粲物理与格点量子色动力学

刘朝峰

高能物理研究所

liuzf@ihep.ac.cn

基础物理研究中心

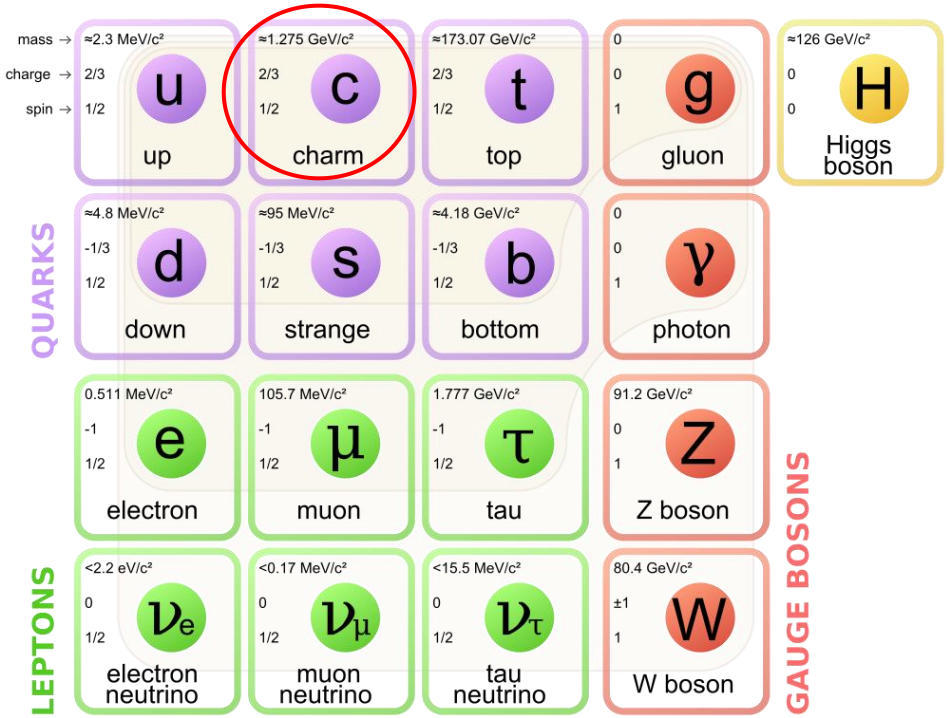
安徽理工大学

淮南 2024.05.30

提纲

- 研究动机
- 格点量子色动力学（QCD）
- 粲物理的格点QCD研究
  - ✓ 衰变常数(纯轻衰变)
  - ✓ 形状因子(辐射衰变)
  - 粲夸克质量、谱学
  - ……
- 总结

粒子物理标准模型(Standard Model)



- 物质基本结构，基本相互作用
- 不包括引力相互作用（引力很小）
- 三代费米子：夸克、轻子
- 中微子无质量
- 相互作用由规范玻色子传递
- 弱、电磁、强相互作用

- 2012年LHC上发现希格斯玻色子（“上帝粒子”）
- BEH (Brout-Englert-Higgs) 玻色子
  (Brout去世于2011年)
- 汤川耦合使费米子获得质量
- 希格斯粒子有自相互作用

2013物理诺贝尔奖：恩格勒，希格斯

标准模型

- 理论：相对论量子场论
  - 微观粒子—量子力学
  - 高速运动，接近光速—相对论
  - 粒子的产生和湮灭—场论
- 规范对称性：
  - $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 电弱统一理论
  - $SU(3)_C$ 量子色动力学，U(1)量子电动力学

超出标准模型的新物理

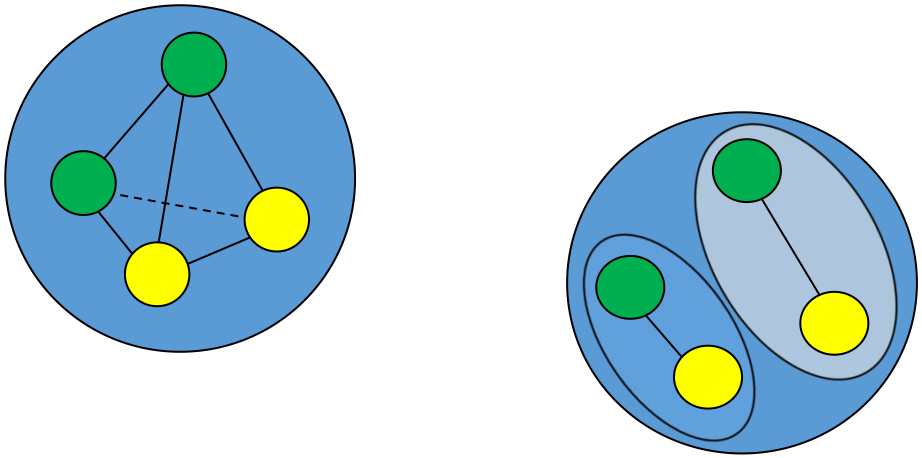
- 中微子质量：2012年3月，大亚湾中微子实验发现第三种中微子振荡模式
- 暗物质：星系的旋转速度比引力理论的预言快，需要额外的引力来源
- 暗能量：宇宙膨胀速度越来越快，需要某种反引力的东西
- 标准模型只能解释宇宙中不到5%的物质
- 正-反物质的不对称性
- 引力没被包括；强相互作用和电弱相互作用没有统一

标准模型留下的作业

CEPC

- LHC上发现的希格斯粒子不一定是标准模型里的希格斯粒子（需要希格斯工厂）
- 强子谱和奇异强子(X, Y, Z共振结构)
- 理解质子的内部结构
- QCD相变（解禁闭、手征）

QCD在低能区
不能微扰求解



量子色动力学（QCD）

- 作用量：

$$S_{QCD} = \int d^4x \left\{ -\frac{1}{4} F^a_{\mu\nu} F^{\mu\nu a} + \sum_{f=1}^{n_f} \bar{\psi}_f (i\gamma^\mu D_\mu - m_f)\psi_f \right\}$$

