

强相互作用理论的渐近自由 ——2004 年诺贝尔物理学奖介绍*

张 肇 西[†]

(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘 要 瑞典皇家科学院把 2004 年度的诺贝尔物理学奖授予了美国的戴维·格罗斯(David J. Gross)、戴维·玻利泽(H. David Politzer)、弗兰克·维里茨克(Frank Wilczek)三位理论物理学家,以表彰他们揭示出了强相互作用的渐近自由特性.文章按历史顺序,简要回顾了强相互作用理论——量子色动力学的基本“要素”.介绍了理论上如何得出强相互作用“渐近自由”和“渐近自由”的含义,引述了实验检验理论上的“渐近自由”最典型和最新的情况,展示了强相互作用“渐近自由”的高度正确性.介绍了基于“渐近自由”的微扰量子色动力学.指出“渐近自由”的发现和证实是确立量子色动力学为描述强相互作用的正确理论的依据,同时列举了当前量子色动力学的“色禁闭”等一些前沿问题.“渐近自由”的发现和证实确实深刻地影响了粒子物理,如量子色动力学成了标准模型的重要组成部分和导致相互作用的大统一理论等.

关键词 2004 年度诺贝尔物理学奖,强相互作用,量子色动力学,渐近自由

Asymptotic freedom in the theory of the strong interaction ——Comment on the Nobel Prize in Physics 2004

ZHANG Zhao-Xi (Chao-Hsi Chang)[†]

(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The 2004 Nobel Prize in Physics was awarded to David J. Gross, Frank Wilczek and H. David Politzer for their decisive contributions to the theory of the asymptotic freedom of the strong interaction (a fundamental interaction). The fundamental elements of quantum chromodynamics (QCD) and the theory of the strong interaction are briefly reviewed in their historical context. How to achieve asymptotic freedom is introduced and its physical meaning explained. The latest experimental tests of asymptotic freedom are presented, and it is shown that the theoretical prediction agrees excellently with the experimental measurements. Perturbative QCD which is based on the asymptotic freedom is outlined. It is pointed out that the theoretical discovery and experimental proof of the asymptotic freedom are crucial for QCD to be the correct theory of strong interaction. Certain frontier research areas of QCD, such as ‘color confinement’, are mentioned. The discovery and confirmation of asymptotic freedom has indeed deeply affected particle physics, and has led to QCD becoming a main content of the standard model, and to further development of the so-called grand unification theories of interactions.

Key words The 2004 Nobel Prize in Physics, strong Interaction, quantum chromodynamics, asymptotic freedom

瑞典皇家科学院把 2004 年度的诺贝尔物理学奖授予了美国的戴维·格罗斯(David J. Gross)、戴维·玻利泽(H. David Politzer)、弗兰克·维里茨克(Frank Wilczek)三位理论物理学家.表彰他们三十多

年前所取得的成就,首次揭示出了并被后来实验反复证实的强相互作用的“渐近自由”的特性^[1-3].

* 2004-11-29 收到初稿 2005-01-12 修回

† 通讯联系人. Email zhangzx@itp.ac.cn

1 强相互作用理论——量子色动力学

20 世纪初,人们发现了原子之中的大部分空间是“空”的,原子中心是由体积很小、却集中了原子的绝大部分的质量的原子核占据。接着发现原子核是由带电荷的质子和不带电荷的中子(质子和中子统称核子)强烈吸引和近距离互相排斥“堆积而成”。核物理测量表明,让若干个质子和中子互相吸引与排斥、并达到平衡的“堆积”状态、形成原子核的相互作用力的强度非常大,人们从一开始便称其为“强相互作用(强作用)”。在这种强相互作用力的作用下,不同的原子核所包含的核子数不同,核子之间的结合能也不相同,这种结合能平均值的大小,是决定原子核裂变和聚变时是释放能量还是吸收能量的判据。

到 20 世纪 50—60 年代,利用宇宙线和高能加速器,发现了一系列的介子和重子(统称为强子)。其中介子(自旋为整数 \hbar)有:派(π),凯(K),伊塔(η),柔(ρ),欧密伽(ω),费(ϕ)等等;重子(自旋为半整数 \hbar)中除了质子和中子外,还有:兰姆塔(Λ),西格玛(Σ),希塔(Ξ)和欧米伽(Ω)等相对稳定的超子及德塔(Δ),西格玛“星”(Σ^*),希塔“星”(Ξ^*)等“共振”重子(其寿命非常短,小于 10^{-24} s)等等,共计 100 多种。并且通过对这些强子质量和性质的分类,发现强子并不“基本”。当时发现的上百种的强子是由自旋为 $1/2(\hbar)$,所带电荷是电子电荷的 $\mp 2/3, \pm 1/3$ 的三种正、反夸克¹⁾组成的。介子是正反夸克的“束缚态”,重子是三夸克的束缚态。从重子中的 3 个夸克的对称性,正确解释 π 介子衰变到双光子的几率和高能 e^+e^- 湮灭到各种强子的总截面,明显表明夸克除了带有当时已知的量子数外,还应当具有新的量子数,对应着额外的自由度。这“新量子数”后来被称为“颜色”量子数。实际上,新的自由度取名“颜色”是为了区别已知的自由度,并表明这一量子数不同于许多可以代数相加的量子数。它与日常人们视觉中的颜色完全是两回事。应当在此强调,所有的强子是“无颜色(颜色中性)”的,都不具有这一量子数。

