

量子色动力学与质量起源

卢昌海



七、量子色动力学

与戈德斯通、希格斯等人在对称性自发破缺方面的研究几乎同时,物理学家们在研究强相互作用上也取得了重大进展。经过十余年的努力,这些工作最终奠定了被称为量子色动力学的强相互作用理论。量子色动力学是一个以 $SU(3)$ 为规范群的杨-米尔斯理论,它所描述的费米子被称为夸克,是有质量粒子(但其质量在标准模型之内是不可约化的);传递相互作用的载力子则是无质量的,被称为胶子。

有读者可能会问:我们是不是离题了?既然量子色动力学中的胶子是无质量的,而夸克虽然有质量,但其质量是不可约化的。那么,量子色动力学与质量起源这一主题又能有什么关系呢?应该说,这是一个很合理的疑问。但量子色动力学的奇妙之处就在于,它形式上异常简洁,内涵却惊人地丰富。它宛如一坛绝世的佳酿,越品就越是回味无穷。在谈论质量起源问题的时候,人们往往把注意力放在包含希格斯机制的电弱统一理论上,因为希格斯机制在登场伊始就打出了质量产生机制的响亮广告。但事实上我们将会看到,看似与质量起源问题无关的量子色动力学对这一问题有着非常独特而精彩的回答,从某种意义上讲,这一回答才是标准模型范围内的最佳回答。

我们先来看看量子色动力学的拉氏量:

$$L = - (1/2) \text{Tr}(G^\mu G_\mu) + \sum_q \bar{q}(i \not{D}_\mu - m_q) q,$$

其中 q 为夸克场; $G_\mu = \partial_\mu A - \partial A_\mu - ig[A_\mu, A]$ 为规范场强; $D_\mu = \partial_\mu - igA_\mu$ 为协变导数; A_μ 为规范势; m_q 为夸克 q 的质量; g 为耦合常数;式中的求和遍及所有的夸克种类。自然界已知的夸克种类(也称为“味”)共有六种。其中 u, d, s 被称为轻夸克,质量分别约为 $1.5 \sim 3.0\text{MeV}, 3 \sim 7\text{MeV}$ 及 95MeV ; c, b, t 被称为重夸克,质量分别约为 $1.25\text{GeV}, 4.2\text{GeV}$ 及 174GeV 。其中的轻夸克质量是在 2GeV 的能标上定义的,重夸克的质量则是在其自身质量标度上定义的。这些质量参数本身在标准模型范围内是不能

约化的,但由这些夸克所组成的强子的性质,在很大程度上可以由量子色动力学来描述,这其中就包括强子的质量。在接下来的几节中,我们就来看一下量子色动力学对强子质量的描述,以及这种描述在何种意义上可以被视为是对质量起源问题的回答。

八、同位旋与手征对称性

我们知道,可见物质的质量主要来自于质子和中子,其中质子由两个 u 夸克及一个 d 夸克组成,而中子由一个 u 夸克及两个 d 夸克组成。在下面的叙述中,我们将只考虑这两种夸克。由于这两种夸克的质量远小于任何强子的质量,作为近似,我们先忽略它们的质量。这时的量子色动力学拉氏量为:

$$L = - (1/2) \text{Tr}(G^\mu G_\mu) + i\bar{u} \not{D}_\mu u + i\bar{d} \not{D}_\mu d.$$

显然,这一拉氏量在以下两个整体 $SU(2)$ 变换:

$$\exp(-it^a \tau^a), \quad \exp(-i^5 t^a \tau^a)$$

下是不变的,其中 $\tau = (u, d)^T$, t 是 $SU(2)$ 的生成元。这两个存在于 u 和 d 夸克间的对称性分别被称为同位旋对称性与手征对称性,记为 $SU(2)_V$ 与 $SU(2)_A$ 。其中,同位旋对称性 $SU(2)_V$ 只要夸克质量彼此相等(不一定要为零)就存在,而手征对称性 $SU(2)_A$ 只有在夸克质量全都为零时才具有(这一情形因此而被成为手征极限)。除此之外,这一拉氏量还存在一个显而易见的整体 $U_V(1)$ 对称性,它对应于重子数守恒,与夸克是否有质量,以及质量是否彼此相等都无关。综合起来,上述拉氏量具有整体 $SU(2)_V \times SU(2)_A \times U(1)_V$ 对称性。在这些对称性中,同位旋对称性 $SU(2)_V$ 与手征对称性 $SU(2)_A$ 所对应的守恒流分别为

$$V^{\mu a} = \bar{\tau} \tau^a \tau, \quad A^{\mu a} = \bar{\tau} \gamma^5 \tau^a.$$