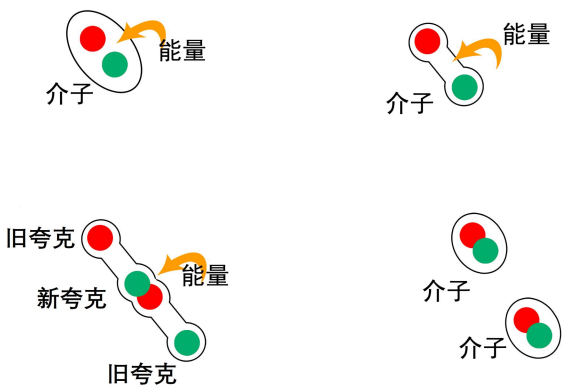
  这里f是夸克的味道，夸克场的自旋和色指标没有显式写出来。$D_\mu = \partial_\mu - igA_\mu$。
- 单独考虑QCD，n_f个夸克质量是自由参数。另外还有一个参数是耦合常数g。
- 要和物理世界做比较，我们需要先确定$n_f + 1$个自由参数。
- 夸克被禁闭在强子里，因此夸克质量是通过强子的物理质量来确定的。

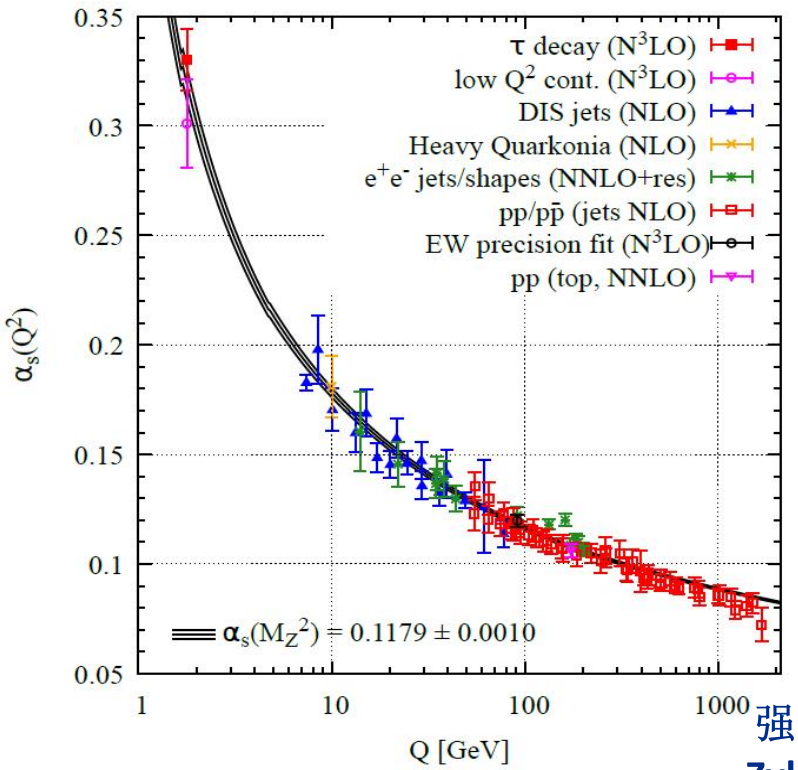
- **高能实验和微扰计算告诉我们，QCD是描写夸克、胶子间强相互作用的正确理论（比如SLAC的深度非弹实验和理论计算的对比）**

QCD的非微扰特性

- 强子(介子和重子)都是色荷中性的，目前实验没直接观测到带色荷的自由粒子
- 耦合系数随能标的跑动(最低阶计算)：

$$\alpha_s(Q) = \frac{4\pi}{b_0 \ln\left(Q^2/\Lambda_{QCD}^2\right)}$$





- $b_0 = 11 - 2N_f/3$
- $\Lambda_{QCD} \approx 0.3\ \mathrm{GeV}$
- 低能标下，$\alpha_s(Q) \geq 1$
- 不能做微扰展开计算
- 质子质量大概为1 GeV
- 如何将强子与QCD的基本自由度夸克、胶子联系起来?

强相互作用跑动耦合常数

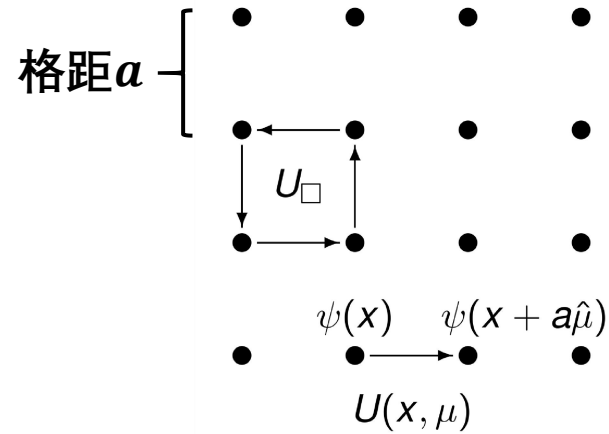
Zyla et al. (PDG), PTEP2020, 083C01

格点QCD

- 1973, K. G. Wilson
- 1979, M. Creutz

[Wilson, Phys. Rev. D **10**, 2445]

$$\langle 0|\psi(x)\bar{\psi}(y)|0\rangle = \frac{\int DA_\mu D\bar{\psi}D\psi\,\psi(x)\bar{\psi}(y)e^{i\int \mathcal{L}_{QCD}\,d^4x}}{\int DA_\mu D\bar{\psi}D\psi\, e^{i\int \mathcal{L}_{QCD}\,d^4x}}$$



- **基于4维欧氏空间路径积分的数值模拟**

关联函数的计算

$$\langle O\rangle = \frac{\int DA_\mu D\bar{\psi}D\psi\, O[A,\bar{\psi},\psi]e^{-\int \mathcal{L}_{QCD}\,d^4x}}{\int DA_\mu D\bar{\psi}D\psi\, e^{-\int \mathcal{L}_{QCD}\,d^4x}}$$

$$\mathcal{L}_{QCD} = \bar{\psi}M[A]\psi + \mathcal{L}_G, \qquad M = \gamma\cdot D + m_q$$

规范场 A_μ 放在格点之间的链接上，保证规范不变性

链接变量 $U(x,\mu) = e^{igaA_\mu(x)}$

- **完成费米子场的积分后:**

$$\langle O(U,\bar{\psi},\psi)\rangle = \frac{\int DU_\mu O[U,M^{-1}[U]]\mathrm{Det}[M[U]]e^{-S_G}}{\int DU_\mu \mathrm{Det}[M[U]]e^{-S_G}}$$

- M的维度$\sim\mathcal{O}(10^7)$：

  $L^3 \times T \times N_{\mathrm{color}} \times N_{\mathrm{spin}}$

- 双精度保存完整的M^{-1}

  需要磁盘空间 $\gtrsim$ 1 PB

  （$32^3 \times 64$大小的格子）

格点QCD

$$\langle O\rangle = \frac{\int DU_\mu O[U, M^{-1}[U]]\mathrm{Det}[M[U]]e^{-S_G}}{\int DU_\mu \mathrm{Det}[M[U]]e^{-S_G}} \sim \frac{\int dx\, f(x)\, \rho(x)}{\int dx\, \rho(x)}$$

