



格点量子色动力学 与粒子物理和核物理

教材

Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

格点量子色动力学与粒子物理和核物理



北京大学物理学院理论物理所

2024 年 8 月 6 日



声明



格点量子色动力学
与粒子物理和核物理

教材

Lattice QCD 简介

总体的介绍

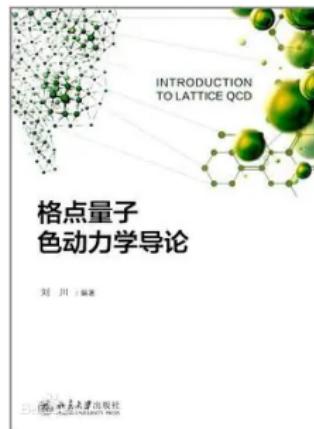
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望



感谢组委会的邀请



提纲



格点量子色动力学
与粒子物理和核物理

教材

Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

■ 1. Lattice QCD 总体介绍

- 总体的介绍:

LQCD 与 SM; 其特点; 优势; 历史; 国内格点研究的现状等

■ 2. 典型实例

- 曾经的基本粒子的质量 (谱学)

- 超出标准模型的新物理 (缪子磁矩)

■ 3. 总结与展望



1. Lattice QCD 总体介绍

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理

Lattice QCD 简介

总体的介绍

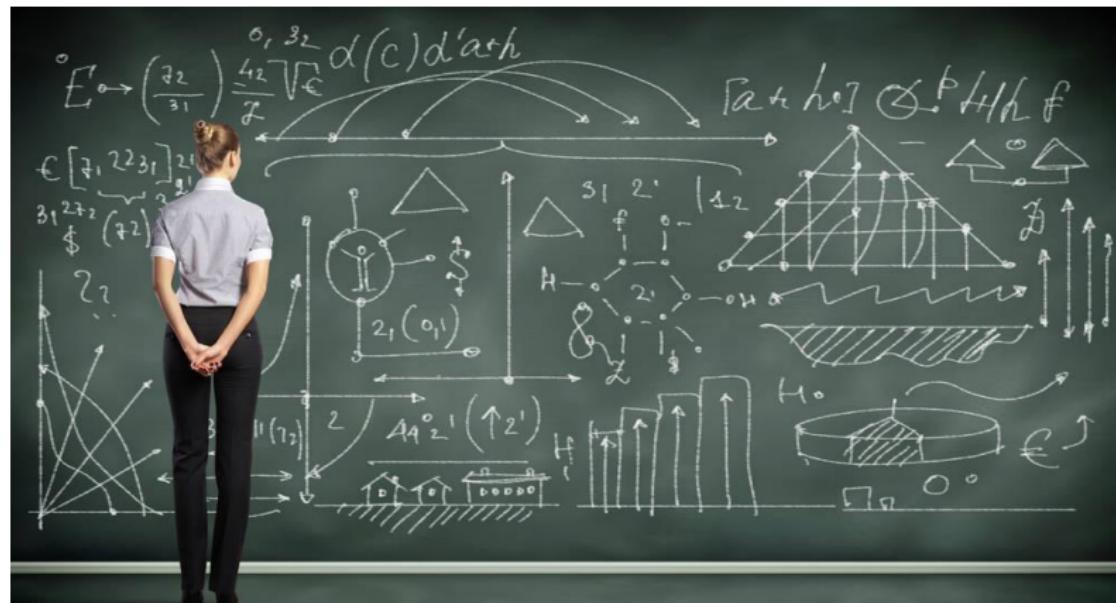
国内 LCD 的发展

曲刑实例

你的圈子

离子反向磁瓶

总结与展望





基本相互作用与粒子物理核物理

粒子物理标准模型 (Standard Model, SM)

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理

Lattice QCD 简介

总体的介绍

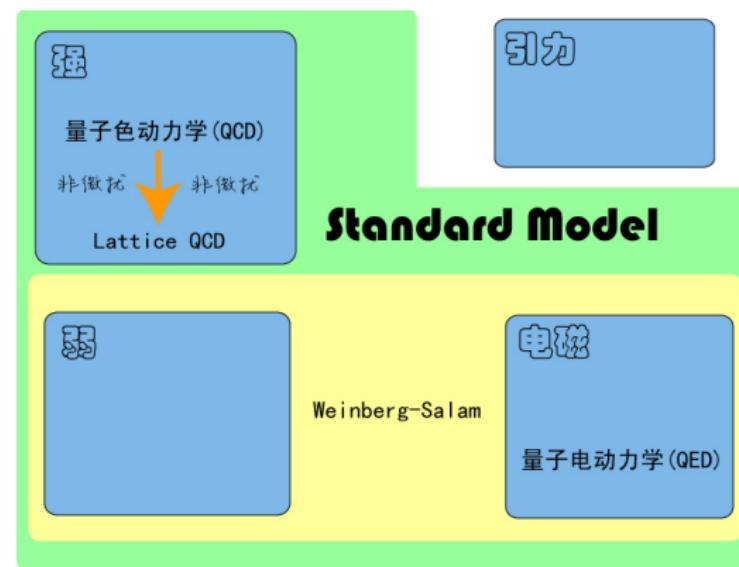
国内 LCD 的发展

典型实例

讲学的例子

分子反常磁矩

总结与展望



β 衰变

日常生活

$$\hbar c \simeq 200 \text{MeV} \cdot \text{fm} = 1 . \quad (1)$$



Quantum Field Theory

Theory of almost everything, except gravity

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

Quantized Fields



Waves

Particles

☞ 波、粒、场三位一体性 (Trinity)