显然在宇称变换下, $V^{\mu a}$ 是矢量、 $A^{\mu a}$ 是轴矢量。他们对应的荷 $(Q_V)^a = V^{0a} d^3x$ 与 $(Q_A)^a = A^{0a} d^3x$ 分别为标量及赝标量。

如果同位旋与手征对称性都是严格的对称性,那么 $(Q_V)^a$ 将生成强子谱中自 20 世纪 60 年代起逐步引导人们发现量子色动力学的同位旋对称性;而 $(Q_A)^a$ 则将生成所谓的手征对称性,它要求每一个强子都伴随有自旋、重子数及质量与之相同,而宇称却相反的粒子。这样的对称性在强子谱中从未被发现过。

对此,最容易想到的解释是:由于 u 和 d 夸克实际上并不是无质量的,因此手征对称性原本就不可能严格成立。事实上,不仅手征对称性不可能严格成立,由于 u 夸克和 d 夸克的质量彼此不同,连同位旋对称性也不可能严格成立。但是,考虑到 u 夸克和 d 夸克的质量相对于强子质量是如此之小,相应的对称性在强子谱中似乎起码应该近似地存在。对于同位旋对称性来说,情况的确如此(否则就不会有早年那些强子分类模型了)。但手征对称性却哪怕在近似意义上也根本不存在。举个例子来说,手征对称性要求介子三重态 (π) 与 $a_1(1260)$ 互为对称伙伴,但实际上这两者的质量分别为 775MeV 和 1230MeV ,相差悬殊(作为对比,同位旋伙伴的质量差通常都在几个 MeV 以下),连近似的对称性也不存在。

初看起来,事情似乎出了麻烦,但物理学家们却从中找到了一条探究低量子色动力学的捷径。正所谓“山重水复疑无路,柳暗花明又一村”。

九、手征对称性自发破缺

手征 $SU(2)$ 是量子色动力学拉氏量中的(近似)对称性,却在现实世界中完全找不到对应,这究竟是什么缘故呢?应该说,要猜测一下是不困难的,因为当时物理学家们已经知道对称性可以自发破缺。如果量子色动力学中的手征对称性是自发破缺的,显然就会出现这种拉氏量具有(近似)手征对称性,现实世界却并不买账的现象。但是,猜测归猜测,要想在理论上严格论证这一点——哪怕只是物理学意义上的严格论证——却是极其困难的。

读者可能会问:对称性自发破缺在电弱统一理论中用得好好的,为什么在量子色动力学中却变得“极其困难”了呢?这是因为在电弱统一理论中对称性自发破缺是由人为引进的希格斯场产生的,我们有一定的自由度来选择对称性破缺的方式。但量子色动力学并不包含这种人为引进的希格斯场,因此在量子色动力学中,整体 $SU(2)_V \times SU(2)_A \times U(1)_V$

对称性是否自发破缺?如果破缺,是否恰好是手征部分破缺,即破缺到 $SU(2)_V \times U(1)_V$? 都只能由理论本身来决定,而不是我们可以擅自假设的,正是这一特点使问题变得困难。更麻烦的是,手征对称性的破缺(如果存在的话)出现在量子色动力学的强相互作用区,即低能区。对于理论研究来说,无疑是雪上加霜。

另一方面,对称性破缺方式由理论本身所决定。虽然为量子色动力学带来一个艰深的理论问题,同时却也是它一个极大的理论优势。因为电弱统一理论之所以不能被认为是对质量起源问题令人满意的回答,一个很重要的原因就是希格斯场以及它与费米场之间的相互作用(汤川耦合)是人为引进的,从而带有许多自由参数。而量子色动力学没有那种类型的自由参数,因此它与观测之间的对比更为严酷:如果成功,将是极具预言能力的成功,因为自由参数越少,预言能力就越强;但如果失败,也将是无力回天的失败,因为自由参数越少,回旋余地也越小。