- 巨大的高维积分，无法直接计算

按几率分布产生U（组态）

$P[U] \propto \mathrm{Det}[M[U]]e^{-S_G}$

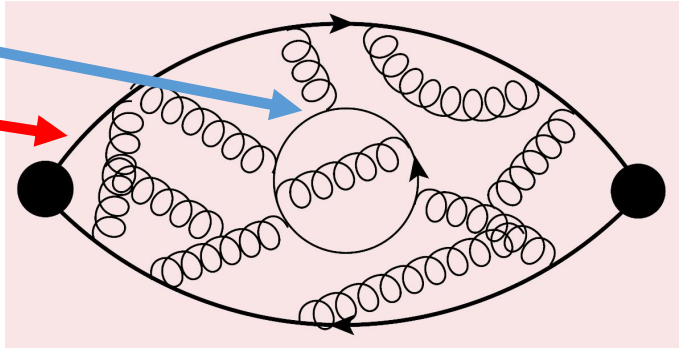
对规范场的路径积分变为对组态的统计平均

$$\langle O\rangle = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} O_i$$

统计误差：N有限

- 用重点抽样产生组态：gluon fields U (**最耗费机时的部分**)
- 海夸克效应 $\mathrm{Det}[M[U]]$
- 价夸克传播子 $M^{-1}[U]$
- 计算价夸克传播子和强子关联函数

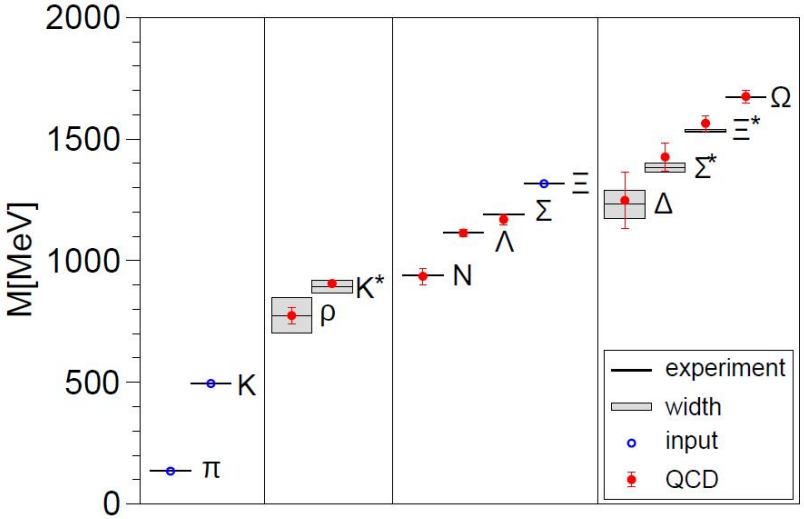
  很耗费机时, **需要大量硬盘空间**
- 数据分析和拟合：给出强子质量及矩阵元
- 输入若干实验测量值，确定理论自由参数：格距 a 和夸克质量 m_q， 预言其他物理结果



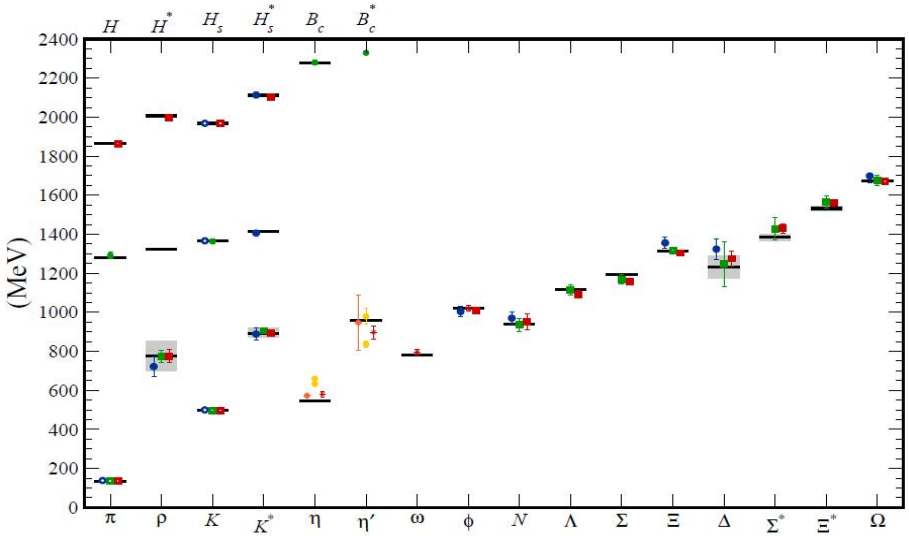
介子两点关联函数

LQCD研究内容

- 强子谱：质子、π介子质量，Zc(3900,4020,4025)，中子质子质量差...



Science 2008, BMW



MILC,PACS-CS,BMW,RBC-UKQCD……,arXiv:1203.1204

- 强子结构：分布函数、质子自旋，强子质量来源，...
- 标准模型参数和重整化：夸克质量，强耦合常数，...
- 有限温度和有限密度：手征相变，退禁闭相变，强磁场下物质性质，...
- 弱衰变和强子矩阵元：CKM矩阵元，介子衰变常数，形状因子，...

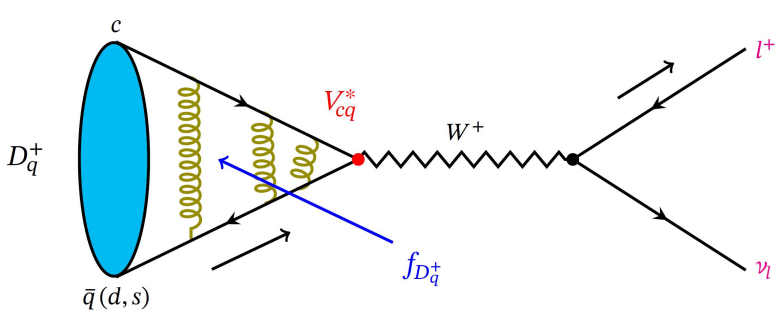
粲物理与LQCD

- LQCD can calculate form factors and meson decay constants appearing in weak decays of hadrons
- Combined with experiments, they can give us CKM matrix elements
- Test the SM (is CKM unitary?)
- Or use V_{ab} from elsewhere to compare QCD/SM results with experiments

