

介子电磁质量研究新进展^{*}

阎沐霖 高道能

(中国科学技术大学天文与应用物理系 合肥 230026)

摘要 综述了有关介子电磁质量研究的最新进展,讨论了作者最近提出的一种系统计算介子电磁自能的新方法,得到了一些很有意义的结果:确定了轻夸克的质量比,发现了 Dashen 定理对轴矢介子的推广以及 K^* 介子的电磁质量反常.

关键词 电磁质量,等效场论,轻夸克质量比

RECENT STUDIES OF THE ELECTROMAGNETIC MASS OF MESONS

Yan Mulin Gao Daoneng

(Department of Astronomy and Applied Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract Recent progress in studies of the electromagnetic mass of mesons, specially a new systematic method for calculating the electromagnetic self-energies, is reviewed. Some interesting results have been obtained, for example the mass ratios of the light quarks, the generalization of Dashen's theorem to the axial-vector sector, and the electromagnetic mass anomaly of massive Yang-Mills particles.

Key words electromagnetic masses, effective field theory, mass ratios of light quarks

1 引言

量子色动力学(简记为 QCD)的成功使得人们相信 QCD 将是强相互作用基本理论最有力的候选者. 在高能标下,微扰 QCD 的计算结果已经能对强作用作出很好的预言. 然而随着能量的降低, QCD 的耦合常数会变大,以致在能标为 1 GeV 左右时, QCD 的微扰计算完全失效,而且,在低能标下, QCD 场论的自由度——夸克和胶子已变得不再清晰,取而代之的是彼此之间存在着非常复杂相互作用的大量强子(包括介子和重子). 这就使得在中低能标下,依靠 QCD 理论的基本原理来处理与强相互作用相关的各种物理过程的研究变得非常富有挑战性而又饶有趣味.

所谓介子的电磁质量,就是指介子周围的

虚光子云对介子电磁能的贡献. 这一直是低能强相互作用物理领域的一个重要课题,因为理论粒子物理学家们至少出于以下两方面的目的:

(1) 人们已经知道,介子具有更深层次的结构. 在标准的量子场论中,它们不能以基本场的形式出现,它们实际上是更基本的场论自由度(如夸克和胶子)的束缚态或复合场. 这样,强子的电磁相互作用必然与夸克和胶子的强子化方式,即与低能强作用的动力学紧密相关. 因此介子电磁质量的研究有助于人们检验和深入理解强相互作用的低能动力学结构.

(2) 研究介子的电磁质量可用来确定轻夸克的质量比.

* 国家自然科学基金杨振宁专款资助项目

1998-12-02 收到初稿,1999-01-21 修回

迄今为止,物理学的发现认为,夸克是物质结构的最小单位.夸克质量是物理学的重要基本参量.但是由于夸克被“囚禁”在介子、质子、中子等强子之中,不能单独存在,因此夸克质量无法由实验直接测量,只能由强子的力学质量间接导出.强子的力学质量等于与夸克质量相关的“强作用质量”加上由于夸克参与电磁相互作用所造成的“电磁质量”,即:

强子力学质量 = “强作用质量” + “电磁质量”

“强作用质量”可用来确定夸克的质量.然而实验只能测量出强子的力学质量,不能把它的“强作用质量”与“电磁质量”部分分别测量出来.要将两者分开,必须求助于理论上的研究和计算.因此计算强子的“电磁质量”是精密确定轻夸克质量参数的关键.

由于介子的电磁质量的研究是对介子自相互作用电磁能的计算,这就不可避免地要涉及到来自介子-光子圈图的贡献.如何解决介子-光子圈图带来的紫外发散,一直是该领域研究中的一大困难.传统文献中的研究大致可归结为以下两类方法:

(1) 60年代, Das, Guralnik, Mathur, Low 和 Young^[1]采用流代数技术并借助于 Weinberg 第二求和规则来消除计算中出现的紫外发散.进一步的研究一直延续到 90 年代.

