格点QCD与高精度前沿

冯旭

北京大学 物理学院

2021年10月30日



Science: 全世界最前沿的125个科学问题



- 32、正物质为何多于反物质?
- 33、质子会衰减吗?
- 34、重力的本质是什么?
- 35、时间为何不同于其他维度?
- 36、 是否存在比夸克更小的基本粒子?

1 /25

37、中微子是其自己的反粒子吗?

高能物理的三大前沿



- ▶ 宇宙学前沿(Cosmic frontier)——通过天文学、宇宙学手段探测暗物质、暗能量和新粒子
- ▶ 高能量前沿(High-energy frontier)——增加对撞机能量,直接产生新粒子
- ▶ 高精度前沿(High-intensity frontier)——精确实验测量,寻找实验与理论预言的差别

需要从标准模型出发,做出高精度理论预言





▶ 禁戒与稀有过程







3/25



STCF

高精度前沿寻找新物理——中小型实验装置



4 /25

缪子 0.1 GeV K介子 0.5 GeV 核子 0.94 GeV 📂 低能强相互作用贡献显著

低能强相互作用与格点QCD







实验测量

理论预言

缪子反常磁矩的格点计算

PHYSICAL REVIEW LETTERS 124, 132002 (2020)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

Hadronic Light-by-Light Scattering Contribution to the Muon Anomalous Magnetic Moment from Lattice QCD

Thomas Blum,^{1,2} Norman Christ,³ Masashi Hayakawa,^{4,5} Taku Izubuchi,^{6,2} Luchang Jin[®],^{1,2,*} Chulwoo Jung,⁶ and Christoph Lehner^{7,6} ¹Physics Department, University of Connecticut, 2152 Hillside Road, Storrs, Connecticut 06269-3046, USA ²RIKEN BNL Research Center, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973, USA ³Physics Department, Columbia University, New York, New York 10027, USA ⁴Department of Physics, Nagoya University, Nagoya 464-8602, Japan ⁵Nishina Center, RIKEN, Wako, Saitama 351-0198, Japan ⁶Physics Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973, USA ⁷Universität Regensburg, Fakultät für Physik, 93040 Regensburg, Germany

Received 18 December 2019; accepted 27 February 2020; published 1 April 2020)



靳路昶 (U. Conn.)

- ▶ 首个Hadronic Light-by-Light Scattering 的格点计算
- ▶ 2019年Kenneth G. Wilson Lattice Award; 2020年 DOE Early Career Award

更多细节,请参考靳路昶教授周二上午9点的报告

• Charm Quark Physics: an ideal place to test SM



$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$
 Second row:
$$\begin{aligned} |V_{cd}| &= 0.221 \pm 0.004 \\ |V_{cs}| &= 0.987 \pm 0.011 \\ |V_{cb}| &= 0.0410 \pm 0.0014 \end{aligned}$$

PDG2021
$$10^{-2} \ accuracy \qquad |V_{cd}|^2 + |V_{cs}|^2 + |V_{cb}|^2 = 1.025 \pm 0.022 \end{aligned}$$

High precision determination of the second row provide strong tests of CKM unitarity.

重味物理(I): Ec Decays on the Lattice

-Predicted decay branching fractions:

$$\begin{aligned} \mathscr{B} \left(\Xi_c^0 \to \Xi^- e^+ \nu_e \right) &= 2.38(0.30)(0.32)(0.07) \% \\ \mathscr{B} \left(\Xi_c^0 \to \Xi^- \mu^+ \nu_\mu \right) &= 2.29(0.29)(0.30)(0.06) \% \\ \mathscr{B} \left(\Xi_c^+ \to \Xi^0 e^+ \nu_e \right) &= 7.18(0.90)(0.96)(0.20) \% \\ \mathscr{B} \left(\Xi_c^+ \to \Xi^0 \mu^+ \nu_\mu \right) &= 6.91(0.87)(0.91)(0.19) \% \end{aligned}$$

-Compare with PDG, experiment and theory:

Zhang, Hua, et.al., 2103.07064

- Statistical errors
- Systematic errors from continuum extrapolation
- Systematic errors from renormalization

 $(2.38 \pm 0.44)\%$

PDG $\mathscr{B}(\Xi_c^0 \to \Xi^- e^+ \nu_e) = (1.8 \pm 1.2) \%$

Belle $\mathscr{B}(\Xi_c^0 \to \Xi^- e^+ \nu_e) = (1.72 \pm 0.10 \pm 0.12 \pm 0.50) \%$

ALICE $\mathscr{B}(\Xi_c^0 \to \Xi^- e^+ \nu_e) = (2.43 \pm 0.25 \pm 0.35 \pm 0.72) \%$

- **QCD SR** $\mathscr{B}\left(\Xi_c^0 \to \Xi^- e^+ \nu_e\right) = (3.4 \pm 1.7) \%$
- **LF QM** $\mathscr{B}(\Xi_c^0 \to \Xi^- e^+ \nu_e) = (3.49 \pm 0.95) \%$
- LCSR $\mathscr{B}(\Xi_c^0 \to \Xi^- e^+ \nu_e) = (2.4^{+0.9}_{-1.0}) \%$

Fitted well with all

data (within 1- σ) !