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Cabibbo-Kobayashi-Maskawa(CKM)矩阵

$$\begin{pmatrix} \mathbf{V_{ud}} & \mathbf{V_{us}} & \mathbf{V_{ub}} \\ \pi \to \ell\nu & K \to \ell\nu & B \to \pi\ell\nu \\ & K \to \pi\ell\nu & \\ \mathbf{V_{cd}} & \mathbf{V_{cs}} & \mathbf{V_{cb}} \\ D \to \ell\nu & D_s \to \ell\nu & B \to D\ell\nu \\ D \to \pi\ell\nu & D \to K\ell\nu & B \to D^*\ell\nu \\ \mathbf{V_{td}} & \mathbf{V_{ts}} & \mathbf{V_{tb}} \\ B_d \leftrightarrow \overline{B}_d & B_s \leftrightarrow \overline{B}_s & \end{pmatrix}$$



courtesy arXiv:2103.00908

抽取CKM矩阵元　　衰变常数可由LQCD给出

实验测量

$$\Gamma(P \to \ell\nu) = \frac{G_F^2 |V_{q_1 q_2}|^2}{8\pi} f_P^2 m_\ell^2 M_P (1 - \frac{m_\ell^2}{M_P^2})^2$$

粲介子衰变常数

- $f_{D_{(s)}^{(*)}}$: $\langle 0|\bar{q}(0)\gamma_\mu\gamma_5 c(0)|P(p)\rangle = if_P p_\mu$, $\quad q = d, s$

$$\langle 0|\bar{q}(0)\gamma^\mu q'(0)|V(p,\lambda)\rangle = f_V m_V e_\lambda^\mu$$

- f_V^T/f_V(**$\overline{\text{MS}}$, 2 GeV**) $\quad \langle 0|\left(\bar{q}(0)\sigma^{\mu\nu}q'(0)\right)(\mu)|V(p,\lambda)\rangle = if_V^T(\mu)(e_\lambda^\mu p^\nu - e_\lambda^\nu p^\mu)$

（需要张量流重整化常数$Z_T^{\overline{\text{MS}}}$）

$$\Gamma_{(D_s^*\to\ell\nu)} = \frac{G_F^2}{12\pi}|V_{cs}|^2 f_{D_s^*}^2 M_{D_s^*}^3\left(1-\frac{m_\ell^2}{M_{D_s^*}^2}\right)^2\left(1+\frac{m_\ell^2}{2M_{D_s^*}^2}\right)$$

Br $= 3.4(1.4)\times 10^{-5}$ [HPQCD, PRL 112, 212002 (2014)]

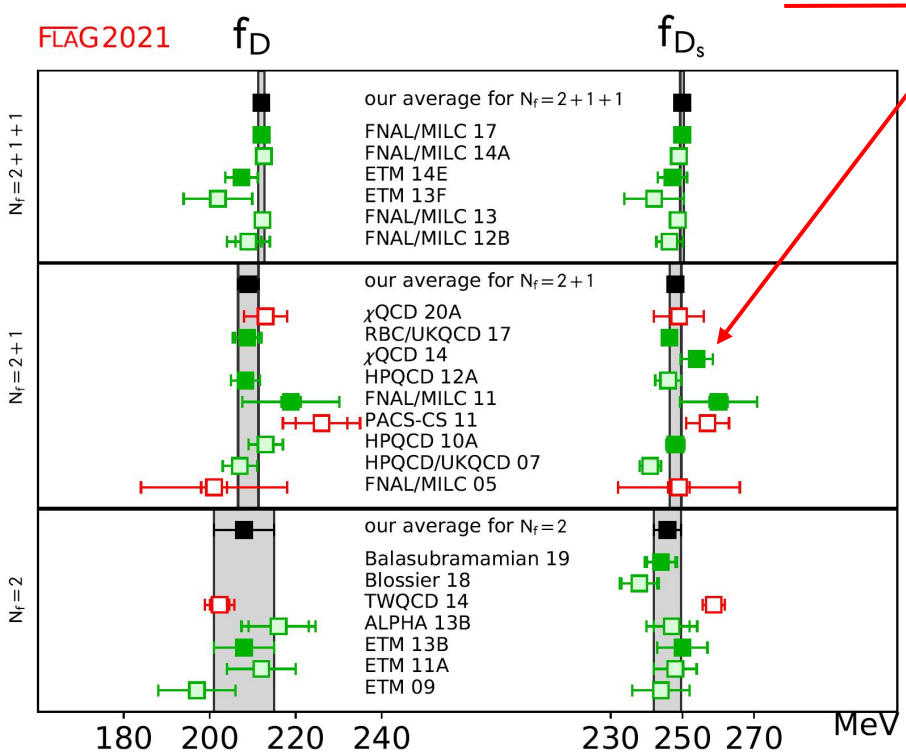
- **Determine CKM elements**
- f_V **not easy to be measured**
  - **Leptonic decay branching ratios are small; $D_s^* \to l\nu$ reported by BESIII (PRL131.141802(2023))**
- **Test the accuracy of Heavy Quark Effective Theory: $f_V/f_P = 1 + \mathcal{O}(1/m_Q)$**
- f_V^T/f_V **for D^* and D_s^* are inputs for LCSR in calculations of $B \to V$ form factors at low q^2**
- **Input parameters for QCD factorization in studies of nonleptonic B decays, e.g., $B \to D^{(*)}M$**

f_D、f_{D_s}格点QCD结果

- 赝标粲介子衰变常数的LQCD计算精度已达到1%或更高, 例如f_{D_s}
- 矢量介子衰变常数的计算相对匮乏

[22] chiQCD, 1410.3343, PRD92.034517.2015

Collaboration	Ref.	N_f	pt	co	ch	fin	re	he	f_D	f_{D_s}
χQCD 14	[22]	2+1	A	○	○	○	★	✓		254(2)(4)



FLAG Review 2021, [arXiv:2111.09849]

- $N_f = 2+1$:
  $f_{D_s} = 248.0(1.6)$ MeV
  $f_D = 209.0(2.4)$ MeV
- $N_f = 2+1+1$:
  $f_{D_s} = 249.9(0.5)$ MeV
  $f_D = 212.0(0.7)$ MeV
- PDG2016 (CPC40):
  $f_{D_s^+}^{exp} = 257.8(4.1)$ MeV
- 格点结果与实验在2σ之内一致
- PDG2020 [PTEP2020.083C01]:
  $f_D|V_{cd}| = 46.2(1.2)$ MeV
  $f_{D_s}|V_{cs}| = 245.7(4.6)$ MeV