量子场论

多自由度系统的量子理论

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

- 什么是量子场论 (QFT) ?
 ☞ 多自由度体系的量子理论
- 为什么需要量子场论 ?
 ☞ 几乎囊括了所有的物理对象
- 量子场论按领域大致的分类
 - 非相对论性量子场论—凝聚态理论、原子分子物理、部分的核物理
 - 相对论性量子场论—核物理、粒子物理 (高能物理)
 - 上述分类并不那么严格. 例子: 石墨烯、NRQCD; 只要管用就可以了
- ☞ 有效场论 (Effective Field Theory) 的概念
 - 每个领域都有自己的有效场论



场的量子化的两种方式

正则量子化与路径积分量子化

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理

Lattice QCD 简介

总体的介绍

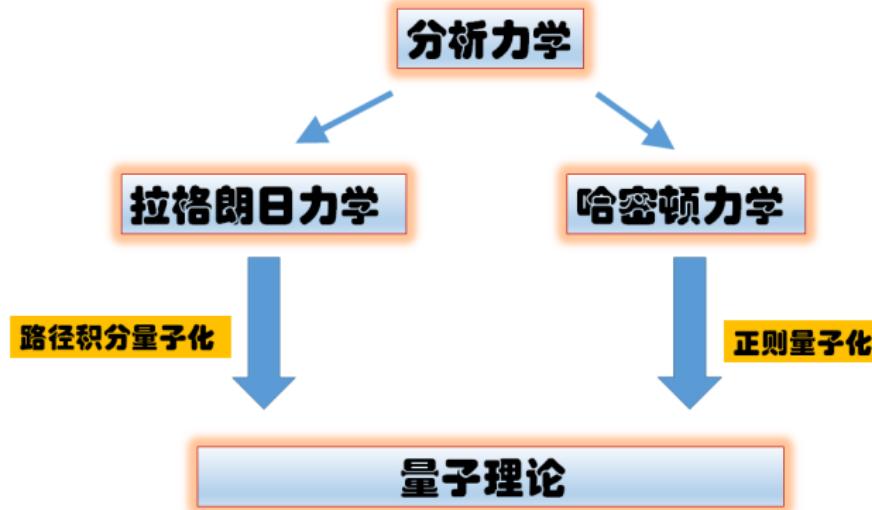
国内 LCD 的发展

曲型实例

第十一章

第十一章

总结与展望





非微扰，非微扰，非微扰

重要的事情说三遍

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

- 量子场论系统普遍存在**非微扰性质**
 - 微扰的描述不仅仅是定量不准确的问题,
 - 定性上都是有问题的, 特别对强相互作用
 - 典型例证: **色禁闭** (强子 vs. 夸克)
- 非微扰的定义是重要的
 - 它包含了微扰的定义.
 - 但是微扰的定义很难简单扩充到非微扰的定义
- 路径积分量子化的定义完全是非微扰的



场的量子化的两种方式

正则量子化与路径积分量子化

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

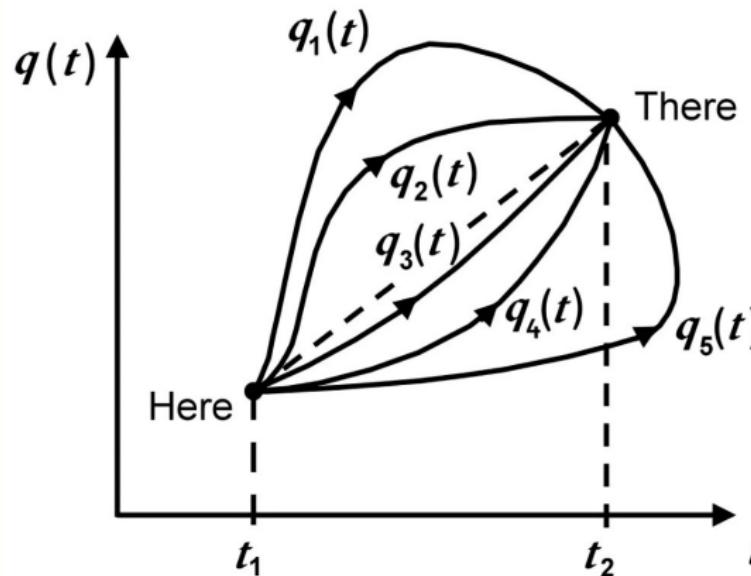
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望



$$\mathcal{Z}[q_I, t_1; q_F, t_2] = \int \mathcal{D}q \exp \left[i \int_{t_1}^{t_2} dt L(q, \dot{q}, t) \right], \quad (2)$$



Wick 转动, 虚时路径积分

正则量子化与路径积分量子化

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

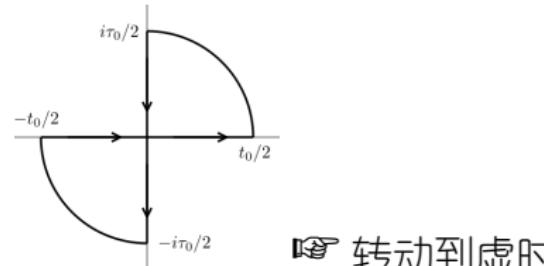
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望



转动到虚时

$$\mathcal{Z}[q_I, \tau_1; q_F, \tau_2] = \int \mathcal{D}q \exp \left[- \int_{\tau_1}^{\tau_2} d\tau L_E(q, \dot{q}, \tau) \right], \quad (3)$$

$$L_E(q, \dot{q}, \tau) = \frac{1}{2} \dot{q}^2 + V(q), \quad V(q) = \frac{\omega^2}{2} q^2 + \frac{\lambda_0}{4!} q^4,$$

如果将 $q_I = q_F$ 并对其积分, 非常类似于正则配分函数:

$$\mathcal{Z} = Tr(e^{-\beta \hat{H}}) = \int \mathcal{D}q e^{-S_E[q]}. \quad (4)$$



从一个自由度到多个自由度的场 正则量子化与路径积分量子化

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

$$q(\tau) \Rightarrow \phi(\tau, \mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^3, \quad (5)$$