重味物理(I): Ec Decays on the Lattice



更多细节,请参考王伟教授周日下午2点的报告

D meson decay constants

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

- $f_{D_{(s)}^{(*)}}$ and their ratios (f_{ϕ} also computed)
 - $\langle 0 | \overline{q}(0) \gamma_{\mu} \gamma_{5} c(0) | P(p) \rangle = i f_{P} p_{\mu}, \qquad q = d, s$ $\langle 0 | \overline{q}(0) \gamma^{\mu} q'(0) | V(p, \lambda) \rangle = f_{V} m_{V} e_{\lambda}^{\mu}$

2+1-flavor

calculation

- $f_V^T/f_V(\overline{MS}, 2 \text{ GeV}) \langle 0| (\bar{q}(0)\sigma^{\mu\nu}q'(0))(\mu)|V(p,\lambda)\rangle = i f_V^T(\mu) (e_\lambda^\mu p^\nu e_\lambda^\nu p^\mu)$ $\dot{\eta}$ $\dot{\eta}$ $\dot{\mu}$ $\dot{\eta}$ $\dot{\mu}$ $\dot{\eta}$ $\dot{\eta}$ $\dot{\mu}$ $\dot{\eta}$ $\dot{\mu}$ $\dot{\eta}$ $\dot{\eta}$ $\dot{\mu}$ $\dot{\eta}$ $\dot{\eta}$
- Determine CKM elements
- Test the accuracy of HQET: $f_V/f_{PS} = 1 + O(1/m_Q)$
- 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
- Inputs for QCD factorization in studies of nonleptonic *B* decays, e.g., $B \rightarrow D^{(*)}M$

重味物理(II): D meson decay constants

Results

	D	D *	D _s	D [*] _s	ϕ	ETMC '12	↓ · · · · ·	0-
<i>f_M</i> /MeV	213(2)(4)	234(3)(5)	249(5)(5)	274(5)(5)	241(9)(2)	2-114001		
f_V^T/f_V		0.91(3)(2)		0.92(3)(2)			-0	Blossier et a 2-flavor

- *f_D* agrees with FLAG2019 (2+1-flavor): 209.0(2.4) MeV
- First lattice QCD results for $f_{D_{(s)}^*}^T / f_{D_{(s)}^*}$
- Heavy quark symmetry breaking (~10%)
- SU(3) flavor symmetry breaking (~17%)



12/25

更多细节,请参考刘朝峰研究员周二上午11点的报告

最新进展——重味物理(III)

• Charmonium radiative decays





孟雨(北大)

更多细节,请参考孟雨博士周二上午10点半的报告

13 /25

最新进展——Neutron electric dipole moment

14 /25



更多细节,请参考梁剑研究员周一上午11点的报告

新的机遇和挑战

高阶电磁修正

Flavor Lattice Averaging Group



	N_f	FLAG average	Frac. Err.
$f_{\rm K}/f_{\pi}$	2 + 1 + 1	1.1932(19)	0.16%
$f_{+}(0)$	2 + 1 + 1	0.9706(27)	0.28%
f_D	2 + 1 + 1	212.0(7) MeV	0.33%
f_{D_s}	2 + 1 + 1	249.9(5) MeV	0.20%
f_{D_s}/f_D	2 + 1 + 1	1.1783(16)	0.13%
f_B	2 + 1 + 1	190.0(1.3) MeV	0.68%
f_{B_s}	2 + 1 + 1	230.3(1.3) MeV	0.56%
f_{B_s}/f_B	2 + 1 + 1	1.209(5)	0.41%



精度优于1% ⇒ 需要加入电磁相互作用效应 ⇒ QCD 中的电磁修正:新的格点研究前沿

注: Flavor Lattice Averaging Group 类似于 Particle Data Group

新的机遇和挑战

以稀有K介子衰变和中性K介子混合为例



 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$

产率1.73^{+1.15}×10⁻¹⁰



 $K^0 - \overline{K}^0$ 混合 $\Delta M_K = 3.483(6) \times 10^{-12} \text{ MeV}$

均是高阶电弱过程 -> 标准模型贡献被高阶压低

高精度前沿寻找新物理的理想场所

一些新的尝试(I)