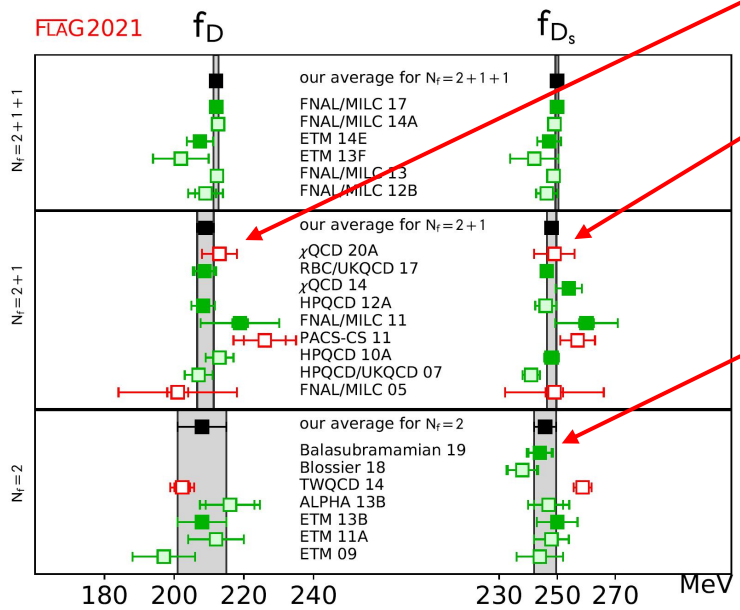
BESIII结果：$f_{D_s} = 251.1(2.4)(3.0)$ MeV [PRL127.171801.2021]

赝标粲介子衰变常数

[480] chiQCD, Y. Chen, ..., ZL et al., CPC 45, 023109 (2021)

Collaboration	Ref.	N_f	pu.	co.	ch.	fin.	rel.	hev.	f_D	f_{D_s}	f_{D_s}/f_D
χQCD 20A††	[480]	2+1	A	■	★	★	★	✓	213(5)	249(7)	1.16(3)

a~0.11 fm



FLAG Review 2021, Eur. Phys. J. C (2022) 82, 869

- 也给出了矢量介子D_s^*、D^*以及ϕ的衰变常数
- a~0.08 fm 的计算正在整理论文

  李东浩, 王庭霄 et al., to appear

Balasubramamian and Blossier, Eur. Phys. J. C 80 (2020) 412 [1912.09937]，增加一个格距，更新2018年的结果

- **2021年之后的格点QCD计算**

A. Bussone et al. (Alpha Collab.), 2309.14154

2+1 味， twisted mass fermion on improved Wilson fermion

$$f_D = 211.3(1.9)(0.6)\ \text{MeV}$$
$$f_{D_s} = 247.0(1.9)(0.7)\ \text{MeV}$$
$$f_{D_s}/f_D = 1.177(15)(5)$$

S. Kuberski et al. (RQCD & Alpha), 2405.04506

2+1 味， improved Wilson fermion

$$f_D = 208.4(1.5)\ \text{MeV}$$
$$f_{D_s} = 246.8(1.3)\ \text{MeV}$$
$$f_{D_s}/f_D = 1.1842(36)$$

BESIII结果包括：$f_{D_s} = 251.1(2.4)(3.0)$ MeV [PRL127.171801.2021]

$f_{D_s^+} = 255.0(4.0)(3.2)(1.0)$ MeV [PRR108.092014.2023]

矢量粲介子衰变常数f_{D^*}和$f_{D_s^*}$

	D^*	D_s^*	ϕ
f_M/MeV	234(3)(5)	274(5)(5)	241(9)(2)
f_V^T/f_V	0.91(3)(2)	0.92(3)(2)	

Y. Chen, ..., ZL et al., Chin. Phys. C45, no.4 (2021), arXiv:2008.05208

Heavy quark symmetry breaking (~10%)

$f_V/f_{PS} = 1 + O(1/m_Q)$

f_{D^*}/f_D = 1.10(2)(2)

$f_{D_s^*}/f_{D_s}$ = 1.10(3)(2)

SU(3) flavor symmetry breaking (~17%)

$f_{D_s}/f_D = 1.163(14)(23)$

$f_{D_s^*}/f_{D^*} = 1.17(2)(2)$

- **First LQCD results for $f^T_{D^*_{(s)}}/f_{D^*_{(s)}}$**
- **Dominant errors from Z-factors (~3%) and finite a (~2%)**

- **提高重正化常数的精度**

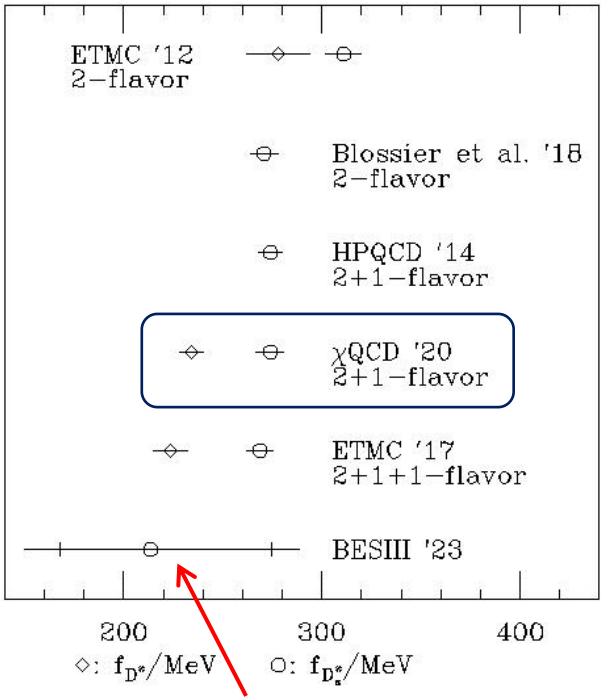
F. He, ..., ZL et al., 2204.09246, PRD106.114506

Y. Bi, ..., ZL et al., 2302.01659, PRD108.054506

相对误差

$Z_S^{\overline{MS}}$(2 GeV)= 1.009(16) **1.6%** （2014年：2.3%）

$Z_T^{\overline{MS}}$(2 GeV)= 1.157(11) **1.0%** （2018年：2.9%）



BESIII对$D_s^{*+} \to e^+\nu_e$的首个测量结果[2304.12159, PRL]

粲介子衰变常数

李东浩, ..., 王庭霄 et al., to appear

$1/a$ (GeV)	Label	am_l/am_s	Volume	$N_{\rm conf} \times N_{\rm src}$
2.383(9)	f004	0.004/0.03	$32^3 \times 64$	628×1
	f006	0.006/0.03	$32^3 \times 64$	42×16
	f008	0.008/0.03	$32^3 \times 64$	49×16