在解释 π 介子衰变到双光子的几率和高能 e^+e^- 湮灭到各种强子的总截面时,需要一个“额外”的因子 3,重子中的自旋为 $1/2$ 的夸克需要满足费米统计对称性,将此对称性的要求与因子 3 联系起来,最简单、最“平庸”的可能是“颜色”量子数所对

应的非对易的 $SU(3)$ 群规范对称性。作为带“颜色”的基本单元的夸克,可带有三种“颜色”($SU(3)$ 群的基础表示);类比颜色,人们分别用“红”、“蓝”和“绿”标记。在此之后的高能物理实验,完全证实了由 $SU(3)$ 群规范对称性对应“新自由度”的简单推理是正确的。

1954 年,杨振宁教授和他的合作者米尔斯(Mills)把对易的(即 $U(1)$)规范对称性“定域化”得到电磁相互作用的动力学理论(电动力学)的方法,推广到非对易(non-Abelian)的 $SU(2)$ 对称性的情形,把非对易的 $SU(2)$ 同位旋规范对称性“定域化”,建立起相应的动力学理论,即所谓的杨-米尔斯规范场理论。若将杨-米尔斯场的方法具体地应用到夸克的颜色 $SU(3)$ 规范对称性,所建立起的动力学被称为“色动力学”²⁾。类似对易的 $U(1)$ 规范场论即电动力学用来描述电磁相互作用,从一开始人们便推测色动力学可用来描述全部强相互作用。

在 20 世纪初期,量子力学诞生以后,量子化原理要求描述微观运动规律相应的动力学都需要量子化。在由规范对称“定域化”得到的动力学中,除了其中的自旋为 $1/2$ 的费米子(电动力学中的电子和色动力学中的夸克等)要量子化,同时规范场(电动力学中的电磁场和色动力学的“色”场)亦要按“标准”方法(例如路径积分方法)进行量子化。量子化了的电动力学称作为量子电动力学(QED),量子化了的色动力学称作为量子色动力学(QCD)。量子电动力学中传递相互作用的规范场粒子称为光子,在量子色动力学中,传递相互作用的规范场粒子被取名为“胶子”。当今,量子色动力学的“渐近自由”的发现和证实等,在确立量子色动力学为描述自然界

1)最初,夸克是在强子分类中根据数学上的需要提出来的。根据目前对物质微观结构的认识,夸克是已经认识的物质结构的最小单元(最低层次)的名称。最初从强子分类所认识的三种夸克是所谓的“轻夸克”。因为,1964—1965 年在夸克提出的当时情况下,国内科学家们率先把夸克作为物质结构的实体来看待,提出了由夸克组成的相对论性的强子模型。国内科学家们当时曾建议用“层子”代替“夸克”来称呼这物体最小单元,并把所提出的模型称为“层子模型”。可惜,由于文化大革命十年的停顿等主、客观原因,“层子”这一名称没有在上世界上流行开来。现在“夸克”已经是国内、外普遍被采纳的名称^[4]。

2)杨-米尔斯的原始论文所建立的是 $SU(2)$ 同位旋“非对易规范场。在现代电弱理论中的规范场恰巧包括了 $SU(2)$ 非对易规范场。杨-米尔斯场从 $SU(2)$ 到 $SU(3)$ 的“扩展”是平庸的。文献上把所有的非对易群的规范场都称为杨-米尔斯场。

基本相互作用之一的强相互作用的正确理论的地位上起了关键作用,使 QCD 构成了微观世界前沿理论的所谓的标准模型的主要组成,即 QCD 和电弱统一理论³⁾构成了标准模型的全部内容。

2 强相互作用的渐近自由

20 世纪 60 年代中期,著名物理学家毕约肯(J. D. Bjorken)猜测到高能轻子在核子上深度非弹性散射会出现“标度不变”(scalling)⁴⁾¹⁵⁾。不久他的猜测便被美国斯坦福电子加速器中心(SLAC)的电子在核子上的实验证实。实验结果确实显示出了近似的“标度不变”。这种“标度不变”意味着在核子中的夸克是“自由”的⁶⁾。这是强相互作用的“渐近自由”在理论上揭示之前,在实验上出现的先期迹象。

量子色动力学相应的拉格朗日量可由“定域”SU(3)对称性完全确定地写下来。它是十分简洁、紧凑的,可写做

$$L = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum \bar{\Psi}(iD_{\mu}\gamma^{\mu} + m)\Psi + L_{CF} + L_{FP}, \quad (1)$$