引入分立的(虚)时间和分立的空间，导致四维的欧氏空间的晶格。

- 正规化的需要：红外 + 紫外
- 计算上的需要：路径积分分化为多维积分

格点量子色动力学 (**LQCD**)，涉及夸克场 $q(x)$ 、反夸克场 $\bar{q}(x)$ 和规范场 $U_\mu(x)$ ，这三类在欧氏格点上定义的场：

$$\begin{aligned} \phi(x) = & \{ q_{a,\alpha,f}(x), \quad \bar{q}_{a,\alpha,f}(x), \quad [U_\mu(x)]_{ab} \}, \quad x \in \Lambda, \\ & a = 1, 2, 3, \quad \text{颜色指标}, \\ & \alpha = 1, 2, 3, 4, \quad \text{Dirac 旋量指标}, \\ & f = u, d, s, c, b, \quad \text{味道指标}, \\ & \mu = 0, 1, 2, 3, \quad \text{时空方向指标} \end{aligned} \quad (6)$$



Wilson Lattice QCD and MC simulations

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

- quantum fields $\phi(x) = \{q(x), \bar{q}(x), U_\mu(x)\}$ defined on a 4D Euclidean lattice structure: $x \in \Lambda$
- a lattice action $S[\phi] = \sum_{x,y} \bar{q}(x) \mathcal{M}[U_\mu]_{x,y} q(y) + S_g[U_\mu]$
- Partition function & physical observables

$$\begin{cases} \mathcal{Z} = \int \mathcal{D}\phi e^{-S[\phi]}, \\ \langle \mathcal{O}[\phi] \rangle = \int \mathcal{D}\phi \mathcal{O}[\phi] e^{-S[\phi]} / \mathcal{Z}. \end{cases} \quad (7)$$

- complication of fermions (**Graßmann fields**)

$$\mathcal{Z} = \int \mathcal{D}U_\mu e^{-S_g[U_\mu]} \det \mathcal{M}[U_\mu] \equiv \int \mathcal{D}U_\mu e^{-S_{\text{eff}}[U_\mu]}. \quad (8)$$

- Monte Carlo works most effectively for systems without the so-called “sign problem”: $e^{-S_{\text{eff}}[U_\mu]} \in \mathbb{R} \geq 0$



Lattice QCD 的特点和优势

格点量子色动力学
与粒子物理和核物
理



Lattice QCD 简介

总体的介绍
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子
缪子反常磁矩

总结与展望

- 1 具有良好的非微扰定义
- 2 可非微扰地进行计算

- ① 非微扰特性
- ② 有良好定义
- ③ 可数值计算



可持续改进！

结果直接对比
格点 QCD $\triangleleft \cdots \triangleright$ 粒子物理核物理实验



Lattice QCD 发展的几个阶段

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

- 初创阶段：1974-1981，框架的提出和理论形式的发展
- 淬火近似阶段：1981-2003，主要进行淬火近似的计算
 - M. Creutz 提出可行的算法
 - Hamber & Parisi 进行第一个淬火强子谱计算 [Phys.Rev.Lett.](#)
[47, \(1981\) 1792.](#)
 - 1992 年，hep-lat arXiv 建立 (初创 section)
 - 1994 Weingarten 等人的淬火谱学计算 [Nucl.Phys. B430 \(1994\) 179-228.](#)
- 非淬火近似阶段：2003-今，已逐渐称为越来越精确的并可以直接与实验对比的非微扰计算方法



Lattice QCD 研究的问题

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

- 1 spectrum & hadronic interactions
- 2 hadron structure
- 3 weak decay & matrix elements
- 4 finite temperature and density
- 5 standard model parameters & renormalization
- 6 BSM physics
- 7 Algorithms & machines



从更广的角度来看标准模型

基本构成：强作用 $QCD \oplus$ 电弱作用

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

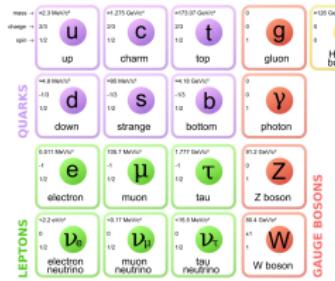
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望



$$SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y \quad \text{强} \gg \text{电弱}$$

1 我们仍然不清楚如何非微扰地来定义整个标准模型！

- LQCD提供了非微扰地定义QCD的方法
- 仍无法自洽地、非微扰地定义手征规范理论（电弱作用的 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ）！只能依赖于微扰论

2 利用LQCD数值模拟方法，非微扰地计算强作用部分的非微扰贡献

3 标准模型的其他部分，则利用微扰论给出

- 这个混杂体与绝大部分的实验都完美符合

4 但我们有理由相信标准模型不是理论的终点



从更广的角度来看标准模型

基本构成：强作用 QCD \oplus 电弱作用

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

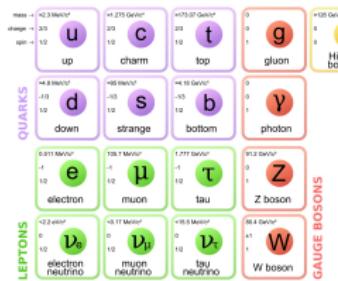
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望



$$SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y \quad \text{强} \gg \text{电弱}$$

1 我们仍然不清楚如何非微扰地来定义整个标准模型！

- LQCD提供了非微扰地定义QCD的方法
- 仍无法自洽地、非微扰地定义手征规范理论（电弱作用的 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ）！只能依赖于微扰论