RBC-UKQCD，2+1味组态

- 费米子作用量：overlap（价夸克）+ domain wall（海夸克）
- 格子大小：$32^3 \times 64$，L~2.7 fm，a~0.08 fm
- 海夸克质量：$am_l = 0.004/0.006/0.008$，($m_\pi^{\rm sea} \approx 302, 360, 412$ MeV)

  $am_s = 0.03$
- 价夸克质量：$am_{u/d} = 0.0046, \ldots, 0.024$（$m_\pi \approx 220, \ldots, 500$ MeV）（10个）

  $am_s = 0.037, 0.040, 0.043, 0.046, 0.049, 0.052$（6个）

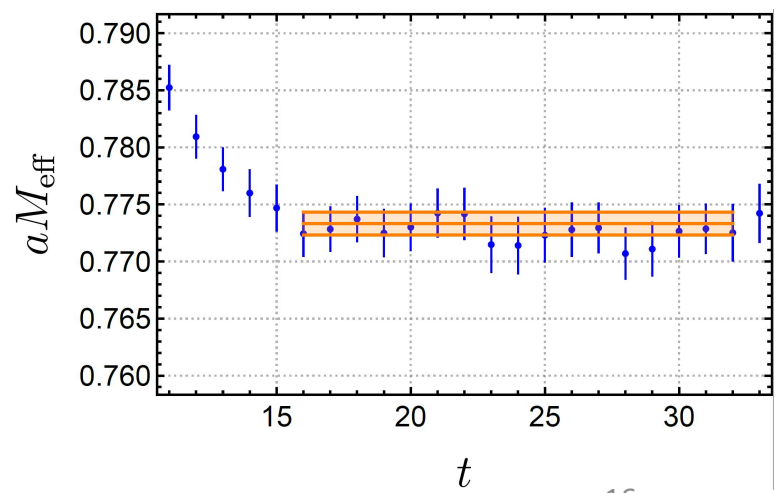
  $am_c = 0.450, 0.492, 0.500, 0.550$（4个）
- 输入参数：$m_\pi^2 \Rightarrow m_{u/d}$，$m_{ss}^2 \equiv 2m_K^2 - m_\pi^2 \Rightarrow m_s$，$m_{J/\psi} \Rightarrow m_c$

$$m_{D_s^*}(m_s, m_c, m_l^{\rm sea}) = m_{D_s^*}^{\rm phy} + b_2 \Delta m_{ss}^2 + b_3 \Delta m_{J/\psi} + b_5 \Delta m_\pi^2({\rm sea})$$

$$\Delta m_{ss}^2 \equiv m_{ss}^2 - m_{ss}^2({\rm phy}), \quad \Delta m_{J/\psi} \equiv m_{J/\psi} - m_{J/\psi}({\rm phy})$$

$$\Delta m_\pi^2({\rm sea}) \equiv m_\pi^2({\rm sea}) - m_\pi^2({\rm sea, phy})$$

m_{D_s}拟合结果及质量平台

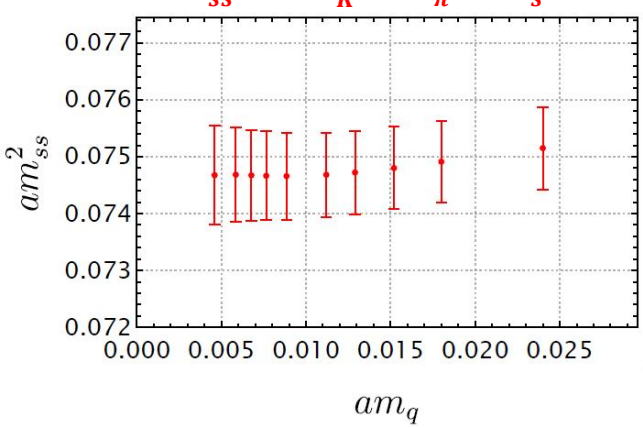


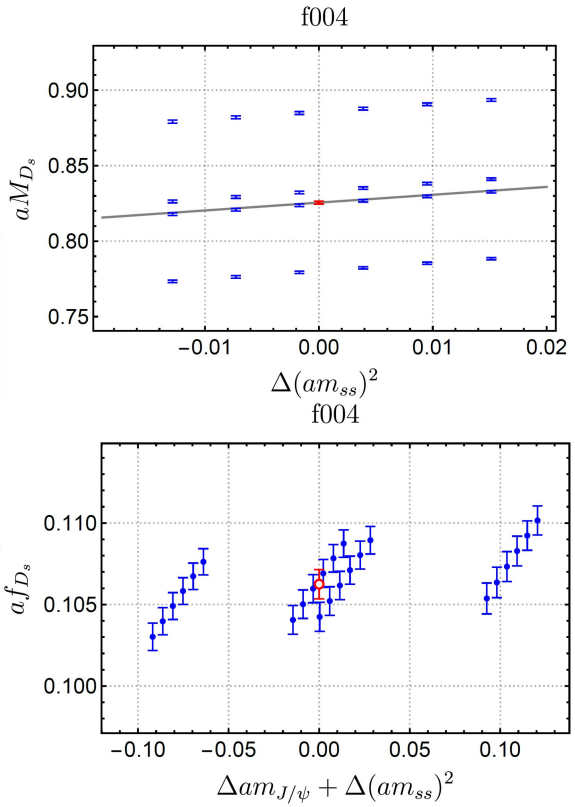
内插/外推到物理质量点

$$(X = m, f_P, f_V, f_V^T)$$

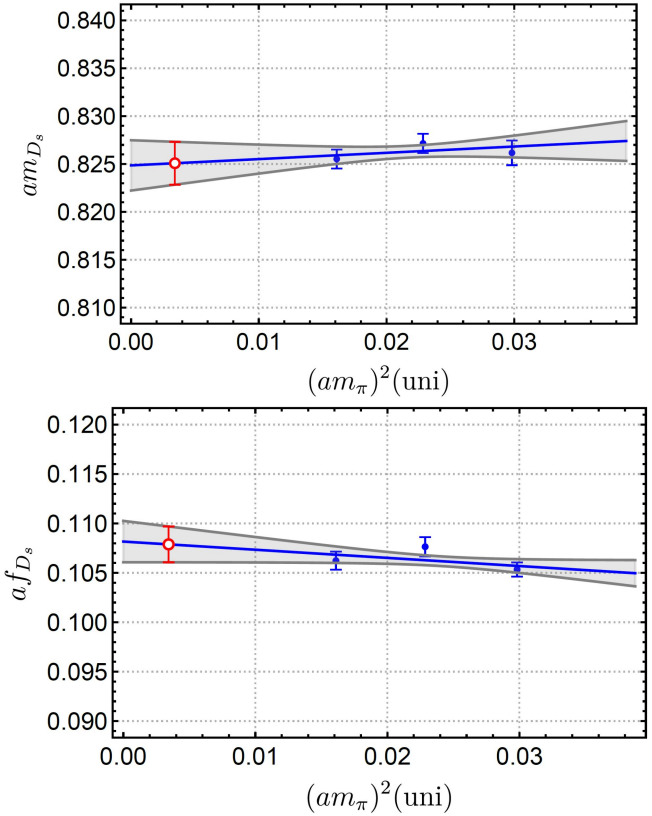
$$X_{D_s^{(*)}}(m_s, m_c, m_l^{\mathrm{sea}}) = X^{\mathrm{phy}}_{D_s^{(*)}} + b_2 \Delta m_{ss}^2 + b_3 \Delta m_{J/\psi} + b_5 \Delta m_\pi^2(\mathrm{sea})$$

