

非淬火图像下粲重子和粲奇异介子的 谱学和电磁衰变研究

报告人：张紫乐

导师：刘占伟 教授

兰州大学

2024年10月18日—2024年10月22日 湖南·长沙

第九届手征有效场论研讨会

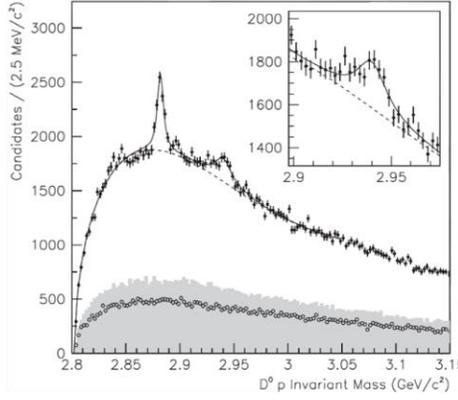
报告提纲

- 一. 研究背景
- 二. $\Lambda_c(2910)$ 和 $\Lambda_c(2940)$ 的谱学研究
- 三. $D_{s0}^*(2317)$ 和 $D'_{s1}(2460)$ 的谱学和电磁衰变研究
- 四. 总结

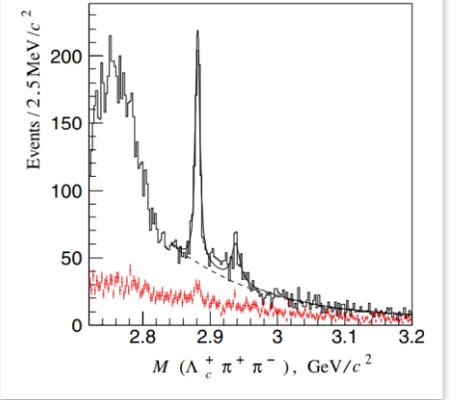
一、 $\Lambda_c(2940)$ 和 $\Lambda_c(2910)$ 的发现

$\Lambda_c(2940)$

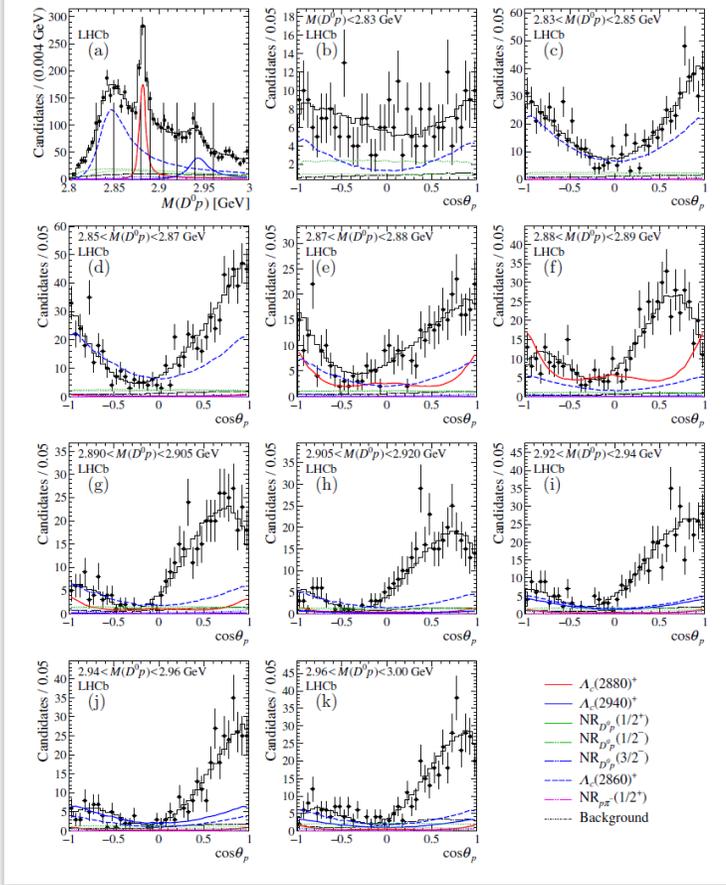
BABAR, Phys. Rev. Lett. **98**, 012001



Belle, Phys. Rev. Lett. **98**, 262001

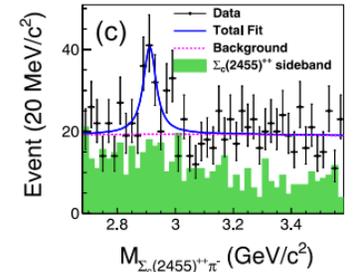
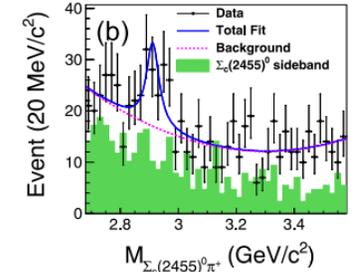
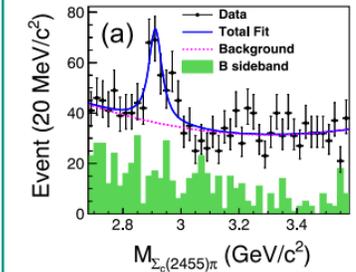


LHCb JHEP 05 (2017) 030 量子数偏向于 $3/2^-$



$\Lambda_c(2910)$

BELLE Phys. Rev. Lett. **130**, 031901 (2022)



$\bar{B}^0 \rightarrow \Sigma_c(2455)\pi\bar{p}$
 $2913.8 \pm 5.6 \pm 3.8 \text{ MeV}$
 $51.8 \pm 20.0 \pm 18.8 \text{ MeV}$

$\Lambda_c(2940)$ 的共振态参数

BABAR	$2939.8 \pm 1.3 \pm 1.0$	$17.5 \pm 5.2 \pm 5.9$
Belle	$2938.0 \pm 1.3^{+2.0}_{-4.0}$	13^{+8+27}_{-5-7}
LHCb	$2944.8^{+3.5}_{-2.5} \pm 0.4^{+0.1}_{-4.6}$	$27.7^{+8.2}_{-6.0} \pm 0.9^{+5.2}_{-10.4}$

一、 $\Lambda_c(2940)$ 和 $\Lambda_c(2910)$ 的谱学

传统势模型下 Λ_c^+ 重子谱学预测

$J^P(nL)$	Exp. [1]	This work	Ref. [9]	Ref. [50]	Ref. [51]
$\frac{1}{2}^+(1S)$	2286.86	2286	2286	2286	2265
$\frac{1}{2}^+(2S)$	2766.6	2766	2769	2791	2775
$\frac{1}{2}^+(3S)$		3112	3130	3154	3170
$\frac{1}{2}^+(4S)$		3397	3437		
$\frac{1}{2}^-(1P)$	2592.3	2591	2598	2625	2630
$\frac{3}{2}^-(1P)$	2628.1	2629	2627	2636	2640
$\frac{1}{2}^-(2P)$	2939.3	2989	2983		[2780]
$\frac{3}{2}^-(2P)$		3000	3005		[2840]
$\frac{1}{2}^-(3P)$		3296	3303		[2830]
$\frac{3}{2}^-(3P)$		3301	3322		[2885]
$\frac{3}{2}^+(1D)$		2857	2874	2887	2910
$\frac{5}{2}^+(1D)$	2881.53	2879	2880	2887	2910
$\frac{3}{2}^+(2D)$		3188	3189	3120	3035
$\frac{5}{2}^+(2D)$		3198	3209	3125	3140
$\frac{5}{2}^-(1F)$		3075	3097	[2872]	[2900]
$\frac{7}{2}^-(1F)$		3092	3078		3125
$\frac{7}{2}^+(1G)$		3267	3270		3175
$\frac{9}{2}^+(1G)$		3280	3284		

Eur. Phys. J. A 51, 82 (2015)

1. 已发现的大部分 Λ_c 重子可以通过传统势模型描述得很好；
2. $\Lambda_c(2940)$ 的实验值要比传统强子谱预言低70MeV左右；
3. $\Lambda_c(2910)$ 在强子谱中的位置尚不明确。

➤ 传统强子

Phys. Rev. D 106, 074020解释 $\Lambda_c(2910)$ 作为1P态的 ρ 模激发.....