那么量子色动力学究竟能否实现从 $SU(2)_V \times SU(2)_A \times U(1)_V$ 到 $SU(2)_V \times U(1)_V$ 的对称性自发破缺呢?目前在理论上还是待解之谜。1979年,特霍夫特通过对规范理论中的反常进行分析,得到一个结果:即如果所考虑的整体对称性是 $SU(3)_V \times SU(3)_A \times U(1)_V$,那它就必须自发破缺。可惜,一来量子色动力学中的 $SU(3)$ 对称性远比 $SU(2)$ 对称性粗糙,二来这一结果也无法告诉我们具体哪一部分对称性会自发破缺。1980年,柯曼与威腾提出在某些合理的物理条件下,当色的数目 N_c 趋于无穷时,手征对称性必须自发破缺。这一结果虽然抓准了手征对称性,但可惜量子色动力学中的 N_c 不仅不是无穷,而且还很小($N_c=3$)。1984年,瓦法与威腾证明了未被非零夸克质量项所破缺的同位旋对称性不会自发破缺。可惜这一证明虽然表明特定的同位旋对称性不会自发破缺,却未对手征对称性是否一定会自发破缺提供说明。

虽然上述理论研究并未能证明 $SU(2)_V \times SU(2)_A \times U(1)_V$ 必定会破缺到 $SU(2)_V \times U(1)_V$,但它们都与这一对称性破缺方式相容,无疑还是大大增强了人们的信心。在物理学上,数学证明看似美妙,但有时却可望而不可及,物理学家往往并不总是依赖于它。迄今为止,虽然尚未有人能够给出手征对称性自发破缺的数学证明,但从这一破缺方式

已经得到的大量间接证据来看,它的证明应该只是时间问题。物理学家更感兴趣的是:如果手征对称性自发破缺,我们可以从中得到什么推论?有关这一点,人们做了细致研究。那些研究获得了极大成功,不仅给出了被称为手征微扰理论的描述低能量量子色动力学的有效场论,而且得到了一系列与实验相吻合的漂亮结果。这一切也反过来为手征对称性的自发破缺提供了进一步的间接证据。

下面我们就来看看由手征对称性自发破缺导致的推论中与质量起源问题关系最密切的部分。

十、贗戈德斯通粒子的质量

我们知道,对称性自发破缺最重要的推论之一是存在无质量的标量粒子,即戈德斯通粒子,它们与破缺对称性所对应的荷具有相同的宇称及内禀量子数。对于手征对称性来说,荷是 $(Q_A)^a$,它在时空中是赝标量,在内禀空间中则是矢量。因此相应的戈德斯通粒子的宇称为负,同位旋则为1。自然界满足上述特征的强子中质量最轻的是 π 介子(π^- 、 π^0 和 π^+)。如果手征对称性是自发破缺的, π 介子就应该是这一破缺所对应的戈德斯通粒子。但是,戈德斯通粒子是无质量的, π 介子却是有质量的,这一矛盾该如何解决呢?

我们知道,在理想的对称性自发破缺情形下,体系的实际真空态可以是一系列简并真空态中的任何一个。但是,量子色动力学中的手征对称性破缺却不是理想情形,因为量子色动力学的拉氏量含有手征对称性的明显破缺项,即夸克质量项。由于这种明显破缺项的存在,实际真空态的选取就不再是任意的了,明显破缺项的存在将会对实际真空态起到一个选择作用。这就好比一根立在桌上的筷子,如果桌子是严格水平的,它向任何一个方向倒下都是同等可能的,但如果桌子是倾斜的,它就会往倾斜度最大(梯度最大)的方向倒。用数学语言来说,如果 $V_1(\phi_a)$ ($a=1, \dots, N$)表示对称性的明显破缺项,那么它所选出的真空态将满足 $(\phi) (\partial V_1 / \partial \phi) = 0$,这一条件被称为真空取向条件。另一方面,明显破缺项的存在也破坏了戈德斯通定理成立的条件,由此导致的结果是戈德斯通粒子有可能具有非零质量,这样的粒子被称为贗戈德斯通粒子。真空取向条件是确定贗戈德斯通粒子质量的重要条件。贗戈德斯通粒子的出现消除了 π 介子的非零质量与戈德斯通粒子的零质量之间的定性矛盾。但在定量上

