

文章编号: 1007-4627(2007)04-0261-03

关于夸克质量问题*

彭金松¹, 周丽娟², 马维兴^{2,3,#}

(1 河池学院物理与电子工程系, 广西 宜州 546300;

2 广西工学院强子物理和非微扰 QCD 合作研究组, 广西 柳州 545006;

3 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 指出了研究夸克质量的重要性、科学意义和夸克质量产生的机制。用夸克传播子定义了夸克的质量, 进而讨论了夸克的有效质量。最后指出了存在的问题和研究前景。

关键词: 夸克; 量子色动力学; 夸克质量

中图分类号: O572.33

文献标识码: A

1 重要性和科学意义

夸克的质量 m_f 是标准模型中一个基本的量子色动力学(QCD)输入参数^[1],

$$\mathcal{L} = \sum_f \bar{q}_f (i\gamma^\mu D_\mu + m_f) q_f - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu}, \quad (1)$$

所以精确地确定这个参数 m_f 对 QCD 的研究是极其重要的。

夸克是禁闭在强子中的, 自然界不存在自由的夸克。因此, 夸克的质量不能用实验的方法来直接测量而得到, 只能间接地把依赖于夸克质量的物理量的理论预言值与相应的实验结果比较来确定。

精确地确定夸克的质量 m_f 可以用来探索味物理(即味道对称性物理), 揭示质量与混合角之间的关系。特别是奇异夸克(s)质量绝对标度的确定对研究轻夸克(u, d)的质量是至关重要的。一旦奇异夸克的质量被确定, 轻夸克的质量也就随之而精确地被确定了。

夸克质量大小的不确定性限制着标志 CP 是否守恒的量 ε'/ε 是否为零的判定。若 ε'/ε 为零, 则 CP 守恒, 否则 CP 不守恒。而 ε'/ε 的值与夸克的质量 m_f 是密切相关的。所以夸克质量的精确判定也是判断 CP 是否守恒的重要物理问题。

夸克的质量与非微扰 QCD 真空凝聚值有关,

它是非微扰 QCD 真空性质的标志(参看下边的方程(5))。夸克质量的存在引起了手征对称性的破缺, $\partial^\mu A_\mu^a(x) = i\bar{\psi}\hat{m}\lambda^a\psi(x)$, ($A_\mu^a(x)$ 是轴向量流), 进而产生了 8 个 Goldstone 玻色子: 即 π, K, η 。

2 夸克质量的产生机制

夸克的质量来源于两个方面: Higgs 机制^[2]和夸克的真空凝聚^[1,3,4]。

2.1 Higgs 产生机制

在标准模型中, Higgs 机制是粒子质量产生的源泉, 当 Higgs 场与夸克场发生相互作用时, 粒子就马上产生了质量。这可以从下边两个表达式中明显地显示出来:

$$g_{\text{HVV}} = 2[\sqrt{2}G_F]^{1/2}M_V^2, \quad (2)$$

$$g_{\text{Hff}} = [\sqrt{2}G_F]^{1/2}M_f, \quad (3)$$

这里, g_{HVV} 是 Higgs 场与向量规范玻色子场的耦合常数, M_V 是规范玻色子的质量; g_{Hff} 是 Higgs 场和费米子场的耦合常数, M_f 是费米子的质量, G_F 是费米常数。显然, 一旦 Higgs 与粒子发生相互作用, g_{HVV} 和 g_{Hff} 就存在, 其值不为零, 粒子便立即获得了质量 $M_{V,f}$ 。Higgs 场是无所不在的, 可以与任何粒

* 收稿日期: 2007-06-19; 修改日期: 2007-08-31

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10565001, 10647002)

作者简介: 彭金松(1963-), 男(汉族), 广西藤县人, 副教授, 从事原子核物理和粒子物理方面的研究和教学工作;

E-mail: 123pjs@163.com

通讯联系人: 马维兴, E-mail: weixing_ma2002@sina.com

子场发生作用。

2.2 QCD 的真空凝聚

按照 QCD 理论, 夸克的真空凝聚也产生了夸克的质量。Thomas 和 Weise^[3] 指出: 夸克的传播子可写为

$$S_f(p) = \frac{1}{i\not{p} - \Sigma_f(p)} = \frac{1}{i\not{p} - M(p)},$$

$$\Sigma_f(p) = \frac{1}{i\not{p} - \frac{4\pi}{3} \frac{\alpha_s}{p} \langle \bar{q}q \rangle + \dots}, \quad (4)$$