➤ 分子态

Phys. Rev. D 101 (2020) 9, 094035
Phys. Rev. D **82**, 114029

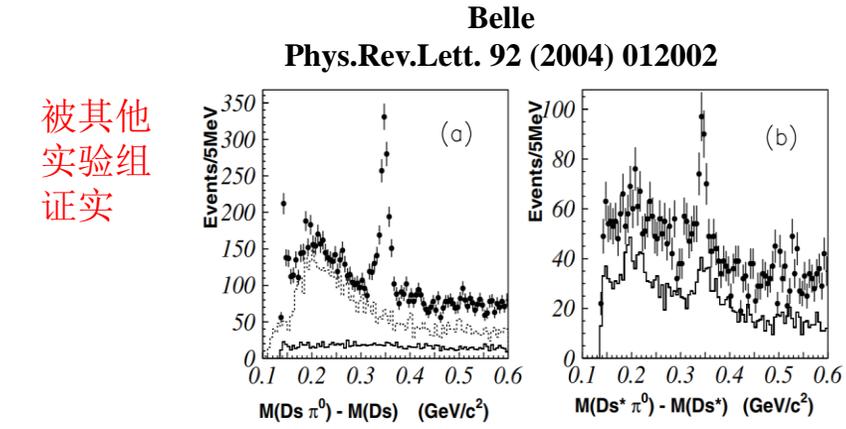
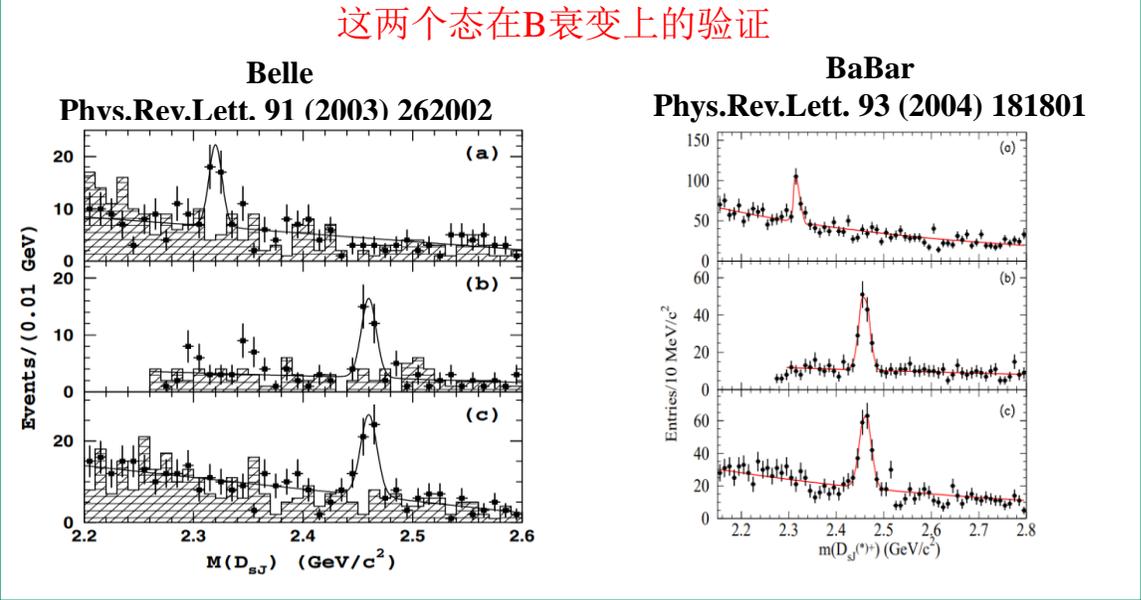
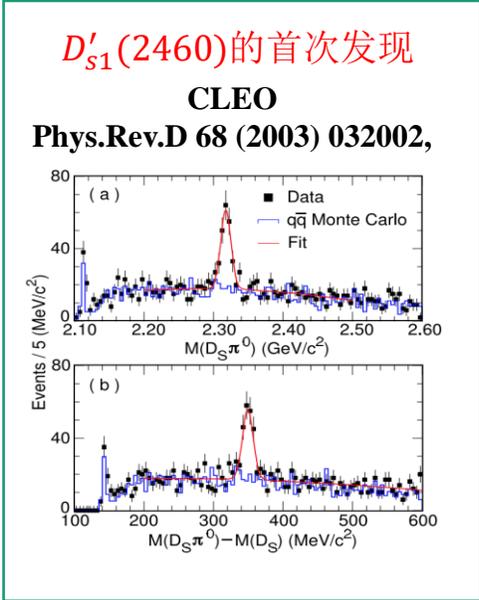
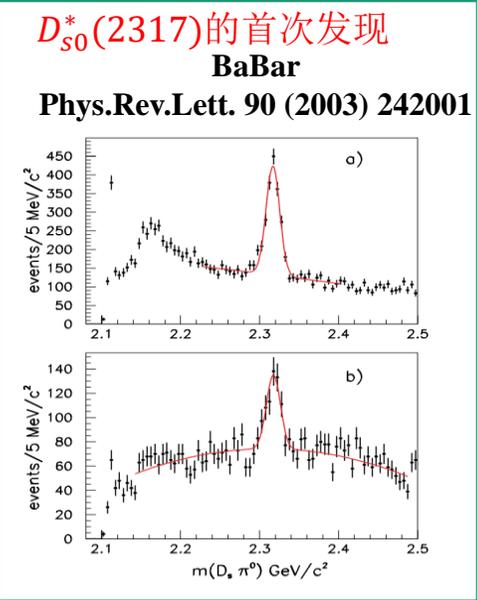
.....

➤ 裸核+S波强子道耦合

Eur. Phys. J. C 80 (2020) 4, 301

➤

一、 $D_{s0}^*(2317)$ 和 $D'_{s1}(2460)$ 的发现



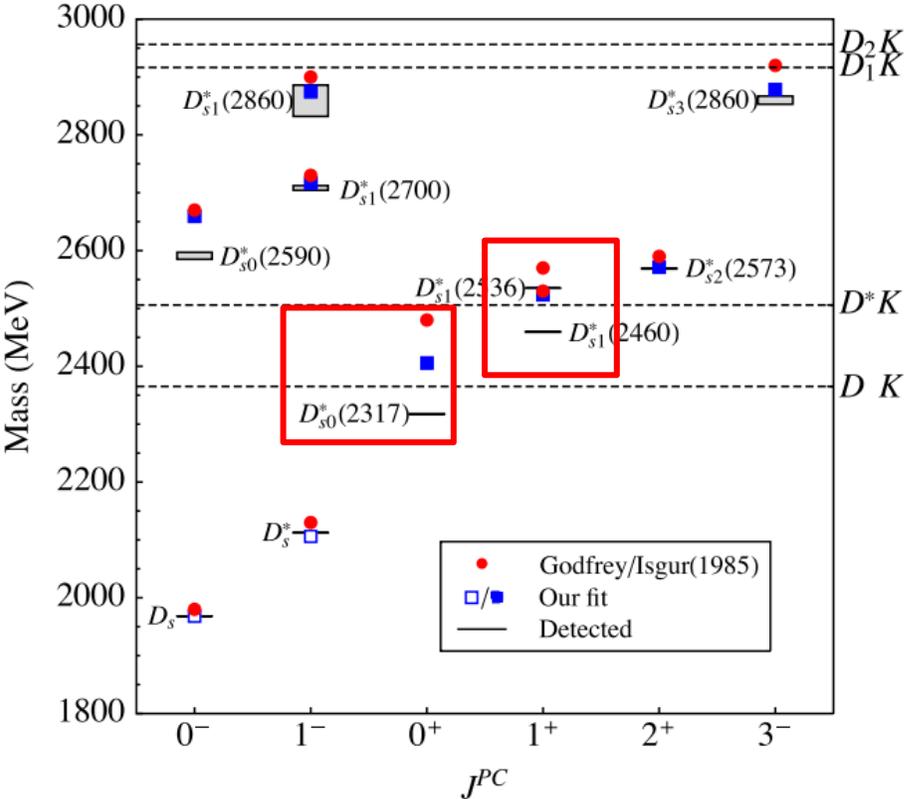
J^P 量子数安排

$D_{s0}^*(2317) \quad 0^+$
 $D'_{s1}(2460) \quad 1^+$

$m_{D_{s0}^*}(2317) = 2317.7 \pm 0.5 \text{ MeV},$
 $\Gamma_{D_{s0}^*}(2317) < 3.8 \text{ MeV},$
 $m_{D'_{s1}}(2460) = 2459.5 \pm 0.6 \text{ MeV},$
 $\Gamma_{D'_{s1}}(2460) < 3.5 \text{ MeV}.$