π 介子与贗戈德斯通粒子的质量是否吻合呢?我们现在就来看看。

对于量子色动力学中的手征对称性来说,对称性的明显破缺项为质量项,它可以改写成

$$V_1 = (1/2)(m_u + m_d) \bar{u}u + (1/2)(m_u - m_d)(\bar{u}u - \bar{d}d),$$

其中 $\bar{u}u = \bar{u}u + \bar{d}d$ 。其中第一项只破坏手征对称性,第二项则破坏同位旋对称性。在此基础上,考虑到不存在同位旋对称性自发破缺这一限制,可以得到贗戈德斯通粒子的质量为(这一结果也可以从手征微扰理论得到):

$$M^2 = \frac{m_u + m_d}{2F^2} \langle 0 | \bar{u}u - \bar{d}d | 0 \rangle,$$

其中 F 是一个量纲为能量的常数,由 $\langle 0 | A^{\mu a}(x) | b(p) \rangle = i p^\mu F^{ab} e^{-ipx}$ 定义。 F 被称为衰变常数,可以由 π 介子的衰变来确定,原则上也可以从理论上计算出,其数值约为92.4MeV。 $\langle 0 | \bar{u}u - \bar{d}d | 0 \rangle$ 是一个量纲为能量3次方的参数,被称为手征凝聚,目前人们对它的计算还较粗略,结果大致为 $\langle 0 | \bar{u}u - \bar{d}d | 0 \rangle = (270\text{MeV})^3 n_f$,其中 n_f 为参与凝聚的夸克种类,对于我们所考虑的情形 $n_f = 2$ (u 和 d 夸克)。 $m_u + m_d$ 通常取为8~9MeV。由此可得 $M = 140\text{MeV}$ 。这几乎正好就是 π 介子的质量(π^+ 的质量约为140MeV、 π^0 的质量约为135MeV)。当然,上述估算是相当粗略的,不能因为数值上的吻合而高估它的精度。但结合了格点量子色动力学计算的大量更为细致的研究表明,这种吻合并非偶然。

现在再次回到主题——质量的起源上来。我们看到,量子色动力学计算出了作为贗戈德斯通粒子的 π 介子的质量。如果我们想知道 π 介子的质量起源,这可以算是一种回答。可惜的是,这种回答与我们以前介绍的电磁自能具有相同的缺陷,那就是它正比于在理论中无法约化的外来参数——夸克质量。一旦外来参数不存在,这一回答就会失效。因此量子色动力学对 π 介子及其他贗戈德斯通粒子质量的计算虽然很漂亮,但从回答本原问题的角度看却仍不能令人满意。

十一、一个 93 分的答案

但是,当我们把目光转到更复杂,同时也更具现实意义的强子——质子和中子(以下合称核子)的质量时,却会看到量子色动力学的确为质量起源问题提供了一个非常精彩的回答。

计算核子或其他重子的质量是一个相当困难的低量子色动力学的问题,通常的做法是利用巨型计算机进行格点量子色动力学计算。但是由于技术上的限制,迄今为止,在这类格点量子色动力学计算中采用的 u 夸克和 d 夸克质量都在它们实际质量的 5 倍以上,由此得到的核子质量通常也要比实际值高出 30% 以上。