2 利用LQCD数值模拟方法，非微扰地计算强作用部分的非微扰贡献

3 标准模型的其他部分，则利用微扰论给出

- 这个混杂体与绝大部分的实验都完美符合

4 但我们有理由相信标准模型不是理论的终点



从更广的角度来看标准模型

基本构成：强作用 QCD \oplus 电弱作用

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

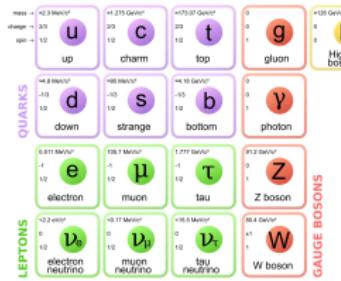
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望



$$SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y \quad \text{强} \gg \text{电弱}$$

1 我们仍然不清楚如何非微扰地来定义整个标准模型！

- LQCD提供了非微扰地定义QCD的方法
- 仍无法自洽地、非微扰地定义手征规范理论（电弱作用的 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ）！只能依赖于微扰论

2 利用LQCD数值模拟方法，非微扰地计算强作用部分的非微扰贡献

3 标准模型的其他部分，则利用微扰论给出

- 这个混杂体与绝大部分的实验都完美符合

4 但我们有理由相信标准模型不是理论的终点



简单的总结

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理

Lattice QCD 简介

总体的介绍

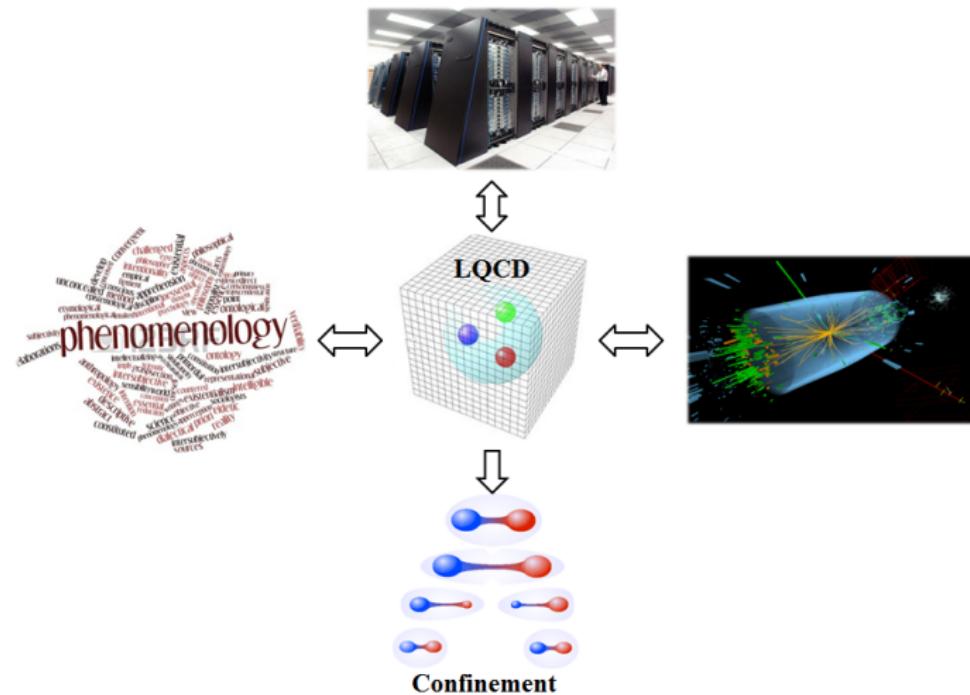
国内 LCD 的发展

曲型实例

海北卷二

离子反键轨道

总结与展望



理解色禁闭



国内 Lattice 的发展

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望



中国格点合作组 (CLQCD) 的研究

1 强子谱学

- 传统强子态：介子 $q\bar{q}$ 、重子 = qqq
- 奇特强子态：胶球、四夸克、五夸克 **BESIII, LHCb**

2 核子结构

- 质子的结构： $uud + g + q\bar{q} + \dots$
- 但是它们究竟是如何构成质子的？ **EicC, EIC**

3 QCD 相结构

- 低温低密区强子相高温高密区的 QGP 区
- 寻找相变临界点 **LHC, RHIC**

4 SM 精确检验/BSM 物理寻找

- 标准模型能否给出精确的理论预言，往往取决于与强相互作用相关的非微扰强子矩阵元能否被精确的计算。
- CP 破坏、 a_μ 、B 反常等 **BESIII, Belle2, FNAL**

5 相关数据与软件的研发



国内 Lattice QCD 的发展

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理

卷 II

Lattice QCD 简介

总体的介绍

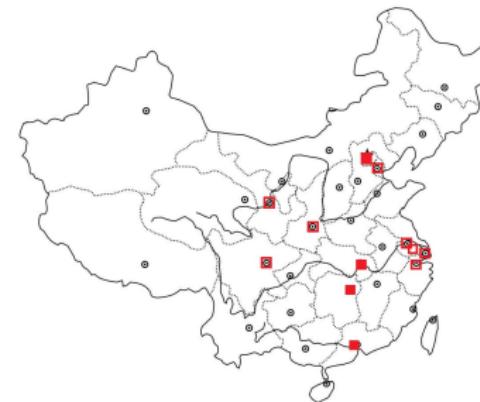
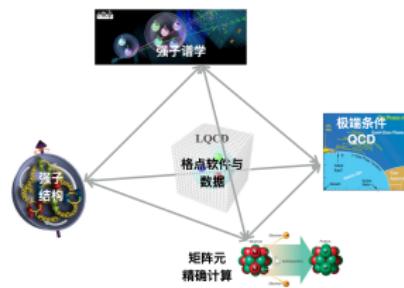
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望



陈莹, 丁亨通, 冯旭, 等. 格点量子色动力学在中国. 现代物理知识, 2020, 32(1):36-44.