一、 $D_{s0}^*(2317)$ 和 $D_{s1}'(2460)$ 的谱学

势模型下 D_s 介子谱学预测



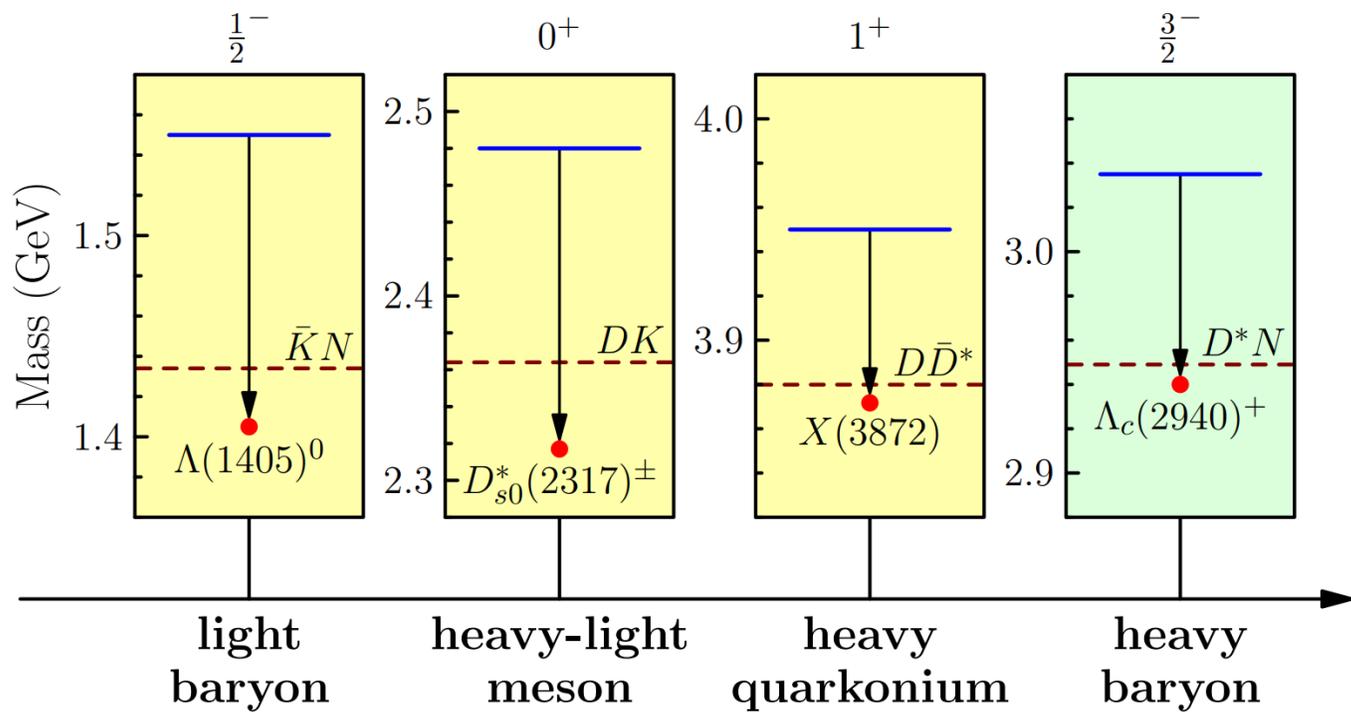
Phys. Rev. Lett. 128 (2022) 11, 112001

1. 实验上发现的 D_s 态大多数可以通过传统势模型描述的很好;
2. $D_{s0}^*(2317)$ 和 $D_{s1}'(2460)$ 的理论质量比传统强子谱预言低100MeV左右。

- 势模型
Phys. Rev. D 91, 054031 (2015)
Phys. Rev. D 105, no.7, 074037 (2022)
- 分子态
Phys. Rev. D 68, 054006 (2003)
Phys. Rev. D 76, 074016 (2007)
.....
- 多夸克态
Phys. Rev. Lett. 93, 232001 (2004)
.....
- 裸核+S波强子道
Phys. Rev. Lett. 128 (2022) 11, 112001
.....
-

一、存在低质量问题的强子态

几个具有低质量问题强子的实验质量(红色点)与对应裸质量(蓝色实线)的比较



- 这几个态的相似性:
1. 显著的低质量问题;
 2. 位于一个具有相同量子数的S波强子强子道的阈值下;
 3. 对应的传统夸克模型的预测, 都具有P波量子数。

Eur. Phys. J. C 80 (2020) 4, 301

- 在耦合道框架下, 进一步引入强子道自相互作用去理解 $D_{s0}^*(2317)$, $D'_{s1}(2460)$, $\Lambda_c(2940)$;
- 新发现的 $\Lambda_c(2910)$ 如何解释?
- 除了谱学, 强子衰变研究是理解强子结构很重要的方面。

二、 $\Lambda_c(2910)$ 和 $\Lambda_c(2940)$ 的谱学研究

Based on Zi-Le Zhang et al., $\Lambda_c(2910)$ and $\Lambda_c(2940)$ as conventional baryons dressed with the D^*N channel, Phys.Rev.D 107 (2023) 3, 034036.

理论框架

非淬火图像下，强子的裸态可以和相应强子道耦合，引起强子的质量移动，强子物理态波函数可以写为

$$|\Psi\rangle = c_0|\Psi_0\rangle + \int d^3\mathbf{p}\chi_{BC}(\mathbf{p})|BC, \mathbf{p}\rangle$$

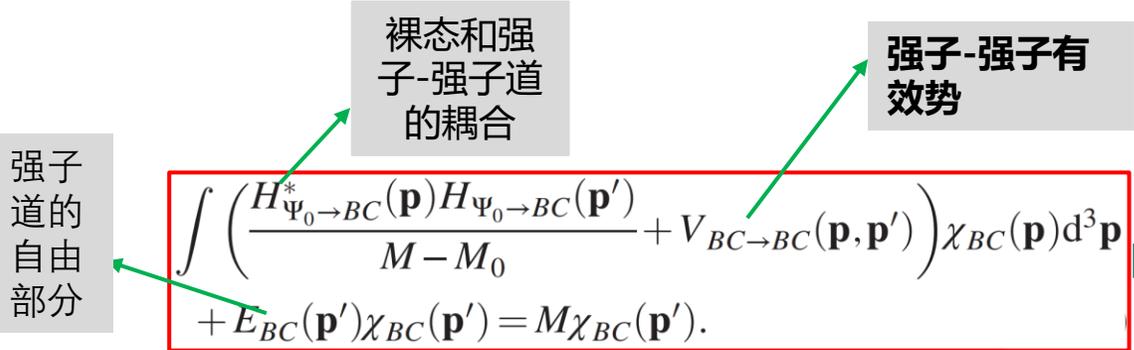
这里， $|\Psi_0\rangle$ 是裸态 **udc**核， c_0 是裸核的几率振幅； $|BC, \mathbf{p}\rangle$ 是强子道 **D^*N** ， $\chi_{BC}(\mathbf{p})$ 是强子道 **D^*N** 的波函数；

同时哈密顿量定义为

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_I + \hat{H}_{BC},$$

\hat{H}_0 只对裸态 $|\Psi_0\rangle$ 起作用， **\hat{H}_{BC} 描述 D^*N-D^*N 的相互作用**， \hat{H}_I 连接裸态和强子道的跃迁哈密顿量。

得到耦合道方程：



本征值方程

$$\sum_{i=1}^{N_{\max}} C_{il}(T_{fi} + \mathcal{M}_{fi} + V_{fi}) = M \sum_{i=1}^{N_{\max}} C_{il}N_{fi}.$$

方程的求解：高斯展开法 $\chi_{BC}(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{N_{\max}} C_{il}\phi_{ilm}^p(\mathbf{p})$

$$\phi_{nlm}^r(\nu_n, \mathbf{r}) = N_{nl}r^l e^{-\nu_n r^2} Y_{lm}(\hat{\mathbf{r}}) \quad \phi_{nlm}^p(\nu_n, \mathbf{p}) = (-i)^l \phi_{nlm}^r\left(\frac{1}{4\nu_n}, \mathbf{p}\right)$$

$$\nu_n = 1/r_n^2, \quad r_n = r_1 a^{n-1} \quad (n = 1, 2, \dots, N_{\max})$$

所以哈密顿量对应的矩阵元可以写为

$$T_{fi} = \int d^3\mathbf{p}' \phi_{flm}^{p*}(\nu_f, \mathbf{p}') E_{BC}(\mathbf{p}') \phi_{ilm}^p(\nu_i, \mathbf{p}'),$$

$$\mathcal{M}_{fi} = \int d^3\mathbf{p}' d^3\mathbf{p} \frac{H_{\Psi_0 \rightarrow BC}^*(\mathbf{p})H_{\Psi_0 \rightarrow BC}(\mathbf{p}')}{M - M_0} \times \phi_{flm}^{p*}(\nu_f, \mathbf{p}') \phi_{ilm}^p(\nu_i, \mathbf{p}),$$

$$V_{fi} = \int d^3\mathbf{p}' d^3\mathbf{p} \phi_{flm}^{p*}(\nu_f, \mathbf{p}') V_{BC \rightarrow BC}(\mathbf{p}, \mathbf{p}') \phi_{ilm}^p(\nu_i, \mathbf{p}),$$

$$N_{if} = \int d^3\mathbf{r}' \phi_{flm}^{r*}(\nu_f, \mathbf{r}') \phi_{ilm}^r(\nu_i, \mathbf{r}').$$