另一方面,与格点量子色动力学计算中夸克质量的“不可承受之重”截然相反,在前面提到的手征微扰理论中,夸克的质量却是越轻越好,甚至最好是零。显然,如果我们能在这两种极端之间作某种调和,借助手征微扰理论对格点量子色动力学计算进行适当外推,就有可能得到更接近现实世界的结果。这正是物理学家在计算核子质量时采用的手段。这种借助手征微扰理论对格点量子色动力学计算进行外推的方法被称为手征外推。利用手征外推得到的核子质量 $m_N = m_0 - 4c_1 m^2 + O(m^3)$ 。其中 $m_0 = 880\text{MeV}$, $c_1 = 1\text{GeV}^{-1}$, m^2 是介子的质量平方,如上节所述,正比于夸克质量。若干更高阶的项也已被计算出,这里就不细述了。将有关数据代入这一公式,可得 $m_N = 954\text{MeV}$,它与实际的核子质量(质子约为 938MeV 、中子约为 940MeV)相当接近。不仅如此,系统的计算(包括来自部分高阶项的贡献)还给出了许多其他重子的质量,比如 $m_{\Sigma^+} = 1192\text{MeV}$ (实验值约为 $^+1189\text{MeV}$ 、 $^01193\text{MeV}$ 、 $^-1197\text{MeV}$)、 $m_{\Sigma^0} = 1113\text{MeV}$ (实验值约为 1116MeV)、 $m_{\Sigma^-} = 1319\text{MeV}$ (实验值约为 $^01315\text{MeV}$ 、 $^-1321\text{MeV}$),都与实验吻合。这些结果表明,量子色动力学的确可以用来计算重子质量。

那么,从回答本原问题的角度看,这些计算是否令人满意呢?

从上面所引的核子质量公式中可以看到,上述核子质量有一个不同于费米子质量的至关重要的特点,那就是它在手征极限(即夸克质量为零)时不为零,而等于 $m_0 = 880\text{MeV}$ 。这个数值约为核子质量的 93%,它完全由量子色动力学所描述的相互作用所确定。这表明,即便不引进任何外来的夸克质量,量子色动力学仍能给出核子质量的绝大部分。由于宇宙中可见物质的质量主要来自核子质量,因此宇宙中可见物质质量的绝大部分都可以在不引进夸克质量的情况下,由纯粹的量子色动力学加以说明。从这个意义上讲,量子色动力学为质

量起源问题提供了一个独特而精彩的回答。这一回答不像电弱统一理论那样带有比所要解释的质量参数还要多的可调参数,因而非常符合回答本原问题的需要。不过,由于它只能给出核子质量的 93%,因此我们粗略地给它打 93 分。在标准模型的范围内,这是迄今所知的最佳回答。

93 分虽然是一个高分,但终究不是满分。为了寻找更接近满分的答案,我们不得不重新回到标准模型中不能约化的那些质量(包括使量子色动力学丢掉 7 分的夸克质量)上来。那些质量究竟来自何方?究竟还能不能约化?这些问题的答案(如果有的话)就只能到标准模型之外去寻找了。另一方面,量子色动力学对质量起源问题的回答基本限于可见物质,而可见物质在宇宙能量密度中所占的比例只有 4% 左右,那么其余 96% 左右的能量密度又来自何方呢?这也是物理学家正在积极研究的问题。

作者简介

卢昌海,1971 年出生于浙江杭州,1994 年毕业于上海复旦大学物理系,后赴纽约哥伦比亚大学从事理论物理学习及研究,2000 年获物理学博士学位。现旅居纽约。个人主页: <http://www.changhai.org/>。



科苑快讯

中法签署协议共建

“中法粒子物理实验室”

应法国有关方面的邀请,全国人大常委会副委员长、中国科学院院长路甬祥率领中国科学院代表团于 4 月 9~13 日访问法国。在法期间,路甬祥代表中国科学院与法国家科学研究中心、原子能委员会签署了共同建设“中法粒子物理实验室”的合作协议。

这项协议的签署为中法两国科学家在更广泛领域内的合作奠定了基础,除粒子物理外,双方科学家将积极推动在天体物理、加速器技术等相关研究领域的合作。根据协议,双方将在中国北京和法国巴黎各成立一个联合研究实验室,在实验室主任和联合指导委员会的领导下,以项目为基础展开研究活动并经常性地组织各种学术研讨会。预期,加入该项合作的中法科学家将达 250 余人。

(摘编自中国科学院网页新闻)

现代物理知识