(2) 在文献[2]中,为了消除理论计算带来的发散,一些相应的抵消项被引入到计算中.

以上两类方法都存在一些缺陷.对第一类方法而言,Weinberg 第二求和规则有较大的近似性,因而导致计算中的紫外发散不能被真正消除.在第二类方法中,由于抵消项的引入,必然带来新的参数,从而增加了计算结果的任意性.然而更为严重的不足是,以上两类方法很难从非奇异介子的电磁质量的计算推广到奇异介子情形.因为对第一类方法,Weinberg 第二求和规则充其量只在手征极限下成立;对后一类方法,推广到奇异介子情形,必然要引入更多的抵消项,从而需要确定更多的参数.但是在奇异介子情形,较大的奇异夸克质量会给奇异介子的电磁自能带来有意义的贡献,这一点直接

影响到轻夸克质量比的确定.

我们提出了与传统文献中不同的处理方案^[3].在不引入新参数的前提下,成功地解决了介子电磁自能计算中的紫外发散困难,很自然地实现了从非奇异介子情形到奇异介子情形的推广,而且首次对矢量和轴矢介子的电磁质量进行了系统计算.

2 介子手征等效理论

直接从 QCD 的第一原理出发来计算低能介子的电磁自能是一个迄今为止尚未解决的问题.因此,在现阶段,构造符合 QCD 基本理论原则的低能等效理论并用以讨论低能介子的电磁质量是必要的,也是必需的.

手征对称性是 QCD 最重要的特性之一.在零质量夸克极限下(即 $m_u = m_d = m_s = 0$),轻夸克场将以光速运动,因此它们具有确定的左手或右手螺旋性,从而导致 QCD 的拉氏量存在严格的 $SU(3)_L \times SU(3)_R$ 手征对称性.这种对称性会自发破缺到对角 $SU(3)_V$ 味对称性并且伴随产生 8 个零质量的 Goldstone 玻色子 (π, K, η).这些 Goldstone 粒子(亦即赝标介子)主宰着强相互作用的低能动力学结构.手征微扰理论(CHPT)是一个在极低能标下严格成立的描述赝标介子物理的强相互作用理论.但是 CHPT 的预言能力会随着能标的提高而严重削弱,因此很有必要去研究能够较好地衔接强相互作用的高能和低能行为的等效介子模型.

手征夸克模型起源于 Schwinger 和 Weinberg 早年的工作,后来经由 Manohar 和 Georgi 进一步发展^[4].这一模型认为,在手征对称性自发破缺能标 ($\Lambda_{SB} \sim 1-2 \text{ GeV}$) 和色禁闭能标 ($\Lambda_{QCD} \sim 0.1-0.3 \text{ GeV}$) 之间的区域,场论的动力学自由度为组分夸克、胶子以及由手征对称自发破缺而来的 Goldstone 玻色子 (π, K, η),而且最重要的相互作用是夸克和 Goldstone 玻色子之间的耦合,胶子带来的效应很小,以致可以忽略.

1995 年, Li 更进一步扩充了手征夸克模

物理

型,将之发展成一个描述赝标、矢量和轴矢介子的强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用的等效场论,称之为 $U(3)_L \times U(3)_R$ 手征介子理论^[5]. 与其他的等效介子理论相比,该理论具有很少的可调参数:普适耦合参数 g 和动量截断. 这一理论在唯象学上取得了很大的成功,而且我们已经证明它的低能极限和 CHPT 等价. 特别是由于介子的电磁相互作用已经被非常自然和完整地建立,因而系统地计算赝标、矢量和轴矢介子的电磁质量修正成为可能.

3 赝标、矢量和轴矢介子的电磁自能及轻夸克的质量比

在 $U(3)_L \times U(3)_R$ 手征介子理论中,从与介子电磁作用相关的拉氏量 $L_i(\phi, \dots)|_{\phi=0}$ 出发,通过标准的量子场论方法就可以计算介子的电磁质量劈裂.