□ 裸质量和相应的波函数:传统势模型

$$H|\Psi_{JM}\rangle = E|\Psi_{JM}\rangle$$

$$H = \sum_{i=1}^3 \frac{p_i^2}{2m_i} + \sum_{i<j} V_{ij}(\mathbf{r})$$

$$V_{ij} = H_{ij}^{\text{conf}} + H_{ij}^{\text{hyp}} + H_{ij}^{\text{so(cm)}} + H_{ij}^{\text{so(tp)}}$$

$$H_{ij}^{\text{conf}} = -\frac{2\alpha_s}{3r_{ij}} + \frac{b}{2}r_{ij} + \frac{1}{2}C$$

$$H_{ij}^{\text{hyp}} = \frac{2\alpha_s}{3m_i m_j} \left[\frac{8\pi}{3} \tilde{\delta}(r_{ij}) \mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_j + \frac{1}{r_{ij}^3} S(\mathbf{r}, \mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j) \right]$$

$$H_{ij}^{\text{so(cm)}} = \frac{2\alpha_s}{3r_{ij}^3} \left(\frac{\mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{s}_i}{m_i^2} - \frac{\mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{p}_j \cdot \mathbf{s}_j}{m_j^2} - \frac{\mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{p}_j \cdot \mathbf{s}_i - \mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{s}_j}{m_i m_j} \right)$$

$$H_{ij}^{\text{so(tp)}} = -\frac{1}{2r_{ij}} \frac{\partial H_{ij}^{\text{conf}}}{\partial r_{ij}} \left(\frac{\mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{s}_i}{m_i^2} - \frac{\mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{p}_j \cdot \mathbf{s}_j}{m_j^2} \right).$$

$$\tilde{\delta}(r) = \frac{\sigma^3}{\pi^{3/2}} e^{-\sigma^2 r^2} \quad S(\mathbf{r}, \mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j) = \frac{3\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{r}_{ij} \mathbf{s}_j \cdot \mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^2} - \mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_j$$

□ 裸核和强子道的耦合：QPC模型

QPC模型的算符为

$$\hat{\mathcal{T}} = -3\gamma \sum_m \langle 1, m; 1, -m | 0, 0 \rangle \int d^3 \mathbf{p}_i d^3 \mathbf{p}_j \delta(\mathbf{p}_i + \mathbf{p}_j) \\ \times \mathcal{Y}_1^m \left(\frac{\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j}{2} \right) \omega_0^{(i,j)} \phi_0^{(i,j)} \chi_{1,-m}^{(i,j)} b_i^\dagger(\mathbf{p}_i) d_j^\dagger(\mathbf{p}_j).$$

裸核到强子-强子道的跃迁振幅可以写为

$$M_{A \rightarrow BC}^{SL}(p) = \langle BC, S, L, p | \hat{\mathcal{T}} | A \rangle,$$

γ 值：重现 $\Sigma_c(2520)$ 的宽度，最终被确定为9.45。

裸的 $\Lambda_c(2P)$ 耦合到S波 D^*N 的跃迁振幅：

$$H_{\Lambda_c^{\text{bare}}(2P, 1/2^-) \rightarrow D^*N}(\mathbf{p}) = \langle D^*N, \mathbf{p} | \hat{H}_I | \Lambda_c^{\text{bare}}(2P, 1/2^-) \rangle$$

$$H_{\Lambda_c^{\text{bare}}(2P, 3/2^-) \rightarrow D^*N}(\mathbf{p}) = \langle D^*N, \mathbf{p} | \hat{H}_I | \Lambda_c^{\text{bare}}(2P, 3/2^-) \rangle$$



$$\mathcal{M}_{fi} = \int d^3 \mathbf{p}' d^3 \mathbf{p} \frac{H_{\Psi_0 \rightarrow BC}^*(\mathbf{p}) H_{\Psi_0 \rightarrow BC}(\mathbf{p}')}{M - M_0} \\ \times \phi_{flm}^{p*}(\nu_f, \mathbf{p}') \phi_{ilm}^p(\nu_i, \mathbf{p}),$$

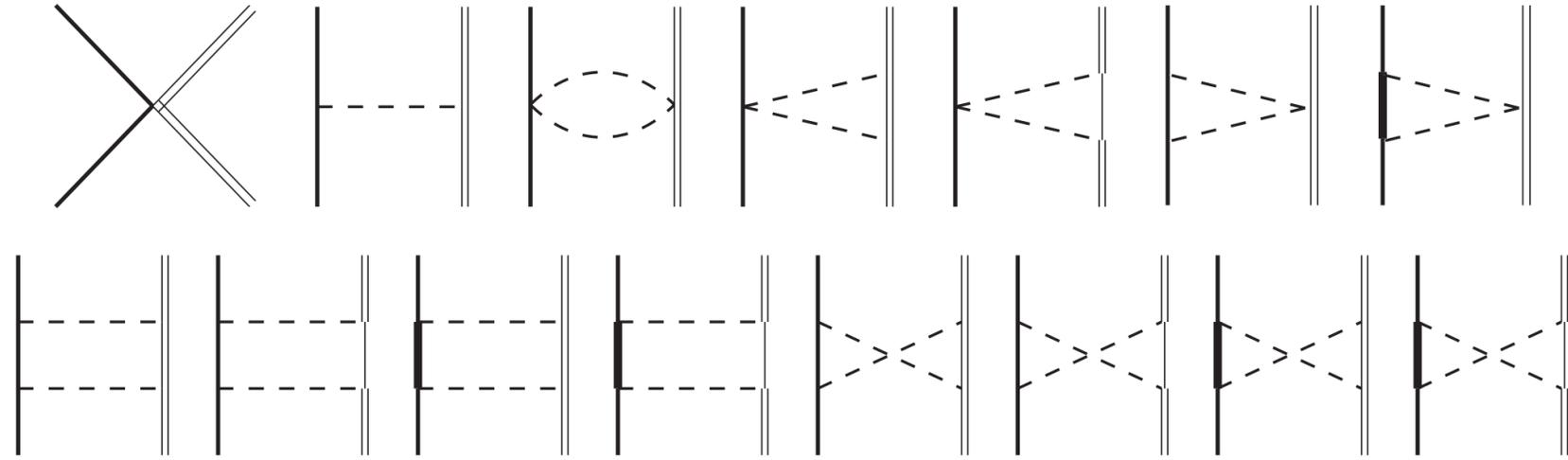
□ D^*N 手征有效势

计算方法: 手征有效场理论;

手征有效场理论: 低能有效场理论, 研究对象为强子, 最初广泛应用于NN系统, 并获得了极大的成功。

在重强子系统的应用: 重夸克对称性, 简化计算。

费曼图: 领头阶接触项图、领头阶单 π 交换图、次领头阶双 π 交换图



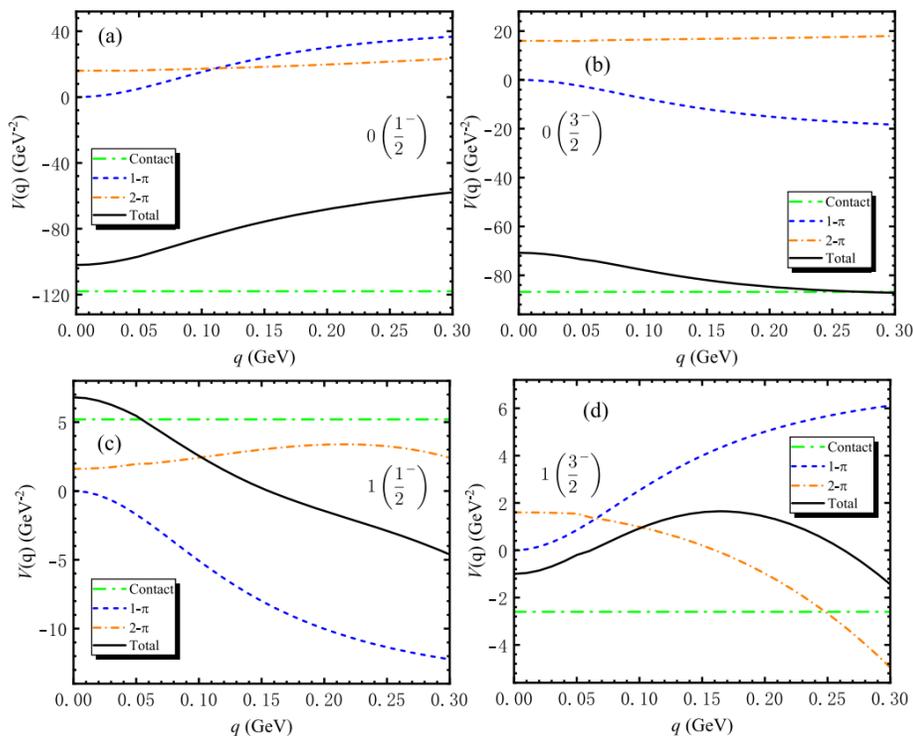
费曼振幅 $\mathcal{M}(D^*N \rightarrow D^*N)$ $\xrightarrow{\mathcal{V} = -\mathcal{M}/(\prod_i 2m_i \prod_f 2m_f)^{1/2}}$ $\mathcal{V}_{\text{total}} = \mathcal{V}_{\text{contact}}^{\text{LO}} + \mathcal{V}_{1-\pi}^{\text{LO}} + \mathcal{V}_{2-\pi}^{\text{NLO}}$

