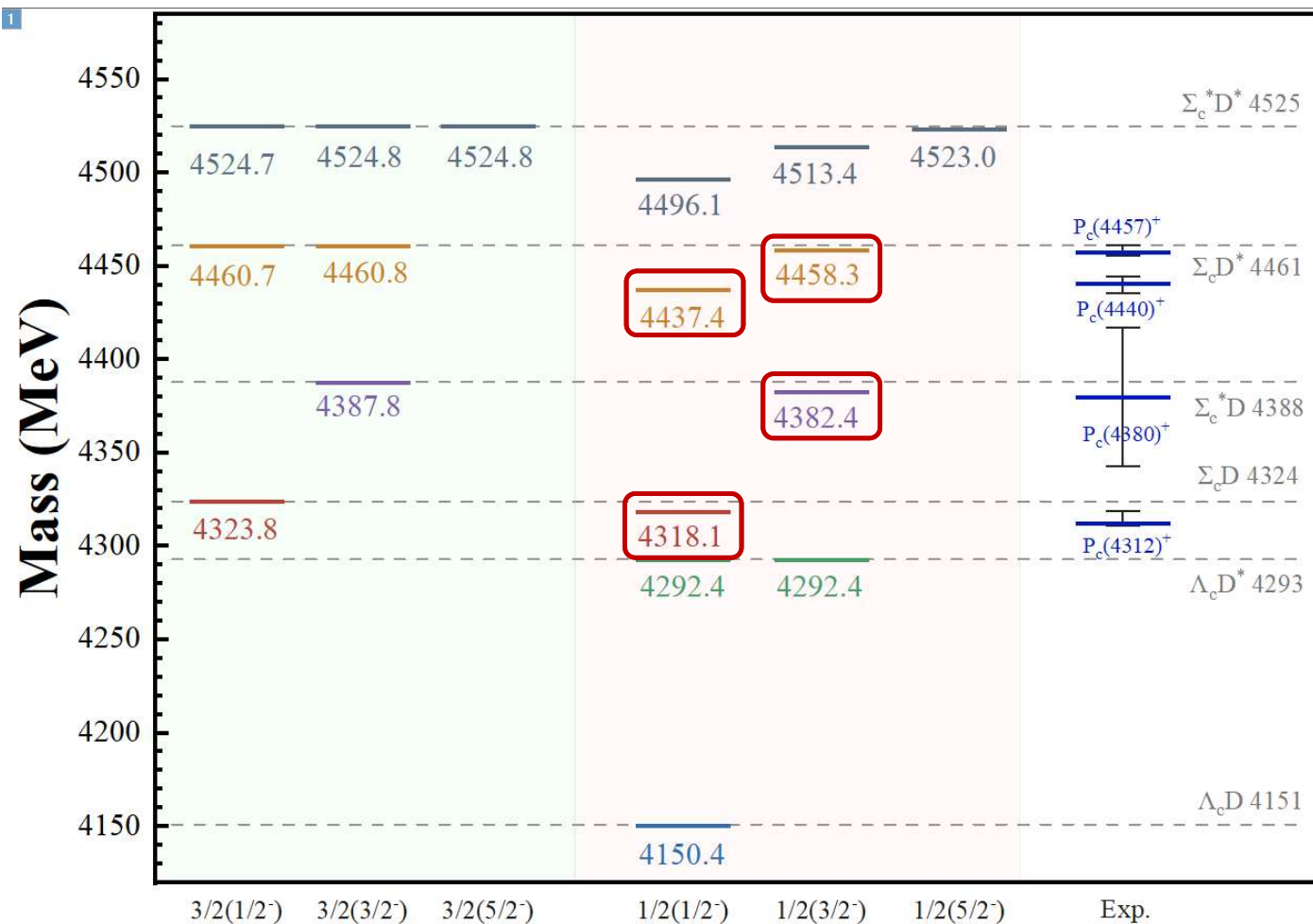
$$\Sigma_c \bar{D}^* \rightarrow P_c(4440), P_c(4457)$$