2. 两类典型的例子

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望





典型的例子 1: (曾经的) 基本粒子的质量 强子谱学

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

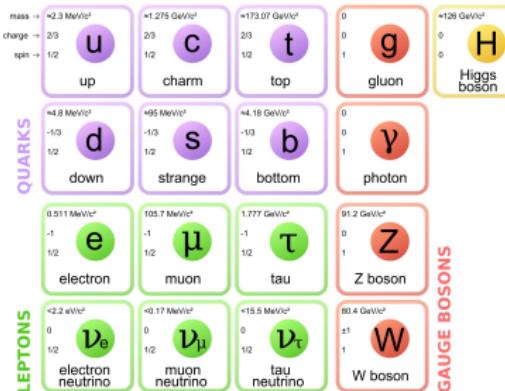
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望



就像知道了氢原子的基本构成 (质子 + 电子 + 量子力学)
就可以预言它的谱线一样
知道了质子的构成 (uud), 我们应当可以预言强子的质量.
大的结构 (Gross structure) \Rightarrow 精细结构 (fine structure)



谱学—近现代物理发展的核心.

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

- 氢原子光谱的大结构 => 旧量子论 (Bohr, Sommerfeld)
- 1925 年, 矩阵力学解出氢原子谱线 (Pauli)
- 1926 年, 波动力学解出氢原子谱线 (Schrödinger)
- 1928-29 年, 自旋提出, Dirac 方程提出, 解决了精细结构 (Pauli, Dirac)
- 氢原子 = 质子 + 电子 + 库伦相互作用
- 输入参数: $m_p \gg m_e$, $\alpha = e^2/(4\pi) \approx 1/137$
- 量子力学的计算可以给出氢原子光谱的大结构
- 更精细结构: 自旋、核自旋、原子核尺寸、原子核自旋



谱学—近现代物理发展的核心.

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

- 氢原子光谱的大结构 => 旧量子论 (Bohr, Sommerfeld)
- 1925 年, 矩阵力学解出氢原子谱线 (Pauli)
- 1926 年, 波动力学解出氢原子谱线 (Schrödinger)
- 1928-29 年, 自旋提出, Dirac 方程提出, 解决了精细结构 (Pauli, Dirac)
- 氢原子 = 质子 + 电子 + 库伦相互作用
- 输入参数: $m_p \gg m_e$, $\alpha = e^2/(4\pi) \approx 1/137$
- 量子力学的计算可以给出氢原子光谱的大结构
- 更精细结构: 自旋、核自旋、原子核尺寸、原子核自旋



典型的例子 1: (曾经的) 基本粒子的质量

强子谱学-大的结构

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理

Ⅱ

Lattice QCD 简介

总体的介绍
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

■ 夸克参与所有的相互作用 (强/电磁/弱)

■ 由大到小排列: 强 \gg 电弱

■ 质子 $p = uud +$ 强/电/弱相互作用

■ 输入参数: m_u, m_d, α_s

■ 强子的质量三个部分:

① 强相互作用能 (纯 QCD)

② 价夸克的流夸克质量 (Higgs 机制/弱作用)

③ 电磁/弱相互作用能量

■ 但最主要的部分来自强相互作用的能量

比如质子的构成是 uud , 其构成的流夸克质量大概为,

$$m_u + m_u + m_d \approx 2.3 + 2.3 + 4.8 \approx 9.4 \text{ MeV} . \quad (9)$$
$$m_p = 938 \text{ MeV}$$

强子的大结构只需要研究纯 QCD 即可



淬火近似时期的谱学

Hamber & Parisi (1981) 与 Weingarten 等人 (1994) 的结果

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理

第 11 页

Lattice QCD 简介

总体的介绍

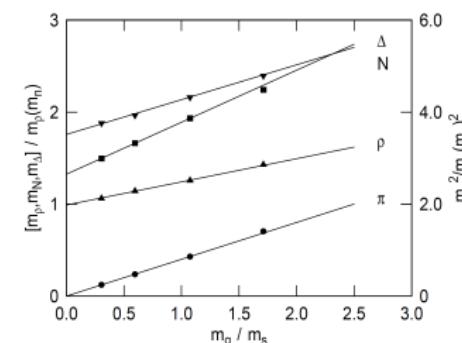
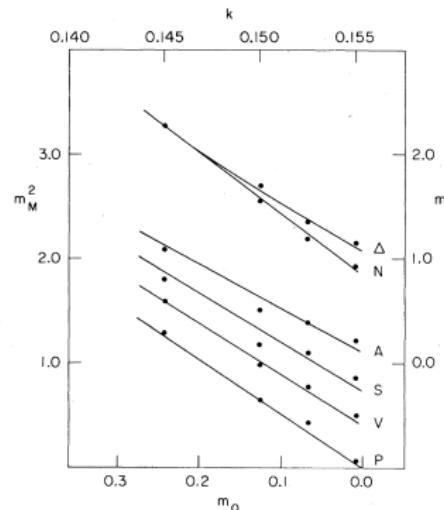
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望



很多格点组的淬火研究表明：淬火近似仅仅能够将基态强子谱描写到 5% 的程度，更加精确的结构必须考虑费米子圈的效应（非淬火近似—或者称为完全 QCD）！



非淬火近似时期的谱学

非淬火强子谱

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

TABLE XI: Meson and baryon masses at the physical point in physical units. m_π , m_K , m_Ω are inputs.

channel	experiment [GeV][46]	physical point [GeV]	
		w/o FSE	w/ FSE
π	0.1350	—	—
K	0.4976	—	—
ρ	0.7755	0.776(34)	0.776(34)
K^*	0.8960	0.896(9)	0.896(9)
ϕ	1.0195	1.0084(40)	1.0084(40)
N	0.9396	0.953(41)	0.953(41)
Λ	1.1157	1.092(20)	1.092(20)
Σ	1.1926	1.156(17)	1.156(17)
Ξ	1.3148	1.304(10)	1.304(10)
Δ	1.232	1.274(39)	1.275(39)
Σ^*	1.3837	1.430(23)	1.430(23)
Ξ^*	1.5318	1.562(9)	1.562(9)
Ω	1.6725	—	—

PACS-CS arXiv:0807.1661[hep-lat]