Phys. Rev. D 101 (2020) 9, 094035

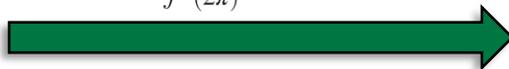
□ D^*N 手征有效势：数值结果

- D^*N $0(1/2^-)$: 单 π 和双 π 提供排斥作用, 吸引作用主要由接触项提供;
- D^*N $0(3/2^-)$: 单 π 和接触项提供吸引作用, 双 π 提供排斥作用。

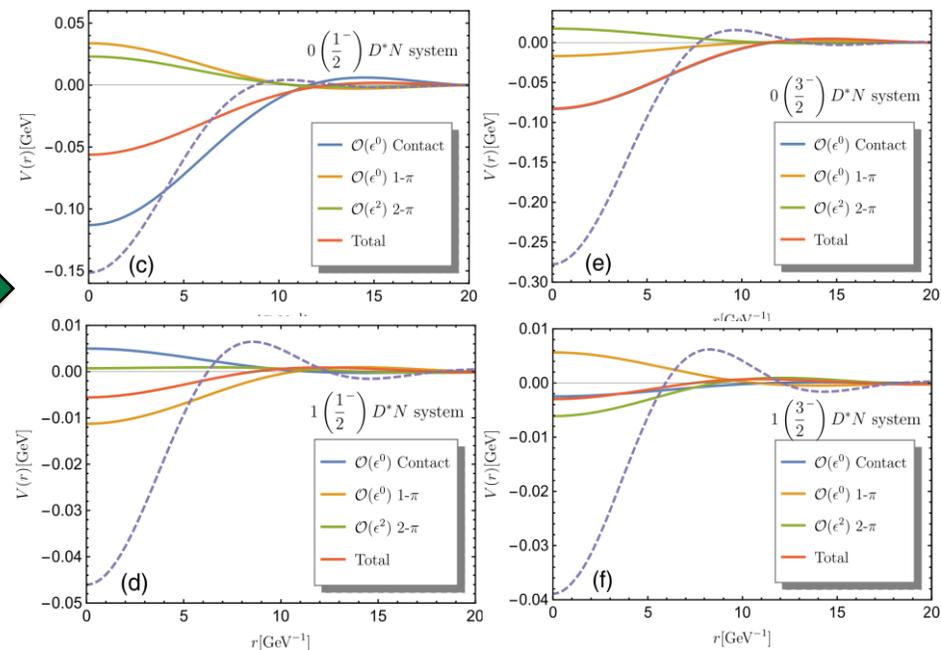
动量空间下有效势



$$V_{BC \rightarrow BC}(\mathbf{r}) = \int \frac{d^3\mathbf{q}}{(2\pi)^3} e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}} \mathcal{V}(\mathbf{q}) \mathcal{F}(\mathbf{q})$$



传统的坐标空间下有效势

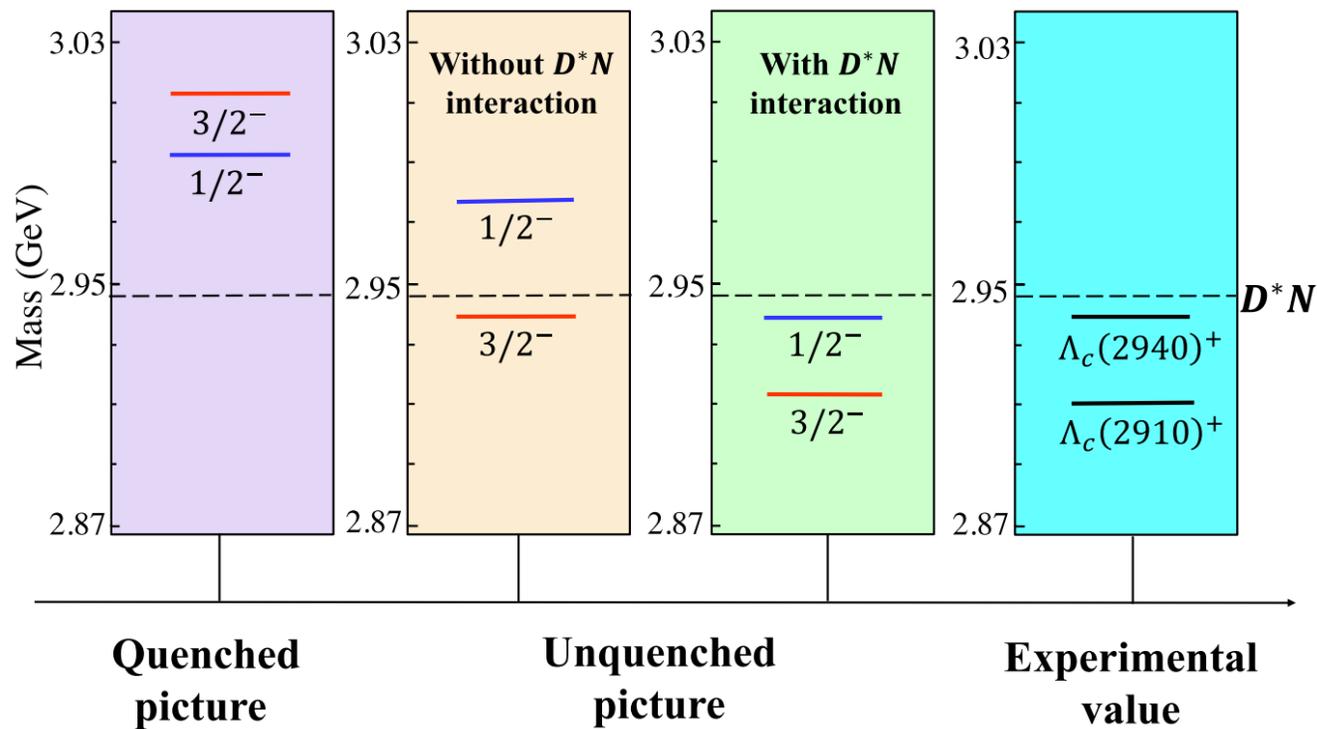


$$V_{fi} = \int d^3\mathbf{r} \phi_{flm}^{r*}(\nu_f, \mathbf{r}) V_{BC \rightarrow BC}(\mathbf{r}) \phi_{ilm}^r(\nu_i, \mathbf{r})$$

Phys. Rev. D 101 (2020) 9, 094035

□ 计算结果

引入非淬火效应前后 $\Lambda_c(2P, 1/2^-)$ 和 $\Lambda_c(2P, 3/2^-)$ 的质量比较



淬火; 非淬火不考虑 D^*N 相互作用; 非淬火考虑 D^*N 相互作用的结果

Cases	Quenched picture		Unquenched picture without D^*N interaction			Unquenched picture with D^*N interaction		
	J^P	M_0 (MeV)	M (MeV)	r_{RMS} (fm)	$P(udc)$ (%)	M (MeV)	r_{RMS} (fm)	$P(udc)$ (%)
$1/2^-$	Ref. [3]	2989	2974	\times	\times	2936	1.93	16.2
$3/2^-$		3000	2933	1.67	39.7	2908	1.31	29.4
$1/2^-$	Ref. [13]	2980	2955	\times	\times	2934	1.83	21.9
$3/2^-$		3004	2935	1.74	37.0	2909	1.31	27.9
$1/2^-$	Ref. [2]	2983	2962	\times	\times	2935	1.87	19.8
$3/2^-$		3005	2935	1.76	36.3	2909	1.32	27.5
$1/2^-$	Ref. [46]	2996	2985	\times	\times	2937	2.00	13.4
$3/2^-$		3012	2937	1.95	31.4	2911	1.33	25.2
$1/2^-$	Ref. [4]	3030	3036	\times	\times	2940	2.32	5.08
$3/2^-$		3035	2943	2.93	15.8	2916	1.38	18.7

- $\Lambda_c(2P, 3/2^-)$ 的质量移动比 $\Lambda_c(2P, 1/2^-)$ 更强;
- 引入 D^*N 相互作用后, 两个态的裸质量下移至2911 MeV和2937 MeV, 分别对应 $\Lambda_c(2910)$ 和 $\Lambda_c(2940)$ 实验值;
- 非淬火图像下, 两个 $\Lambda_c(2P)$ 态出现质量反转现象, 这种质量反转在 $N(1535)1/2^-$ 和 $N(1520)3/2^-$ 中出现;
- 物理态是裸态和 D^*N 的混合, 有显著的 D^*N 成分。

三、 $D_{s0}^*(2317)$ 和 $D'_{s1}(2460)$ 的谱学和电磁衰变研究

Based on Zi-Le Zhang et al., Masses and radiative decay widths of the $D_{s0}^*(2317)$ and $D'_{s1}(2460)$ and their bottom analogs, arXiv: 2409.05337 [hep-ph].