$$\Sigma_c^* \bar{D} \rightarrow P_c(4380)$$

束缚越深 → 含 π 交换、RMS 越小；浅束缚仅 $\sigma + \rho$ 。

分子态质量谱

$\Sigma_c^{(*)} \bar{D}^{(*)}$ 分子束缚态——与 LHCb P_c 自然吻合。



关键结论：

分子图像同时再现四个 P_c 态的质量

分子态质量谱

Channel	$I(J^P)$	Mass	Threshold	B.E.	$-\langle V^\pi \rangle$	$-\langle V^\sigma \rangle$	$-\langle V^\eta \rangle$	$-\langle V^{\eta'} \rangle$	$-\langle V^\rho \rangle$	$-\langle V^\omega \rangle$	$\sqrt{\langle r^2 \rangle}$ (fm)
$I = 1/2 \Lambda_c \bar{D}^{(*)}$ sector											
$\Lambda_c \bar{D}$	$\frac{1}{2}(\frac{1}{2}^-)$	4150.44	4151.00	0.57	—	0.78	—	—	—	-0.21	5.02
$\Lambda_c \bar{D}^*$	$\frac{1}{2}(\frac{1}{2}^-)$	4292.44	4293.00	0.56	—	0.77	—	—	—	-0.21	5.03
	$\frac{1}{2}(\frac{3}{2}^-)$	4292.44		0.56	—	0.77	—	—	—	-0.21	5.03
$I = 1/2 \Sigma_c^{(*)} \bar{D}^{(*)}$ sector											
$\Sigma_c \bar{D}$	$\frac{1}{2}(\frac{1}{2}^-)$	4318.10	4324.00	5.90	—	4.41	—	—	2.90	-1.41	3.79
$\Sigma_c^* \bar{D}$	$\frac{1}{2}(\frac{3}{2}^-)$	4382.35	4388.00	5.65	—	4.23	—	—	2.77	-1.35	3.83
$\Sigma_c \bar{D}^*$	$\frac{1}{2}(\frac{1}{2}^-)$	4437.42	4461.00	23.58	6.15	12.94	-0.28	-0.01	9.27	-4.49	2.02
	$\frac{1}{2}(\frac{3}{2}^-)$	4458.31		2.69	-0.35	2.27	0.01	-0.01	1.49	-0.73	4.39
$\Sigma_c^* \bar{D}^*$	$\frac{1}{2}(\frac{1}{2}^-)$	4496.09	4525.00	28.91	9.02	14.74	-0.43	-0.02	10.84	-5.24	1.76
	$\frac{1}{2}(\frac{3}{2}^-)$	4513.40		11.60	1.58	7.50	-0.06	0.01	5.01	-2.43	3.02
	$\frac{1}{2}(\frac{5}{2}^-)$	4523.01		1.99	-0.36	1.75	0.00	-0.01	1.16	-0.57	4.55
$I = 3/2 \Sigma_c^{(*)} \bar{D}^{(*)}$ sector											
$\Sigma_c \bar{D}$	$\frac{3}{2}(\frac{1}{2}^-)$	4323.77	4324.00	0.23	—	0.46	—	—	-0.12	-0.11	5.18
$\Sigma_c^* \bar{D}$	$\frac{3}{2}(\frac{3}{2}^-)$	4387.77	4388.00	0.23	—	0.46	—	—	-0.12	-0.11	5.18
$\Sigma_c \bar{D}^*$	$\frac{3}{2}(\frac{1}{2}^-)$	4460.71	4461.00	0.29	0.00	0.44	0.01	0.00	-0.08	-0.08	5.15
	$\frac{3}{2}(\frac{3}{2}^-)$	4460.79		0.21	0.01	0.48	0.00	0.00	-0.14	-0.14	5.19
$\Sigma_c^* \bar{D}^*$	$\frac{3}{2}(\frac{1}{2}^-)$	4524.69	4525.00	0.31	0.00	0.44	0.01	0.00	-0.07	-0.07	5.15
	$\frac{3}{2}(\frac{3}{2}^-)$	4524.75		0.25	0.00	0.45	0.00	0.00	-0.10	-0.10	5.17
	$\frac{3}{2}(\frac{5}{2}^-)$	4524.79		0.21	0.02	0.49	0.00	0.00	-0.15	-0.15	5.19

$\Sigma_c \bar{D}$ 系统 $\rightarrow P_c(4312)^+$

$[\Sigma_c \bar{D}]_{\{1/2^-\}}^{\{1/2\}}(4318)$: $\sigma + \rho$ 吸引 $\rightarrow P_c(4312)$ 。

$[\Sigma_c \bar{D}]_{\{1/2^-\}}^{\{1/2\}}(4318)$

质量 ≈ 4318 MeV · 束缚力 $\sigma + \rho$ · $RMS \approx 3.8$ fm · 阈值 ≈ 4324 MeV

$$B.E. \approx 6 \text{ MeV}$$

主衰变道: $\eta_c p, \Lambda_c \bar{D}^*$

$\rightarrow$ 指认为 $P_c(4312)^+$

分支比预言

$$Br[P_c(4312)^+ \rightarrow J/\psi p]$$

$$\approx 4.1 \times 10^{-3}$$

$$(+11.2 / -1.6) \times 10^{-3}$$

与抽取范围一致: $0.05\% < Br < 1.2\%$ [PRD 100 (2019) 054033]

$\rightarrow$ 分支比支持分子态指认

$\Sigma_c \bar{D}^*$ 系统 $\rightarrow P_c(4440, 4457)^+$

深束缚 ($1/2^-, 24 \text{ MeV}$) $\rightarrow P_c(4440)$; 浅束缚 ($3/2^-, 2.7 \text{ MeV}$) $\rightarrow P_c(4457)$ 。

深束缚 ($1/2^-$) $\rightarrow P_c(4440)$

质量 $\approx 4437 \text{ MeV}$ · 束缚力 $\pi + \sigma + \rho$ · $RMS \approx 2.0 \text{ fm}$

$$B.E. \approx 24 \text{ MeV}$$

$\Gamma(J/\psi p) : \Gamma(\Lambda_c \bar{D}^*) \approx 3 : 1$ · $Br[P_c(4440)^+ \rightarrow J/\psi p] \approx 2.9 \%$