更精细的谱学

中子为什么比质子更重？

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

- u/d 夸克有质量 (流夸克质量)
 - 但核子的质量主要不是流夸克质量带来的
 - $m_u < m_d$, 但它带有更多的电荷 (库伦排斥能)!
- ☞ 同位旋对称性与电磁相互作用的精巧平衡



更广泛的谱学

重味夸克与奇特强子态

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

- 夸克有六味
- 其中的五味都参与强子化，需要考虑非微扰效应！
- 轻味 (u,d,s) + 重味 (c,b)
- 更加丰富的谱学 (奇异谱、粲谱、底谱)
- 奇特强子态 (四夸克、五夸克、六夸克、混杂态等)



典型的例子： μ 子的反常磁矩

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理

教材

Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望





发展的时间线

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理

卷 II

Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

- 2006 年, BNL 测量了 a_μ , 精度 0.5ppm
- 2020 年左右, WP 发表, 发现 3-4sigma tension
- 2022 年 Fermilab 发表新实验结果, tension 变大
- 2024 年, 新的格点计算表明, tension 没有那么夸张



最近几年的发展

取自 Lattice 2024 上 Christine Davies 的大会报告

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理

卷 II

Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

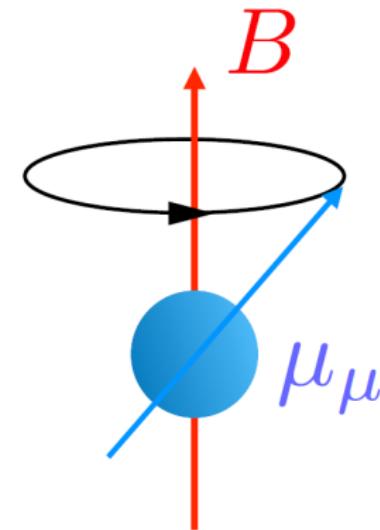
缪子反常磁矩

总结与展望

Muon g-2

Christine Davies
University of Glasgow

Lattice 2024, Liverpool, July 2024





a_μ 的定义

格点量子色动力学
与粒子物理和核物
理

Lattice QCD 简介

国内 LCD 的发展

曲型实例

第二步

总结与展望

Muon magnetic moment

$$\vec{\mu}_\mu = g_\mu \left(\frac{e}{2m_\mu} \right) \vec{S}$$



$$a_\mu = \frac{g_\mu - 2}{2}$$

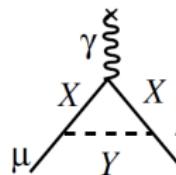
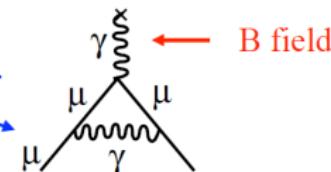
Anomalous magnetic moment

Leading, $O(\alpha)$, contribn is

schwinger 1941

$$\frac{\alpha}{2\pi} = 0.00116\dots$$

+ many higher order pieces ...



New physics would give SM/expt discrepancy

$$\delta a_l^{\text{new heavy physics}} \propto \frac{m_l^2}{M_X^2} \quad \begin{array}{l} \text{motivates study of } \mu \\ \text{rather than e.} \end{array}$$



高阶的修正

误差主要由描写强相互作用的 QCD 给出



总体的介绍

国内 LQCD 的发展

谱学的例子

缪子反常磁矩

Comparison to the Standard Model

$$\text{Current status } 10^{10} a_\mu = 11659205.9(2.2)$$

Experiment - Muon
g-2@FNAL
PRL131:161802 (2023)

$$10^{10} a_\mu = 11659181.0(4.3)$$

Theory white paper:
Phys. Rep. 887:1 (2020)

$$\text{Difference} = 24.9(4.8) \times 10^{-10}$$

5 σ ! NO! QCD contributions
need more work

Theory white paper: Phys. Rep. 887:1 (2020)

$10^{10} \times$ contribution:

QED: $11658471.8931(104)$

Uncertainty in SM a_μ almost
entirely from QCD.