□ $D_{s_0}^*$ (2317)和 D'_{s_1} (2460)的谱学:理论框架

D'_{s_1} (2460)涉及到两个裸核,对应的物理态表示为

$$|\Psi\rangle = c_{\alpha_1} |\Psi_{\alpha_1}\rangle + c_{\alpha_2} |\Psi_{\alpha_2}\rangle + \int d^3\mathbf{p} \phi_{BC}(\mathbf{p}) |BC, \mathbf{p}\rangle$$

这里, $|\Psi_{\alpha_1}\rangle$ 和 $|\Psi_{\alpha_2}\rangle$ 分别是裸的 $|c\bar{s}, 1^+, j_l = \frac{1}{2}\rangle$ 核和裸的 $|c\bar{s}, 1^+, j_l = \frac{3}{2}\rangle$, c_{α_1} 和 c_{α_2} 分别是对应的裸核几率振幅;

$|BC, \mathbf{p}\rangle$ 是强子道 D^*K , $\phi_{BC}(\mathbf{p})$ 是强子道 D^*K 的波函数;

哈密顿量为

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_I + \hat{H}_{BC},$$

\hat{H}_0 只对裸态 $|\Psi_{\alpha_1}\rangle$ 和 $|\Psi_{\alpha_2}\rangle$ 起作用, \hat{H}_{BC} 只对强子道 $|BC, \mathbf{p}\rangle$ 起作用, \hat{H}_I 连接裸核和强子道的跃迁哈密顿量。

$$\begin{aligned} & E_{BC}(\mathbf{p})\phi_{BC}(\mathbf{p}) + \int d^3\mathbf{p}' \phi_{BC}(\mathbf{p}') [V_{BC\rightarrow BC}(\mathbf{p}, \mathbf{p}') \\ & + H_{\alpha_1\rightarrow BC}(\mathbf{p}) (d_1 H_{\alpha_1\rightarrow BC}^*(\mathbf{p}') + d_2 H_{\alpha_2\rightarrow BC}^*(\mathbf{p}')) \\ & + H_{\alpha_2\rightarrow BC}(\mathbf{p}) (d_2 H_{\alpha_1\rightarrow BC}^*(\mathbf{p}') + d_3 H_{\alpha_2\rightarrow BC}^*(\mathbf{p}'))] \\ & = M\phi_{BC}(\mathbf{p}). \end{aligned}$$

方程的求解: 高斯展开法

$$\chi_{BC}(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{N_{\max}} C_{il} \phi_{ilm}^p(\mathbf{p})$$

$$T_{fi} = \int d^3\mathbf{p}' \phi_{flm}^{p*}(\nu_f, \mathbf{p}') E_{BC}(\mathbf{p}') \phi_{ilm}^p(\nu_i, \mathbf{p}'),$$

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_{fi} = & \int d^3\mathbf{p}' d^3\mathbf{p} [H_{\alpha_1\rightarrow BC}(\mathbf{p}') (d_1 H_{\alpha_1\rightarrow BC}^*(\mathbf{p}) \\ & + d_2 H_{\alpha_2\rightarrow BC}^*(\mathbf{p})) + H_{\alpha_2\rightarrow BC}(\mathbf{p}') \\ & \times (d_2 H_{\alpha_1\rightarrow BC}^*(\mathbf{p}) + d_3 H_{\alpha_2\rightarrow BC}^*(\mathbf{p}))] \\ & \times \phi_{flm}^{p*}(\nu_f, \mathbf{p}') \phi_{ilm}^p(\nu_i, \mathbf{p}), \end{aligned}$$

$$V_{fi} = \int d^3\mathbf{p}' d^3\mathbf{p} \phi_{flm}^{p*}(\nu_f, \mathbf{p}') V_{BC\rightarrow BC}(\mathbf{p}, \mathbf{p}') \phi_{ilm}^p(\nu_i, \mathbf{p}),$$

$$N_{fi} = \int d^3\mathbf{r}' \phi_{flm}^{r*}(\nu_f, \mathbf{r}') \phi_{ilm}^r(\nu_i, \mathbf{r}').$$

$$\sum_{i=1}^{N_{\max}} C_{il} (T_{fi} + \mathcal{M}_{fi} + V_{fi}) = M \sum_{i=1}^{N_{\max}} C_{il} N_{fi}$$

□ $D_{s_0}^*$ (2317) 和 D_{s_1}' (2460) 的谱学: 理论框架

□ 裸质量和相应的波函数: 传统势模型

$$H|\Psi_{JM}\rangle = E|\Psi_{JM}\rangle$$

$$\hat{H}_0 = \sum_{i=1} \left(m_i + \frac{p_i^2}{2m_i} \right) + \sum_{i<j} V_{ij},$$

$$V_{ij} = H_{ij}^{\text{conf}} + H_{ij}^{\text{hyp}} + H_{ij}^{\text{so(cm)}} + H_{ij}^{\text{so(tp)}}$$

$$H_{ij}^{\text{conf}} = -\frac{2\alpha_s}{3r_{ij}} + \frac{b}{2}r_{ij} + \frac{1}{2}C$$

$$H_{ij}^{\text{hyp}} = \frac{2\alpha_s}{3m_i m_j} \left[\frac{8\pi}{3} \tilde{\delta}(r_{ij}) \mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_j + \frac{1}{r_{ij}^3} S(\mathbf{r}, \mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j) \right]$$

$$H_{ij}^{\text{so(cm)}} = \frac{4\alpha_s}{3r_{ij}^3} \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right) \left(\frac{\mathbf{s}_i}{m_i} + \frac{\mathbf{s}_j}{m_j} \right) \cdot \mathbf{L}$$

$$H_{ij}^{\text{so(tp)}} = -\frac{1}{2r_{ij}} \frac{\partial H_{ij}^{\text{conf}}}{\partial r_{ij}} \left(\frac{\mathbf{s}_i}{m_i^2} + \frac{\mathbf{s}_j}{m_j^2} \right) \cdot \mathbf{L}$$

□ 裸核和中间态的耦合: QPC模型

$$\hat{\mathcal{T}} = -3\gamma \sum_m \langle 1, m; 1, -m | 0, 0 \rangle \int d^3\mathbf{p}_i d^3\mathbf{p}_j \delta(\mathbf{p}_i + \mathbf{p}_j) \\ \times \mathcal{Y}_1^m \left(\frac{\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j}{2} \right) \omega_0^{(i,j)} \phi_0^{(i,j)} \chi_{1,-m}^{(i,j)} b_i^\dagger(\mathbf{p}_i) d_j^\dagger(\mathbf{p}_j).$$

$$M_{A \rightarrow BC}^{SL}(p) = \langle BC, S, L, p | \hat{\mathcal{T}} | A \rangle$$

□ 强子-强子相互作用: 基于有效拉氏量的有效场理论

- 1、根据有效拉氏量得到费曼振幅;
- 2、布雷特近似得到动量空间有效势;
- 3、傅里叶变换获得坐标空间的有效势。

□ $D_{s0}^*(2317)$ 和 $D'_{s1}(2460)$ 的谱学: 计算结果

➤ 裸质量

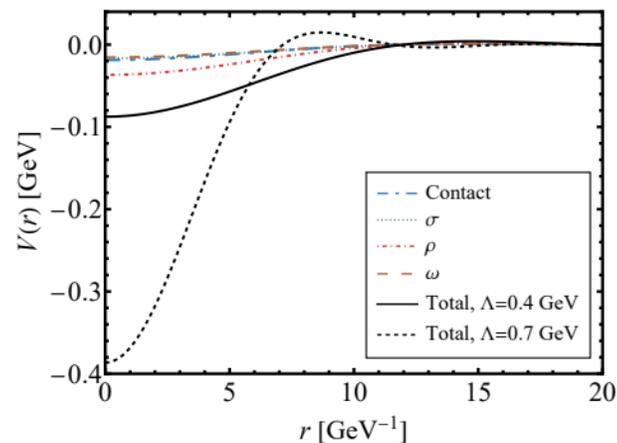
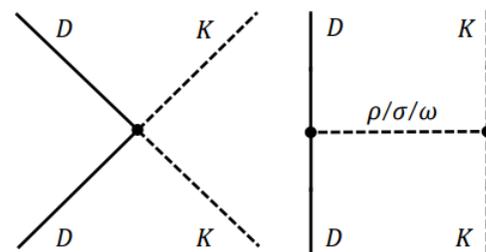
Core	M_0	M_1	M_2	M'
$c\bar{s}$	2447	2537	2526	4
$s\bar{b}$	5821	5862	5861	2