四费米子末态纯轻衰变

Channel	Exp/10 ⁻⁸
$K \to e \nu_e e^+ e^-$	2.91(23)[2]
$K \to \mu \nu_{\mu} e^+ e^-$	7.93(33)[2]
$K \to e \nu_e \mu^+ \mu^-$	1.72(45)[3]
$K \to \mu \nu_{\mu} \mu^{+} \mu^{-}$	<41





脱心宇 (北大)

X.-Y. Tuo, XF, L.-C. Jin, T. Wang , arXiv:2103.11331

提出不依赖于形状因子参数化的计算方案 解决轻中间态带来的系统误差 首次得到 $K \rightarrow lv_l l'^+ l'^-$ 衰变宽度格点结果

		非物理质量	物理质量		
Channel	$m_{ee}~{ m cut}$	Lattice/10 ⁻⁸	ChPT/10 ⁻⁸	Exp/10 ⁻⁸	
$K \rightarrow e \nu_e e^+ e^-$	> 140 MeV	1.41(16)	3.39	2.91(23)	
$K \to \mu \nu_{\mu} e^+ e^-$	> 140 MeV	10.80(35)	8.51	7.93(33)	
$K \rightarrow e \nu_e \mu^+ \mu^-$	无	0.68(6)	1.12	1.72(45)	
$K \to \mu \nu_{\mu} \mu^{+} \mu^{-}$	无	1.47(7)	1.35	<41	

更多细节,请参考脱心宇周二上午11点半的报告

一些新的尝试(II)

质子大小之谜与双光子交换

- 质子—构成物质世界的最基本粒子之一
- 2010年: 缪氢原子光谱实验, 质子的电荷半径与之前全球实验平均值偏差超过5σ



• 缪氢原子光谱提供了最精确的测量值 • 其最主要理论误差来源于双光子交换费曼图

用格点QCD计算双光子交换费曼图,降低最主要的理论误差

一些新的尝试(II)





难点二: 控制精度——optimized Subtraction scheme

更多细节,请参考傅杨周二上午11点50的报告

一些新的尝试(III)

◆ CKM矩阵是标准模型中的最基本参数 高精度前沿的重要目标之一,就是精确确定Vud等CKM矩阵元

但是…



光子-W玻色子圈图(γW圈图) ⇒贡献了最主要的理论误差

A. Sirlin, Rev.Mod.Phys. 50 (1978) 573



Cabibbo Kobayashi Maskawa

- ▶ 早在1970年代末,人们就已经知道γW圈图的重要性
- ▶ 由于非微扰QCD效应在γW圈图中占重要贡献,微扰计算的方法失效
- ▶ 理论计算仍然基于一定的唯象模型假设

用格点QCD解决CKM物理领域的精确计算难题

一些新的尝试(III)

21 /25





 π 介子衰变的 γ W圈图

- ▶ 非微扰QCD部分的理论误差减小了10倍
- > 整体理论误差减小了3倍



XF, M. Gorchtein, L.-C. Jin, P.-X. Ma, C.-Y. Seng, PRL 124 (2020) 192002

一些新的尝试(IV)

22 / 25



- 无中微子双贝塔(0ν2β)衰变一旦被探测到
 - ——确认马约拉纳粒子的存在 (中性费米子,粒子=反粒子)
 - 带给人类对于自然界的全新认识 给基础粒子物理学带来重大突破
- > 0v2β实验被列为美国2015年《核科学十年规划》新建项目第一位



中国锦屏地下实验室自然条件优越



国内多家单位正在积极开展该实验

一些新的尝试(IV)



多个理论研究领域交叉,建立夸克尺度到核尺度的无缝衔接

近来的部分工作

24 / 25

● 稀有K介子衰变

[Z. Bai, XF, N. Christ, et.al. PRL118 (2017) 252001]

π、K介子半轻衰变中的光-W玻色子圈图

[XF, M. Gorchtein, L. Jin, P. Ma, C. Seng, PRL124 (2020) 192002]
 [P. Ma, XF, M. Gorchtein, L. Jin, C. Seng, PRD103 (2021) 114503]

● 无中微子双贝塔衰变

[XF, L. Jin, X. Tuo, S. Xia, PRL122 (2019) 022001]
[X. Tuo, XF, L. Jin, PRD100 (2019) 094511]

● 粲偶素辐射衰变

[Y. Meng, XF, C. Liu, T. Wang, Z. Zou, arXiv:2109.09381]

● 缪氢光谱中的双光子交换图

[Y. Fu, XF, L. Jin, C. Lu, paper appears soon]

有一群富有朝气活力的年轻学生和博士后