EW: $15.36(10)$

QCD: $693.7(4.3)$

Lattice QCD is important here



最主要的部分

Leading Order Hadronic Vacuum Polarization

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



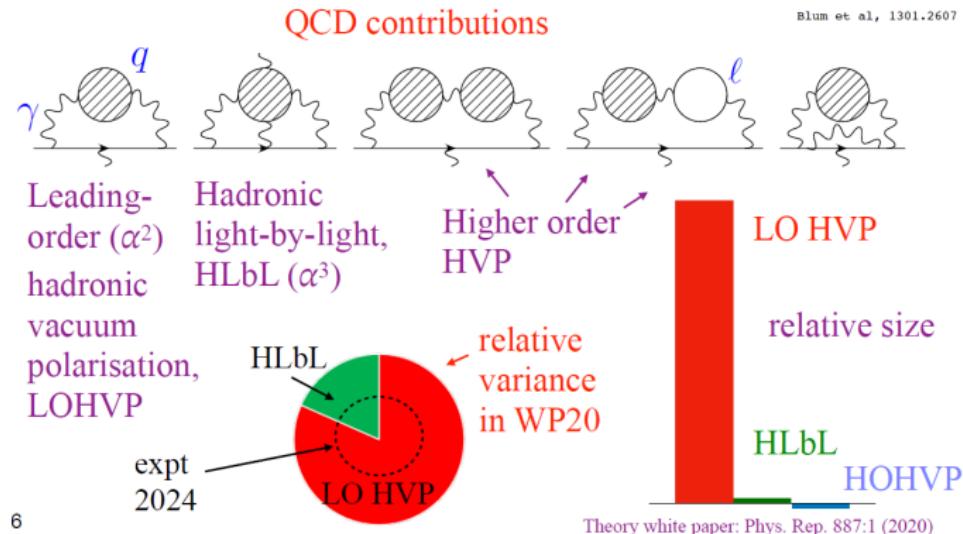
Lattice QCD 简介

总体的介绍
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子
缪子反常磁矩

总结与展望





理论上计算 LOHVP 的两种方法

数据驱动方法与格点 QCD 方法

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理

Lattice QCD 简介

国内 LCD 的发展

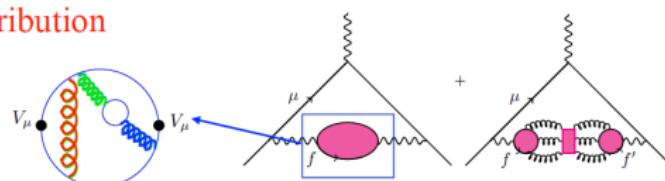
曲型实例

总结与展望

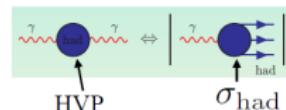
The LOHVP contribution

Key ingredient is quark bubble connected to a photon at either side

$$V_\mu = e_f \bar{\psi}_f \gamma_\mu \psi_f$$



‘Data-driven’ methods



Relate HVP to $\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{hadrons})$ and input experimental data.

WP20 HVP number uses this since has been most accurate.

See Kochbayrakai's Lat2023 talk for details of this method.

See Kesavaiah, *etc2023* talk, for details of this method.

Lattice QCD

Direct computation of the vector-vector correlation function for u, d, s and c quarks in Lattice QCD.

Need connected + disconnected correlators + QED + isospin-breaking corrections.



2020-2022 年的情况

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍
国内 LQCD 的发展

典型实例

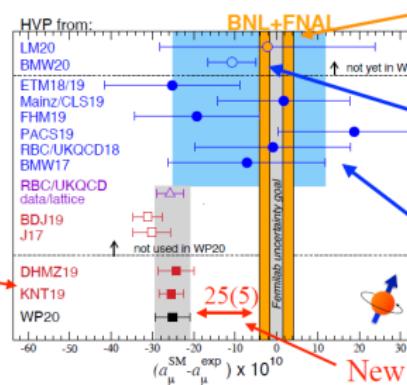
谱学的例子
缪子反常磁矩

总结与展望

Impact of LOHVP on SM-experiment comparison for a_μ

Snowmass,
2203.15810
BMW20,
2002.12347

Data-driven results
for WP20 - 0.6%
uncertainty



BUT: do data-driven and lattice QCD HVP agree?

} CRITICAL to conclusion on new physics evidence



2024 年的情况

格点量子色动力学
与粒子物理和核物
理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

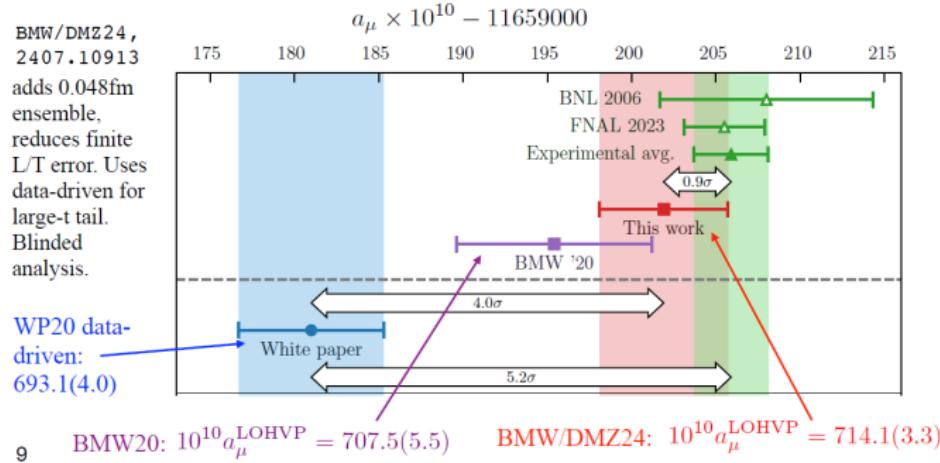
典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

2024 update





LQCD 与粒子物理标准模型的简单总结

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

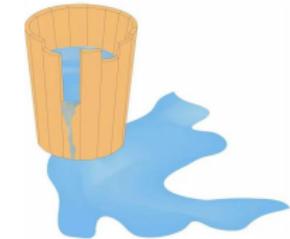
缪子反常磁矩

总结与展望

- 标准模型 (standard model) 很美...
- 但它似乎又不够美...
- 但在寻找更美的超模 (super models) 前,
- 我们先要明确知道, 什么是美
- **LQCD**让我们真正定量地了解,

标准模型到底有多美

mass	charge	spin	name
~2.3 MeV/c ²	+2/3	1/2	u
~2.3 MeV/c ²	+2/3	1/2	c
~173 GeV/c ²	+2/3	1/2	t
~14.3 MeV/c ²	-1/3	1/2	d
~14.3 MeV/c ²	-1/3	1/2	s
~173 GeV/c ²	-1/3	1/2	b
~0.511 MeV/c ²	-1	1/2	e
~0.511 MeV/c ²	-1	1/2	μ
~177 GeV/c ²	-1	1/2	τ
~12.2 MeV/c ²	0	1/2	ν_e
~16.77 MeV/c ²	0	1/2	ν_μ
~19.5 MeV/c ²	0	1/2	ν_τ
~80.4 GeV/c ²	0	1	W
~120 GeV/c ²	0	1	g
~120 GeV/c ²	0	1	H
			Higgs boson
			gluon
			photon





LQCD 与粒子物理标准模型的简单总结

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍
国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