M_0 : $D_{s0}^*(2317)$ 对应的裸质量;

M_1 : $D'_{s1}(2460)$ 对应的 $j_l = 1/2$ 的裸质量;

M_2 : $D'_{s1}(2460)$ 对应的 $j_l = 3/2$ 的裸质量。

➤ D^*K 相互作用势



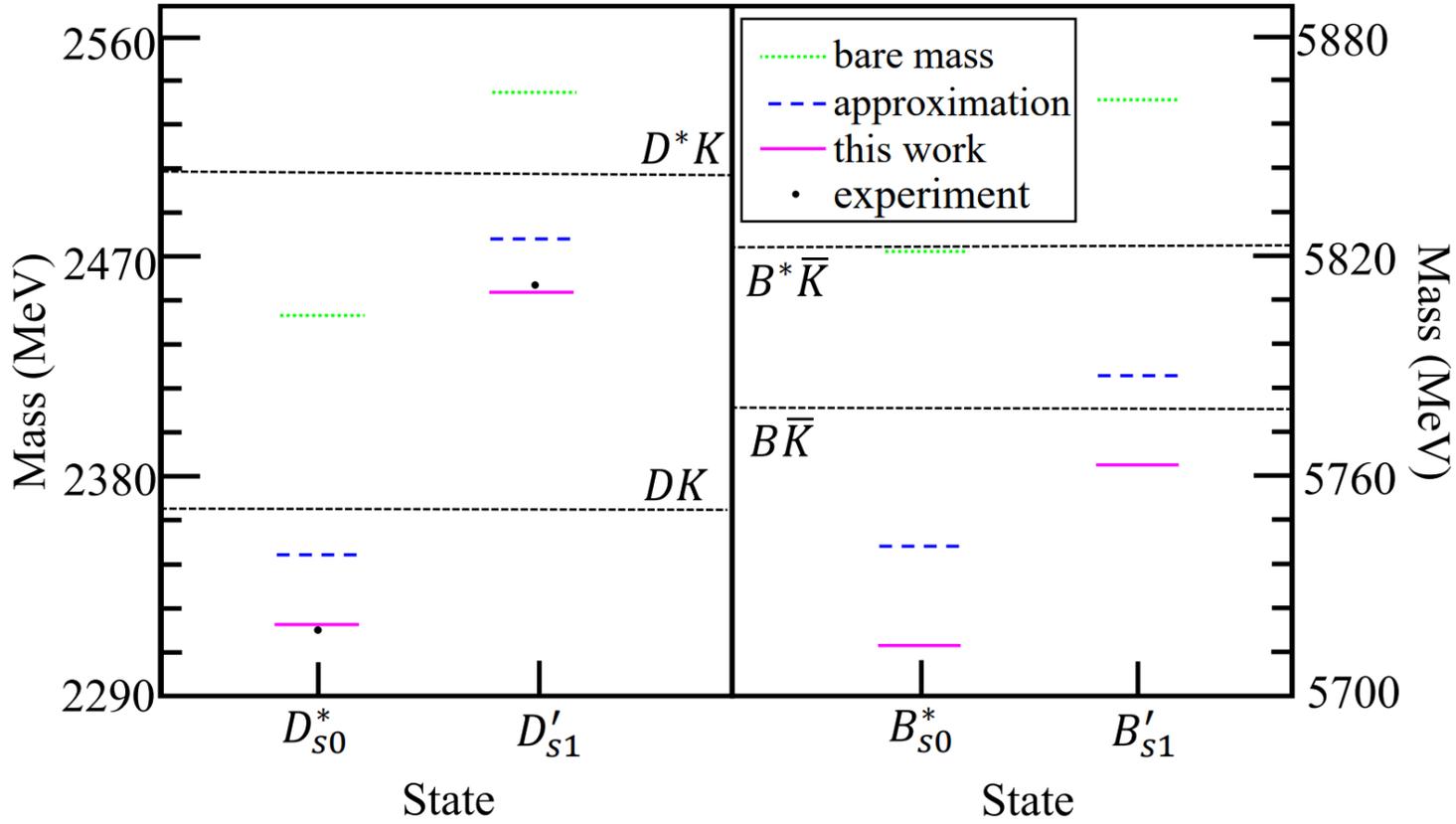
➤ QPC模型中的参数 γ 值

根据解裸质量得到的波函数, 获得裸核到强子道的跃迁振幅, 通过拟合 $D_{s2}^*(2573)$ 的总宽度, 拟合为5.7。

再进一步得到我们所要求的跃迁振幅

□ D_{s0}^* (2317)和 D'_{s1} (2460)的谱学: 计算结果

引入非淬火效应前后 D_{s0}^* (1P)和 D'_{s1} (1P)态的质量比较



裸质量(绿色点线)

非淬火图像不考虑 $D^{(*)}K-D^{(*)}K$ 相互作用(蓝色点线)

非淬火图像考虑 $D^{(*)}K-D^{(*)}K$ 相互作用(红色实线)

实验值(黑色点)

- 引入 $D^{(*)}K-D^{(*)}$ 相互作用后, D_{s0}^* (2317)和 D'_{s1} (2460)的理论质量逐渐和实验重合;
- D_{s0}^* (2317)和 D'_{s1} (2460)包含裸核和强子道成分;
- 强子道的自相互作用对于理解 D_{s0}^* (2317)和 D'_{s1} (2460)比较重要;
- 基于重夸克味道对称性, 我们给出了底奇异对应态的预测, 质量分别为5714MeV和5762MeV。

□ D_{s0}^* (2317) 和 D_{s1}' (2460) 的电磁衰变

➤ 裸核的电磁衰变

Phys. Rev. D 38, 279 (1988)

$$\Gamma(i \rightarrow f + \gamma) = \frac{4}{3} \langle e_Q \rangle^2 \alpha \omega^3 C_{fi} \delta_{SS'} |\langle f | r | i \rangle|^2$$

➤ 强子—强子道的电磁衰变

Phys. Rev. D 107, 054022 (2023)

Phys. Rev. D 74, 014013 (2006)

$$\mathcal{M}_{[AB] \rightarrow C\gamma}^{JM} = \int \frac{d^3 \mathbf{p}'}{(2\pi)^{3/2}} \frac{\sqrt{2m_{[AB]}}}{\sqrt{2m_A} \sqrt{2m_B}} \hat{\phi}_{[AB]}^{JM}(\mathbf{p}') \otimes \hat{\mathcal{M}}_{AB \rightarrow C\gamma}(\mathbf{p}, \mathbf{p}')$$

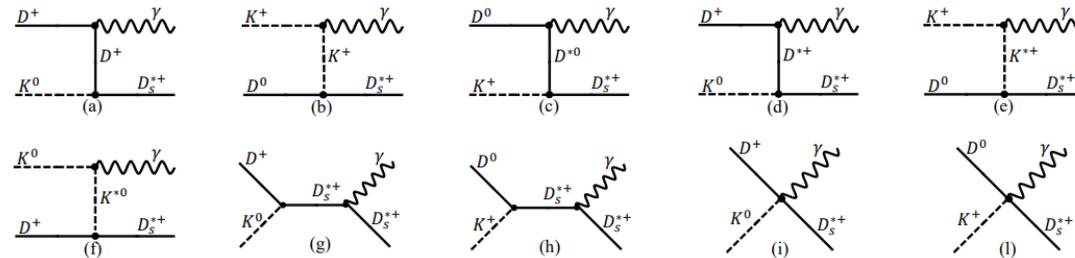
$$\Gamma_{[AB] \rightarrow C\gamma} = \frac{1}{2J+1} \frac{|\mathbf{p}|}{32\pi^2 m_{[AB]}^2} \sum_M \int |\mathcal{M}_{[AB] \rightarrow C\gamma}^{JM}|^2 d\Omega_{\mathbf{p}}$$

➤ 物理态的电磁衰变 (总的)