$$m_{ss}^2 \equiv 2m_K^2 - m_\pi^2 \propto m_s$$





价夸克质量内插



轻海夸克质量外推

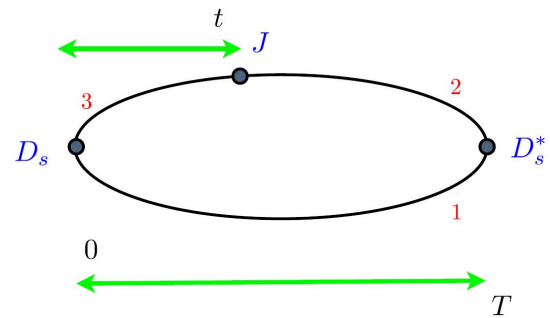
D_s^*辐射衰变

HPQCD, PRL 112, 212002 (2014)

$$Z\langle D_s^*(p',\varepsilon)|\mathcal{V}^\mu|D_s(p)\rangle = \frac{2\epsilon^{\mu\alpha\beta t}}{m_{D_s}+m_{D_s^*}}\varepsilon^*_\alpha p_\beta p'_t V(q^2)$$

$$\Gamma_{(D_s^*\to D_s\gamma)} = \alpha_{\rm QED}\frac{4|\vec{q}|^3}{3(M_{D_s}+M_{D_s^*})^2}\frac{|V_s(0)-2V_c(0)|^2}{9}$$

$$= 0.066(26)\ \text{keV}$$



$D_s^* \to D_s\gamma$三点关联函数

由$D_s^* \to D_s\gamma$分支比的实验值94.2(7)%　BABAR, PRD72.091101(2005)

给出D_s^*总宽度：0.070(28) keV

$$\Gamma_{(D_s^*\to\ell\nu)} = \frac{G_F^2}{12\pi}|V_{cs}|^2 f_{D_s^*}^2 M_{D_s^*}^3\left(1-\frac{m_\ell^2}{M_{D_s^*}^2}\right)^2\left(1+\frac{m_\ell^2}{2M_{D_s^*}^2}\right)$$

$f_{D_s^*} = 274(6)$ MeV ⟹ $\Gamma_{D_s^*\to l\nu} = 2.4(1)\times 10^{-6}$ keV ⟹ Br $= 3.4(1.4)\times 10^{-5}$

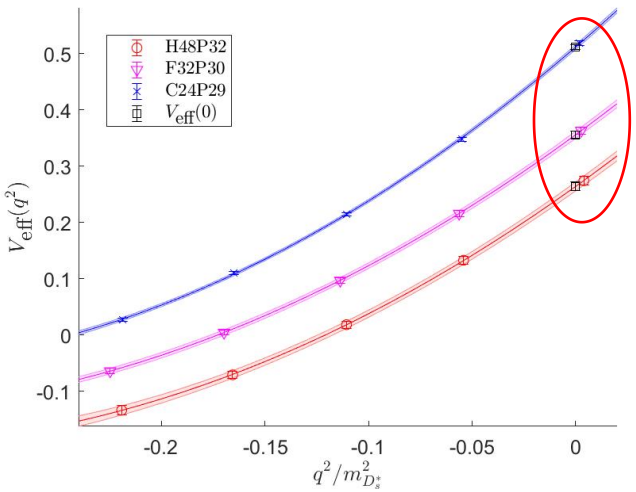
$D_s^* \to l\nu\ (l = e,\mu)$分支比实验测量，结合总宽度及$|V_{cs}|$，可给出衰变常数$f_{D_s^*}$

D_s^*辐射衰变

孟雨 et al., arXiv:2401.13475 (PRD109.074511)

$$\langle D_s(p)|J_\nu^{\rm em}(0)|D_{s,\mu}^*(p')\rangle = \frac{2V_{\rm eff}(q^2)}{m_{D_s}+m_{D_s^*}}\epsilon_{\mu\nu\alpha\beta}p_\alpha p'_\beta$$

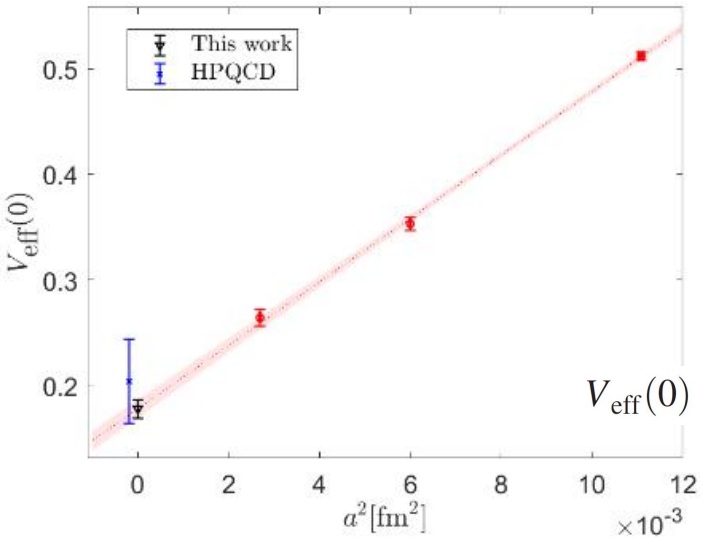
$$\Gamma(D_s^*\to\gamma D_s) = \frac{4}{3}\frac{\alpha(\delta m)^3}{(m_{D_s}+m_{D_s^*})^2}|V_{\rm eff}(0)|^2$$



$$V_{\rm eff}(q^2) = d_0 + d_1\cdot\frac{q^2}{m_{D_s^*}^2} + d_2\cdot\frac{q^4}{m_{D_s^*}^4} + \mathcal{O}(q^6/m_{D_s^*}^6)$$