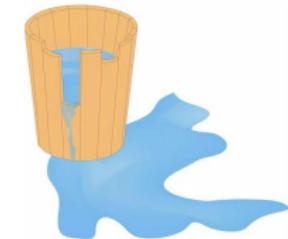
缪子反常磁矩

总结与展望

- 标准模型 (standard model) 很美...
- 但它似乎又不够美...
- 但在寻找更美的超模 (super models) 前,
- 我们先要明确知道, 什么是美
- **LQCD**让我们真正定量地了解,

标准模型到底有多美

mass	charge	spin	name
~2.3 MeV/c ²	+2/3	1/2	u
~2.3 MeV/c ²	+2/3	1/2	c
~2.3 MeV/c ²	+2/3	1/2	t
~14.3 MeV/c ²	-1/3	1/2	d
~14.3 MeV/c ²	-1/3	1/2	s
~14.3 MeV/c ²	-1/3	1/2	b
~91.2 GeV/c ²	0	1	g
~91.2 GeV/c ²	0	1	gluon
~120 GeV/c ²	0	1	H
			Higgs boson
QUARKS			
~0.511 MeV/c ²	0	1/2	e
~0.511 MeV/c ²	0	1/2	μ
~0.511 MeV/c ²	0	1/2	τ
~177.7 GeV/c ²	-1	1/2	Z
~91.2 GeV/c ²	0	1	Z boson
LEPTONS			
~0.2 eV/c ²	0	1/2	ν_e
~0.2 eV/c ²	0	1/2	ν_μ
~0.2 eV/c ²	0	1/2	ν_τ
~0.5 MeV/c ²	0	1	W
~80.4 GeV/c ²	0	1	W boson
GAUGE BOSONS			





LQCD 与粒子物理标准模型的简单总结

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

- 标准模型 (standard model) 很美...
- 但它似乎又不够美...
- 但在寻找更美的超模 (super models) 前,
- 我们先要明确知道, 什么是美
- **LQCD**让我们真正定量地了解,

标准模型到底有多美

QUARKS	LEPTONS	Gauge Bosons
u (up), c (charm), t (top)	e (electron), μ (muon), τ (tau)	g (gluon), H (Higgs boson)
d (down), s (strange), b (bottom)	ν_e (electron neutrino), ν_μ (muon neutrino), ν_τ (tau neutrino)	γ (photon), Z boson, W boson
mass: $~1.3 \text{ MeV/c}^2$, spin: 1/2	mass: $~0.511 \text{ MeV/c}^2$, spin: 1/2	mass: $~80 \text{ GeV/c}^2$, spin: 1
charge: +2/3, -1/3	charge: -1, -1	charge: +1, -1





LQCD 与粒子物理标准模型的简单总结

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

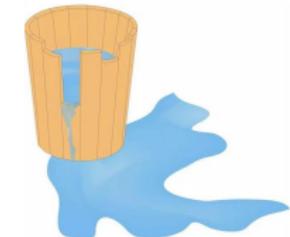
总结与展望

- 标准模型 (standard model) 很美...
- 但它似乎又不够美...
- 但在寻找更美的超模 (super models) 前,
- 我们先要明确知道, 什么是美

■ LQCD 让我们真正定量地了解,

标准模型到底有多美

mass	charge	spin	name
~2.3 MeV/c ²	+2/3	1/2	u
~2.3 MeV/c ²	+2/3	1/2	c
~2.3 MeV/c ²	+2/3	1/2	t
~14.3 MeV/c ²	-1/3	1/2	d
~14.3 MeV/c ²	-1/3	1/2	s
~14.3 MeV/c ²	-1/3	1/2	b
~91.2 GeV/c ²	0	1	g
~91.2 GeV/c ²	0	1	H
~0.511 MeV/c ²	0	1/2	e
~0.511 MeV/c ²	0	1/2	μ
~0.511 MeV/c ²	0	1/2	τ
~98.1 MeV/c ²	-1	1/2	Z boson
~12.2 eV/c ²	-0.277 MeV/c ²	1/2	ν_e
~12.2 eV/c ²	-0.277 MeV/c ²	1/2	ν_μ
~12.2 eV/c ²	-0.277 MeV/c ²	1/2	ν_τ
~80.5 MeV/c ²	0	1/2	tau neutrino
~80.5 MeV/c ²	0	1/2	muon neutrino
~80.5 MeV/c ²	0	1/2	electron neutrino
~80.5 MeV/c ²	0	1/2	W boson
~80.5 MeV/c ²	0	1/2	Z boson
~91.2 GeV/c ²	0	1	W boson
~91.2 GeV/c ²	0	1	Z boson





LQCD 与粒子物理标准模型的简单总结

格点量子色动力学
与粒子物理和核物理



Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

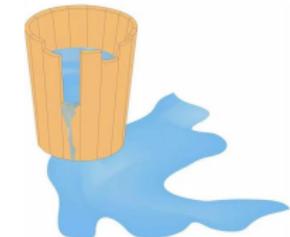
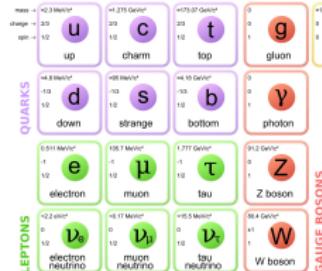
典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

- 标准模型 (standard model) 很美...
- 但它似乎又不够美...
- 但在寻找更美的超模 (super models) 前,
- 我们先要明确知道, 什么是美
- **LQCD**让我们真正定量地了解,
标准模型到底有多美





总结与展望



格点量子色动力学
与粒子物理和核物理

教材

Lattice QCD 简介

总体的介绍

国内 LQCD 的发展

典型实例

谱学的例子

缪子反常磁矩

总结与展望

- 1 简单介绍了 Lattice QCD(地位、作用、特点)
- 2 结合两个例子 (强子谱学、 a_μ)，介绍了 LQCD 与粒子物理标准模型的关系
- 3 还有很多没有触及的问题…
- 4 希望给参与的广大同学们提供一个新的视角！

欢迎各位同学批评指正！