因此, 夸克的动力学质量便为^[3]

$$M(Q) = -\frac{4\pi}{3} \frac{\alpha_s(Q)}{Q^2} \langle 0 | \bar{q}q | 0 \rangle + \dots. \quad (5)$$

注意 $\langle 0 | \bar{q}q | 0 \rangle$ 是小于零的负值, 所以质量 $M(p)$ 总是取正值。方程(5)表明 QCD 的真空凝聚 $\langle \bar{q}q \rangle$ 也是对夸克的质量有所贡献的。当然, 要了解两种机制贡献的各自大小就要做理论研究和相应的数值计算。

3 夸克质量的定义

粒子的质量是用粒子的传播子来定义的。传播子的奇异点(pole)相应于一个粒子或共振态。奇异点在复平面上位置坐标的实部值是粒子的质量, 虚部是粒子的衰变宽度或寿命。

夸克的质量是用夸克的传播子 $S_f(p)$ ^[5] 来定义的。传播子的奇异点就确定了夸克的质量。在欧几里德空间, 夸克的传播子 S_f 可以表示为^[1]

$$S_f^{-1}(p) = i\not{p}A_f(p^2) + B_f(p^2), \quad (6)$$

这里 A_f 和 B_f 叫做自能函数。在类空(即 $p^2 > 0$ 的空间, $p^2 = E^2 - m^2$ 为 4 动量)点 μ^2 [即 $p^2 = \mu^2$], $A_f(\mu^2) = 1$, $B_f(\mu^2) = m_f$ 。其中 m_f 是夸克的流质量, 即拉氏量 \mathcal{L} 中夸克的质量 m_f 。 A_f 和 B_f 是彩虹近似下($\Gamma^\nu = \gamma^\nu$)的 Dyson-Schwinger 方程的解^[5]。

夸克的传播子也可以表示为

$$S_f^{-1}(p) = i\not{p} + m_f + \Sigma_f(p) \equiv Z^{-1}(p^2) [i\not{p} + M_f(p^2)], \quad (7)$$

这里 $\Sigma_f(p)$ 是味量子数为 f 的夸克的自能。 $Z^{-1}(p^2) \equiv A_f(p^2)$ 是夸克波函数重整化的因子, 它是动量的函数。 M_f 表示夸克的有效质量。方程(7)定义了夸

克的有效质量。

4 夸克有效质量 M_f 的表示式

因为 $Z^{-1} = A_f$, 所以方程(7)可以重写为

$$S_f^{-1}(p) = A_f(p^2) [i\not{p} + M_f(p^2)]. \quad (8)$$

方程式(6)与方程式(7)描述的是同一个物理量, 所以两个方程右边的量应当相等, 即

$$i\not{p}A_f + B_f = A_f [i\not{p} + M_f] = i\not{p}A_f + M_fA_f. \quad (9)$$

比较方程式(9)的两边, 可得到

$$B_f(p^2) = M_f(p^2)A_f(p^2), \quad (10)$$

$$M_f(p^2) = \frac{B_f(p^2)}{A_f(p^2)}. \quad (11)$$

方程式(11)就是夸克有效质量 M_f 的来由和表示式。要强调的是 A_f 和 B_f 是我们求解而得到的描述夸克传播子的 Dyson-Schwinger 方程^[1,5] 的解^[6]。所以 $M_f(p^2)$ 是由夸克传播子 $S_f^{-1}(p)$ 所确定的。图1给