Ensemble	C24P29	C32P30	C48P32
a(fm)	0.10530(18)	0.07746(18)	0.05187(26)
$a\mu_s$	−0.2400	−0.2050	−0.1700
$a\mu_c$	0.4479	0.2079	0.0581
$L^3\times T$	$24^3\times 72$	$32^3\times 96$	$48^3\times 144$
$N_{\rm cfg}\times N_{\rm src}$	450×72	377×96	306×72
m_π(MeV)	292.7(1.2)	303.2(1.3)	317.2(0.9)
$m_{J/\psi}$(MeV)	3098.6(0.3)	3094.9(0.4)	3096.5(0.3)

CLQCD，2+1味组态



$$V_{\rm eff}(0) = 0.178(9)$$

$$\Gamma(D_s^*\to\gamma D_s) = 0.0549(54)\ \text{keV}$$

D_s^*总宽度及纯轻衰变

HPQCD给出D_s^*总宽度：0.070(28) keV

以及 Br($D_s^* \to l\nu$) $= 3.4(1.4) \times 10^{-5}$

(PRL112, 212002 (2014))

$\Gamma(D_s^* \to \gamma D_s) = 0.0549(54)$ keV

$D_s^* \to D_s\gamma$分支比的实验值93.5(7)% PDG

D_s^*总宽度：0.0587(54) keV

$D_s^* \to l\nu$ $(l = e, \mu)$分支比实验测量，结合总宽度，可给出$f_{D_s^*}|V_{cs}|$

BESIII对$D_s^{*+} \to e^+\nu_e$分支比的首个测量结果：

[2304.12159, PRL131.141802(2023)]

$$(2.1^{+1.2}_{-0.9}{}_{\text{stat}} \pm 0.2_{\text{syst}}) \times 10^{-5}$$

- BESIII + HPQCD

$$f_{D_s^*}|V_{cs}| = (207.9^{+59.4}_{-44.6}{}_{\text{stat.}} \pm 9.9_{\text{syst. exp}} \pm 41.5_{\text{syst. latt}})\ \text{MeV}$$

- BESIII + this work

$$f_{D_s^*}|V_{cs}| = (190.5^{+55.1}_{-41.7}{}_{\text{stat.}} \pm 9.1_{\text{syst. exp}} \pm 8.7_{\text{syst. latt}})\ \text{MeV}$$

(李东浩 et al., to appear) + (this work)

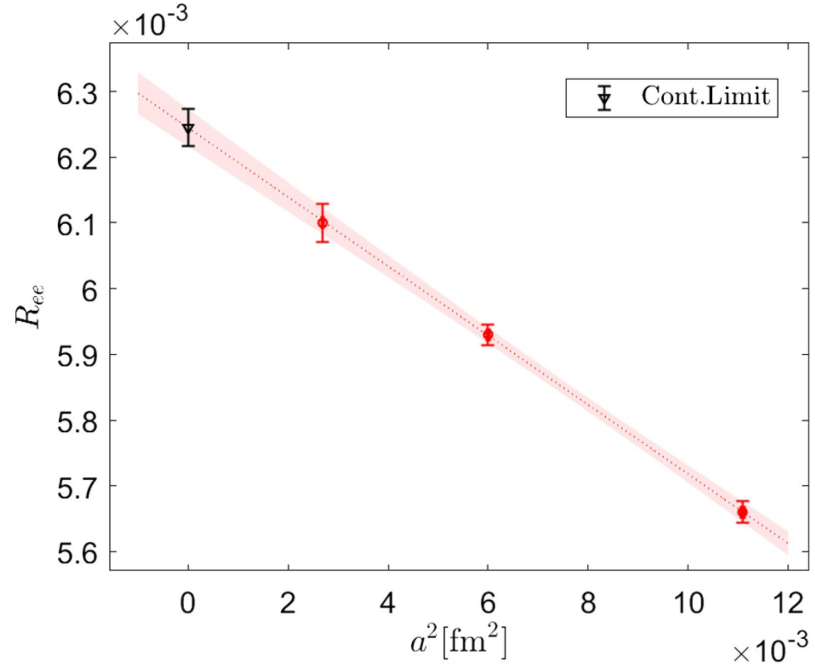
$f_{D_s^*} = 280(11)$ MeV → $\Gamma_{D_s^* \to l\nu} = 2.5(2) \times 10^{-6}$ keV → Br $= 4.26(52) \times 10^{-5}$

$D_s^* \to D_s e^+ e^-$

$$R_{ee} = \frac{\Gamma(D_s^* \to D_s e^+ e^-)}{\Gamma(D_s^* \to D_s \gamma)}$$
$$= \frac{\alpha}{3\pi} \int \frac{dq^2}{q^2} \left| \frac{V_{\rm eff}(q^2)}{V_{\rm eff}(0)} \right|^2 \left(1 - \frac{4m_e^2}{q^2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{2m_e^2}{q^2}\right)$$
$$\times \left[\left(1 + \frac{q^2}{m_{D_s^*}^2 - m_{D_s}^2}\right)^2 - \frac{4m_{D_s^*}^2 q^2}{(m_{D_s^*}^2 - m_{D_s}^2)^2} \right]^{\frac{3}{2}}$$

PDG: $R_{ee} = 0.67(16)\%$

$V_{\rm eff}(q^2) \Rightarrow R_{ee}$



- 连续极限结果：

$$R_{ee} = \frac{\Gamma(D_s^* \to D_s e^+ e^-)}{\Gamma(D_s^* \to D_s \gamma)} = 0.624(3)\%$$

CLQCD
第四届中国格点量子色动力学研讨会
2024.10.11-15 湖南·长沙
https://indico.ihep.ac.cn/event/22108/

会议信息

- 会议网站：**https://indico.ihep.ac.cn/event/22108/**
- 会议组委会：陈莹、丁亨通、冯旭、宫明、桂龙成、梁剑、刘川、刘柳明、刘朝峰、孙鹏、王伟、吴佳俊、杨一玻、张建辉
- 会议联系人：桂龙成 **18684752903 (guilongcheng@hunnu.edu.cn)**
- 会议报到：通程麓山大酒店一楼大厅
- 会议厅：通程麓山大酒店湘江厅

总结

- 粲物理格点QCD计算有助于理解QCD、精确检验标准模型
- 衰变常数：$D_{(s)}^{(*)}$、J/ψ、η_c 李东浩 et al., to appear
- 辐射衰变：$D_s^* \to D_s\gamma$ 孟雨 et al., arXiv:2401.13475 (PRD109.074511)

→
- 更多夸克质量点
- 更多格距
- 更多过程

谢谢！