与抽取范围一致： $3.55_{-1.24}^{+1.43} \times 10^{-3} < Br < 2 \%$ [PRD 100 (2019) 054033]

浅束缚 ($3/2^-$) $\rightarrow P_c(4457)$

质量 $\approx 4458 \text{ MeV}$ · 束缚力 $\sigma + \rho$ · $RMS \approx 4.4 \text{ fm}$

$$B.E. \approx 2.7 \text{ MeV}$$

$J/\psi p$ 分宽 $\sim 20 \text{ KeV}$ · $Br[P_c(4457)^+ \rightarrow J/\psi p] \approx 2.9 \times 10^{-3}$

与抽取范围一致： $1.70_{-0.71}^{+0.77} \times 10^{-3} < Br < 2 \%$ [PRD 100 (2019) 054033]

$\Sigma_c^* \bar{D}$ 系统 $\rightarrow P_c(4380)^+$

$[\Sigma_c^* \bar{D}]_{\{3/2^-\}}^{\{1/2\}}(4382)$: $B.E. \sim 5.6 \text{ MeV} \rightarrow P_c(4380)$, 应为窄态。

$[\Sigma_c^* \bar{D}]_{\{3/2^-\}}^{\{1/2\}}(4382)$

质量 $\approx 4382 \text{ MeV}$ · 束缚力 $\sigma + \rho$ · $RMS \approx 3.8 \text{ fm}$ · 阈值 $\approx 4388 \text{ MeV}$

$$B.E. \approx 5.6 \text{ MeV}$$

主衰变道: $J/\psi p, \Lambda_c \bar{D}^* \rightarrow$ 指认为 $P_c(4380)^+$

$P_c(4380)$: 宽态 or 窄态?

- LHCb 2015 (Run 1) : 报道为宽结构 $P_c(4380)$
- Du 等 2020 分析 Run 1+2 数据: 应为窄态 $\Gamma \approx 26 \text{ MeV}$ [PRL 124 (2020) 072001]

$\rightarrow$ 窄态 $P_c(4380)$ 支持其 $\Sigma_c^* \bar{D}$ 分子指认; 待 Run 3 最终确立。

四个 P_c 的分子态指认全景

分子图像成功且自洽地解释了3个 P_c —— 统一框架判别。

P_c 态	分子组态	J^P	$B.E.$	RMS (fm)	束缚能主要来源
✓ $P_c(4312)^+$	$[\Sigma_c \bar{D}]$	$1/2^-$	6 MeV	3.8	$\sigma + \rho$
✓ $P_c(4440)^+$	$[\Sigma_c \bar{D}^*]$	$1/2^-$	24 MeV	2.0	$\pi + \sigma + \rho$
✓ $P_c(4457)^+$	$[\Sigma_c \bar{D}^*]$	$3/2^-$	2.7 MeV	4.4	$\sigma + \rho$
? $P_c(4380)^+$	$[\Sigma_c^* \bar{D}]$	$3/2^-$	5.65 MeV	3.8	$\sigma + \rho$

关键

深束缚态 π 也提供可观束缚； $\sigma + \rho$ 是普遍的分子束缚来源。

浅束缚态与可检验预言

$\Lambda_c \bar{D}^{(*)}$ 与 $I = 3/2$ 的 $\Sigma_c^{(*)} \bar{D}^{(*)}$ 仅 σ 极浅束缚；分支比预测待 Run 3 检验。

极浅束缚态（依赖 σ 交换）

- $\Lambda_c \bar{D}^{(*)}$ 与 $I = 3/2$ 的 $\Sigma_c^{(*)} \bar{D}^{(*)}$ 系统： $B.E. \sim 200-600$ keV（极浅）， $RMS \sim 5$ fm
- 存在性高度依赖 σ 交换强度

分支比预测

P_c 态 · 衰变道	分支比
$P_c(4312) \rightarrow J/\psi p$	4.1×10^{-3}
$P_c(4440) \rightarrow J/\psi p$	2.9 %
$P_c(4457) \rightarrow J\psi p, \Lambda_c \bar{D}^*$	$2.9 \times 10^{-3}, \sim 1 \%$
$P_c(4312) \rightarrow \eta_c p, \Lambda_c \bar{D}^*$	主导道

供 LHCb Run 3 / GlueX 检验

结论 · Summary

01 紧致态质量过高 → 无法解释

紧致 $\sim 4.6\text{--}4.8\text{ GeV}$, 比 P_c 高 200–300 MeV → 紧致五夸克图像失败

02 分子解释除 $P_c(4380)$ 外的 P_c 态

$P_c(4312 / 4440 / 4457) \leftrightarrow \Sigma_c \bar{D}^{(*)}$ 分子态, 一一对应

03 $\sigma + \rho$ 是分子束缚的关键

长程吸引 σ + 矢量 ρ 提供束缚; 深束缚态 π 交换也提供可观束缚

04 浅束缚 + 分支比预言

极浅 σ 束缚态与各道分支比, 待 LHCb Run 3 检验