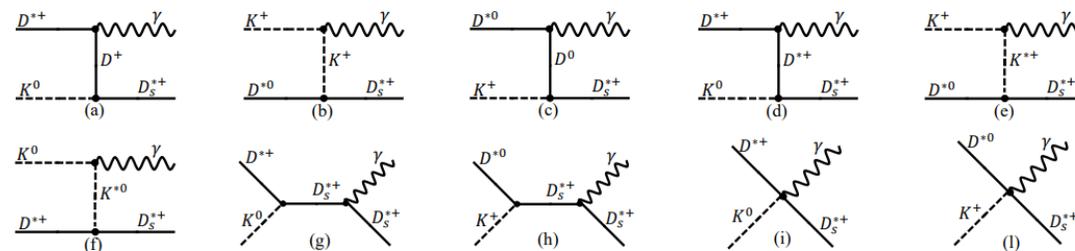
$$\begin{aligned} \Gamma_{N+[AB] \rightarrow C\gamma}^{\text{Total}} &= \frac{1}{2J+1} \frac{|\mathbf{p}|}{32\pi^2 m^2} \sum_M \int d\Omega_{\mathbf{p}} \\ &\quad \times |\mathcal{M}_{N \rightarrow C\gamma} + \mathcal{M}_{[AB] \rightarrow C\gamma}|^2 \\ &= \frac{1}{2J+1} \frac{|\mathbf{p}|}{32\pi^2 m^2} \sum_M \int d\Omega_{\mathbf{p}} \left(|\mathcal{M}_{N \rightarrow C\gamma}|^2 \right. \\ &\quad \left. + |\mathcal{M}_{[AB] \rightarrow C\gamma}|^2 + \mathcal{M}_{N \rightarrow C\gamma}^\dagger \mathcal{M}_{[AB] \rightarrow C\gamma} + h.c. \right) \end{aligned}$$

散射振幅

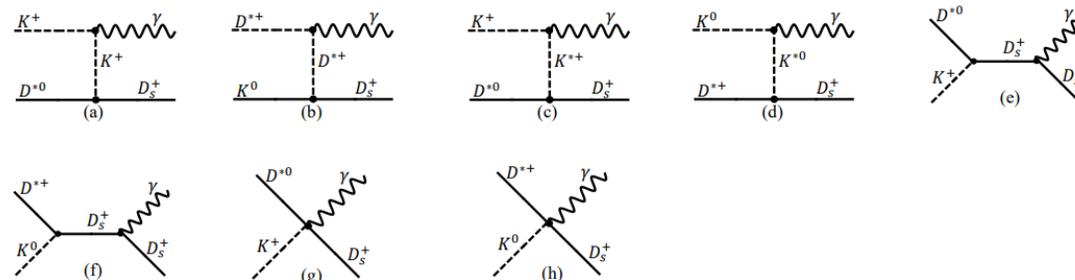
A: $DK \rightarrow D_s^* \gamma$ process



B: $D^* K \rightarrow D_s^* \gamma$ process

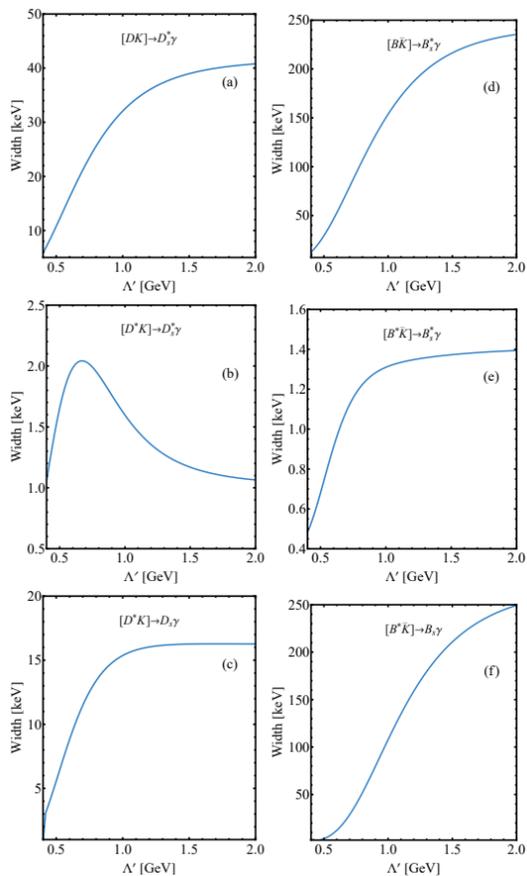


C: $D^* K \rightarrow D_s \gamma$ process

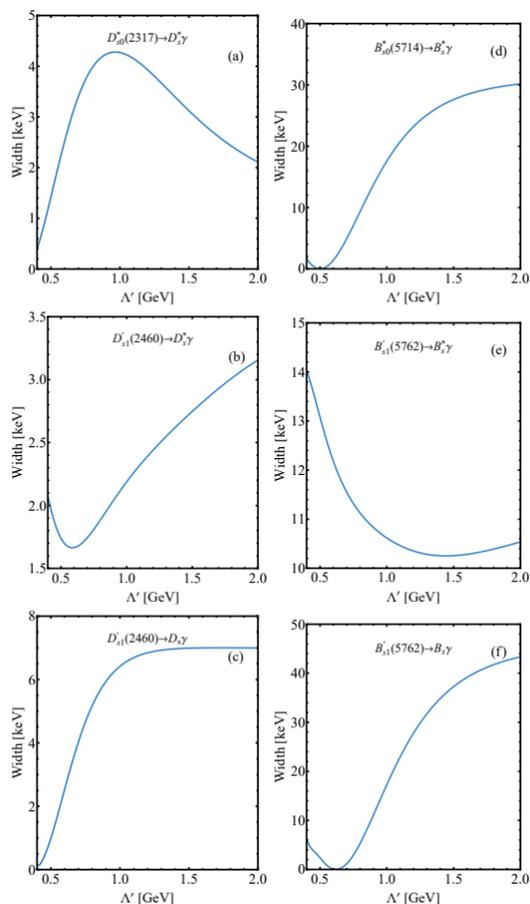


□ D_{s0}^* (2317) 和 D'_{s1} (2460) 的电磁衰变

Case I 纯分子态



Case II 物理态



Process Λ' (GeV)	$\Gamma[D_{s0}^* \rightarrow D_s^* \gamma]$		$\Gamma[D'_{s1} \rightarrow D_s^* \gamma]$		$\Gamma[D'_{s1} \rightarrow D_s \gamma]$		$\Gamma[B_{s0}^* \rightarrow B_s^* \gamma]$		$\Gamma[B'_{s1} \rightarrow B_s^* \gamma]$		$\Gamma[B'_{s1} \rightarrow B_s \gamma]$	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
0.5	10.79	1.41	1.65	1.74	5.58	0.98	29.37	0.01	0.68	13.08	3.5	2.42
1.0	32.06	4.27	1.60	2.19	15.36	6.41	153.69	17.56	1.31	10.62	107.83	17.27
1.5	38.97	3.12	1.17	2.75	16.26	6.99	216.48	27.61	1.37	10.26	210.77	37.27

➤ 引入裸核后, $D_{s0}^*(2317) \rightarrow D_s^* \gamma$, $D'_{s1}(2460) \rightarrow D_s \gamma$, $B_{s0}^* \rightarrow B_s^* \gamma$, $B'_{s1} \rightarrow B_s^* \gamma$, $B'_{s1} \rightarrow B_s \gamma$ 的宽度改变较为显著。

其他理论文章的结果

Method	Ref.	$D_{s0}^* \rightarrow D_s^* \gamma$	$D'_{s1} \rightarrow D_s^* \gamma$	$B_{s0}^* \rightarrow B_s^* \gamma$	$B'_{s1} \rightarrow B_s^* \gamma$
S. Godfrey et al.	[11, 84]	9.0	9.6	70.0	57.3
Parity doubling model	[29]	1.74	4.66	58.3	56.9
Effective Lagrangian approach	[38, 114]	0.55 – 1.41	–	3.07–4.06	0.04 – 0.18
Effective Lagrangian approach	[115]	–	–	–	0.4 – 2.6
Light-cone sum rules	[178, 179]	1.3 – 9.9	–	1.3 – 13.6	0.3 – 6.1
Light-cone sum rules	[107]	4 – 6	0.6 – 1.1	–	–
Lutz and Soyeur	[106]	1.94(6.47)	21.8(12.47)	–	–
H. L. Fu et al.	[109]	3.7 ± 0.3	13 ± 2	59 ± 8	100 ± 15

四、总结

- 在完整的耦合道框架下我们重现出 $\Lambda_c(2940)$ 和 $\Lambda_c(2910)$ 的实验质量，另外还解释了 $D_{s0}^*(2317)$ 和 $D'_{s1}(2460)$ ；
- 在耦合道框架下 $\Lambda_c(2940)$ ， $\Lambda_c(2910)$ ， $D_{s0}^*(2317)$ 和 $D'_{s1}(2460)$ 包含裸核和强子-强子道成分；
- 强子-强子道的自相互作用对于理解强子谱的反常现象比较重要；
- $D_{s0}^*(2317)$ ， $D'_{s1}(2460)$ 的辐射衰变可以进一步帮助我们理解它们的内部结构。

谢谢大家请批评指正