由 $L_i(\phi, \dots)|_{\phi=0}$, 我们可以得到 S 矩阵

$$S_{\phi} = \langle \phi | T \exp[i \int d^4x L_i(\phi, \dots)] | \phi \rangle_{\phi=0}$$

另一方面, S_{ϕ} 又可用 ϕ 场的等效拉氏量来表达:

$$S_{\phi} = \langle \phi | \int d^4x L_{\text{eff}}(\phi) | \phi \rangle$$

其中 $L_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \partial_{\mu} \phi \partial^{\mu} \phi - \frac{1}{2} m_{\phi}^2 \phi^2$. 因此对 ϕ 场的电磁质量修正为

$$m_{\phi}^2 = \frac{2iS_{\phi}}{\phi | \phi^2 | \phi}$$

这里 $\phi | \phi^2 | \phi = \phi | d^4x \phi^2 | \phi$.

当然,由于存在来自介子-光子圈图的贡献, S_{ϕ} 中不可避免会出现发散积分,而 $U(3)_L \times U(3)_R$ 手征介子理论又是一个不可重整的等效介子场论. 幸运的是,由于该理论的普适参数 g 中亦包含来自夸克圈积分的发散,我们发现可利用 g 来“因子化” S_{ϕ} 中出现的发散积分,从而得到介子电磁质量的合理的物理结果,而无需引入其他新的参数或抵消项来处

理计算中出现的发散.

详细的计算请读者参阅文献^[3], 这里我们只是概括一下这一研究的结果及其新颖之处:

(1) π, K, a_1, K_1 和 K^* 介子电磁质量差的数值结果(下标 EM 表示电磁质量)

$$(m^{\pm} - m^0)_{\text{EM}} = 5.3 \text{ MeV},$$

$$(m_{K^{\pm}} - m_{K^0})_{\text{EM}} = 2.5 \text{ MeV},$$

$$(m_{a^{\pm}} - m_{a^0})_{\text{EM}} = -0.57 \text{ MeV},$$

$$(m_{K_1^{\pm}} - m_{K_1^0})_{\text{EM}} = -1.1 \text{ MeV},$$

$$(m_{K^{*\pm}} - m_{K^{*0}})_{\text{EM}} = -1.76 \text{ MeV}.$$

(2) 这是一个对介子电磁质量无可调参数的自洽计算,揭示了有关赝标介子电磁质量的关系式——Dashen 定理的破缺程度. 这是精密确定轻夸克质量比的关键步骤. 首次对矢量和轴矢介子的电磁质量进行了系统计算,并发现 Dashen 定理可以推广到轴矢介子情形.

(3) 发现了中性 K^* 介子的电磁质量大于带电 K^* 介子. 这是起因于 Yang-Mills 场的奇特性,我们称之为 K^* 介子的电磁质量反常. 特别有意义的是实验支持这一新的发现.

(4) 确定了 u-夸克和 d-夸克的质量比为 0.44; s-夸克和 d-夸克质量比为 20.0. 近 20 年来,为了确定轻夸克的质量比,学术界做了大量的工作. 国际粒子物理权威评价机构——粒子物理数据组 1998 年夏天发布的“粒子物理述评^[4]”列出了其中重要的论文 14 篇, Weinberg 1977 年的文章为首篇,而以我们的研究作为该领域的最新论文.

参 考 文 献

- [1] Das T *et al.* Phys. Rev. Lett., 1967, 18:759—761
- [2] Ecker G *et al.* Nucl. Phys. B, 1989, 321:311—342
- [3] Gao D N, Li B A, Yan M L. Phys. Rev. D, 1997, 56: 4115—4132
- [4] Manohar A, Georgi H. Nucl. Phys. B, 1984, 234: 189—212
- [5] Li B A. Phys. Rev. D, 1995, 52:5165—5193

1) Review of Particle Physics, Particle Data Group, Eur. Phys. J C, 1998, 3:342