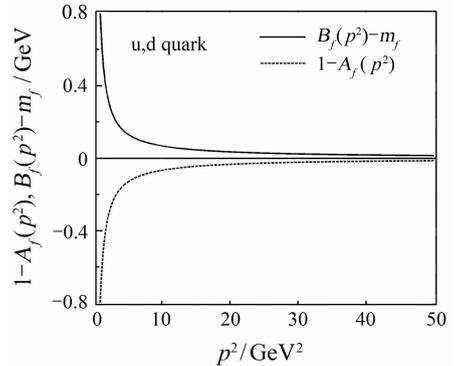


图1 自能函数 $[1 - A_f(p^2)]$ 和 $B_f(p^2)$ 对夸克动量 p^2 的依赖关系

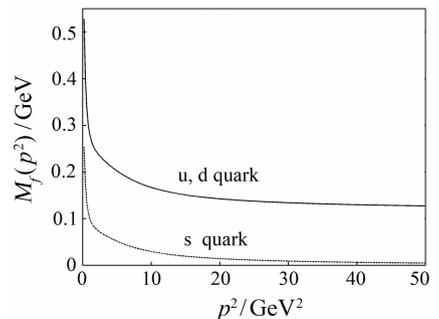


图2 u, d 夸克和 s 夸克的质量 $M_f(p^2)$ 对夸克动量 p^2 的依赖关系

出了夸克的向量自能函数 $(1 - A_f)$ 和标量自能函数 B_f 对 p^2 的依赖关系。图 2 分别给出了 u, d 夸克的质量 $M_f(p^2)$ 对动量 p^2 的依赖关系。图 2 说明夸克的动力学质量是一个依赖于夸克动量的跑动的量, 不是一个常数。在动量很大时, 我们得到了夸克的流质量 $M = 5.1 \text{ MeV}$ 。而在动量 $p^2 = 0.1 \text{ MeV}$ 时, 我们得到了常用的组分夸克的质量 $M = 313 \text{ MeV}$ 。图 2 也给出了从夸克的流质量到夸克的组分质量的动力学变换。

5 存在的问题和研究前景

Dyson-Schwinger 方程^[1,5]的解依赖于胶子的传播子 $D_{\mu\nu}$, 夸克胶子顶点相互作用 Γ^ν 和求解耦合的 Dyson-Schwinger 方程时所采用的收缩方法 (Truncation)。在 QCD 的非微扰区里, 胶子的传播子是不知道的。顶点耦合 Γ^ν 需要从解 Bethe-Salpeter 方程 (BSEs)^[7] 来得到。可是 QCD 的非微扰性质使得求解 BSEs 方程变得十分复杂和困难, 人们无法精确地得到 BS 的 kernel。所以严格地求解 BSEs 方程实际上是无法办到的。再者, 收缩所用的彩虹近似也破坏了规范变化的不变性 (gauge invariance), 这是人们必须要付出的代价。

自然界没有自由夸克的存在, 因此夸克质量的定义也是不很明确的。有 3 种独立的定义: 矢量 Ward 等式的定义、轴矢量 Ward 等式的定义和夸克传播子的定义^[8]。怎样定义夸克的有效质量? 如何

解决非微扰 QCD 的问题? 这些都是要解决的重要问题。解决这些问题对粒子物理、核物理、检验 QCD 的正确性、发现新物理和寻找新粒子都有极其重要的科学意义和学术价值。

参考文献 (References):

- [1] He Xiaorong, Zhou Lijuan, Ma Weixing. *Commun Theor Phys*, 2005, **44**(4): 670.
- [2] Quang Hoim, Xuan-Yem Pham. *Elementary Particles and Their Interactions*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1998.
- [3] Thomas A W, Weise W. *The Structure of Nucleon*. John Wiley and Sons Press, 2002, 163.
- [4] Pan Jihuan, Meng Chengju, Zhou Lijuan, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2007, **24**(4): 258 (in Chinese). (潘继环, 蒙成举, 周丽娟等. *原子核物理评论*, 2007, **24**(4): 258.)
- [5] Dyson F J. *Phys Rev*, 1949, **75**: 1 736; Schwinger L S. *Proc Nat Sci*, 1951, **37**: 452; Roberts C D. *Prog Part Nucl Phys*, 2000, **45**: 611.
- [6] Zhou Lijuan, Ma Weixing. *Chin Phys Lett*, 2003, **20**: 2 137.
- [7] Salpeter E E, Bethe H A. *Phys Rev*, 1951, **84**: 1 232; Zhou Lijuan. *Quark Propagator, QCD Vacuum Condensates and Quark Virtuality* (Thesis for Master Degree in Physics). Nanning: Guangxi University, Aug. 2006. (周丽娟. 夸克传播子、QCD 真空凝聚和夸克虚度. 南宁: 广西大学, 2006, 8.)
- [8] Burden G J, Roberts C D, Thomson M J. *Phys Letts*, 1996, **B371**: 163.

On Quark Mass*

PENG Jin-song¹, ZHOU Li-juan², MA Wei-xing^{2, 3, #}

(1 Department of Physics and Engineering of Electronics, Hechi College, Yizhou 546300, Guangxi, China;

2 Collaboration Group of Hadronic Physics and Non-perturbative QCD Study;

Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China;

3 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 China)

Abstract: Importance, scientific significance of studying quark mass, and the production mechanism of quark mass have been pointed out. The quark mass is defined by quark propagator and from this definition we calculate effective mass of quark. Finally we also point out some open problems and perspective of this research field.

Key words: quark; quantum color dynamics; quark mass

* Received date: 19 Jun. 2007; Revised date: 31 Aug. 2007

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10565001, 10647002)

Corresponding author: Ma Wei-xing, E-mail: weixing_ma2002@sina.com