其中 $\Psi, \bar{\Psi}$ 和 m 分别是夸克的场,共轭场和质量; $G_{\mu\nu}^a = \partial_{\mu}A_{\nu}^a - \partial_{\nu}A_{\mu}^a + g \cdot f^{abc}A_{\mu}^b A_{\nu}^c$ 是颜色场张量; g 是无量纲的耦合常数,或称作“色”作用“荷”的强度; A_{μ}^a 是“色”规范场的矢量势; f^{abc} 是 SU(3) 群的结构常数($a, b, c = 1, \dots, 8$)⁵⁾ 是规范势的“色”指标; $D_{\mu} = \partial_{\mu} - ig\frac{\lambda^a}{2}A_{\mu}^a$ 被称为存在规范场时作用在夸克场上的“协变微分”; λ^a 作用在夸克上的“色”变换的矩阵(颜色基础表示),通常采用盖尔曼(Gell-Mann)定义; L_{CF} 是在色动力学量子化时需要引入的“规范固定项”,而 L_{FP} 是在量子化后可能出现的法捷耶夫-波波夫(Faddeev-Popov)项⁷⁾。 L_{CF} 和 L_{FP} 太专业,在此从略对它们的介绍。从(1)式的第一项,不难看出量子色动力学存在三点和四点的自作用。这是杨-米尔斯所特有的。

在杨-米尔斯非对易规范场提出后,在相当长的时期内,量子场论将其量子化遇到了技术困难,在多年的努力后才得以解决⁷⁾。但当人们认识到 SU(3) 色动力学可能作为描述强相互作用的理论之时,杨-米尔斯场的量子化的困难已经在理论上得到解决。不仅如此,量子化的非对易规范场的重整化理论,在历史上稍前于量子色动力学的电弱 L_{FP} 理论的进步过程中,也得到了解决。即如何将量子场论的高阶量子修正计算时所出现的高能无穷发散“吸收”

到几个实验观测量中去的方法已建立;同时证明了所有杨-米尔斯场都是“可重整化的”⁸⁾。

对于可重整化理论,在做重整化时,把所出现的高能无穷发散“吸收”到实验观测量中去的方法已确定,但仍存在着自由性。专业术语是重整化“点” μ (具有质量的量纲)的“选取”存在自由性。即对于自洽的可重整理论,对所有实验观测量的量子修正计算的公式看起来有些差异,但是数值的结果不会依赖重整化“点” μ 的选取。关于这一“自由性”,早在上世纪的 50 年代初,可以用“重整化群”的数学工具来描述,已经得到很好地解决。重整化群方法在揭示杨-米尔斯规范场的“渐近自由”特性中,起到了重要作用。

若 μ (具有质量的量纲)是一选定的重整化点,(1)式中的无量纲的耦合常数 g 重整化后记为 $g_R(\mu)$,应当是 μ 的函数。重整化群“告诉”我们,重整化后的耦合常数是被 $\beta(g_R(\mu))$ 函数控制,以下述微分方程“跑动”:

$$\mu \frac{d}{d\mu} g_R(\mu) = \beta(g_R(\mu)), \quad (2)$$

其中的函数 $\beta(g_R(\mu))$,在 $g_R(\mu)$ 小(所谓的微扰区)可以根据重整化理论,按圈图逐级地精确计算。

三位理论物理学家:戴维·格罗斯和弗兰克·维尔茨克¹⁾³⁾与戴维·玻利泽²⁾,率先计算了杨-米尔斯的 $\beta(g_R(\mu))$ 的单圈图表达式,具体到量子色动力学:

$$\beta(g_R) = -\frac{1}{(4\pi)^2} \beta_0 g_R^3 + \alpha(g_R^5) \quad (3)$$

和

$$\beta_0 = \frac{11}{3}C_G - \frac{4}{3}T_R N_f, \quad (4)$$

式中 $C_G = 3$, $T_R = 1/2$, 分别对应 SU(3) 的伴随表示和基础表示的卡雪米尔(Casimir)值;第一和第二两项分别对应胶子和夸克的量子圈的贡献。 N_f 是“有效”的夸克种类(味道⁶⁾)数。在此,只有质量低于 μ 的夸克才记为“有效”。三位物理学家指出,由于(4)式“色”SU(3)的 β_0 的整体正值和(3)式右方的负号,使得(3)式的解 $g_R(\mu)$ 有伴随 μ 的增长,以包含

3) 电弱统一理论是把电磁作用和弱作用(另一基本作用)统一的理论。有关的理论及实验,曾多次获得诺贝尔物理学奖。

4) 本来是二个具有质量量纲变量的函数“退化”为一个无量纲变量的函数的现象。

5) 这是“色”SU(3)所决定,对应“色”的八维伴随表示。

6) 夸克除了具有颜色、自旋量子数外,还具有所谓的“味道”量子数。至今已经发现的夸克仅有 u, d, s, c, b, t 六种。

$g_R(\mu_0)$ 和 $\ln\left(\frac{\mu}{\mu_0}\right)$ (μ_0 是具有质量量纲的适当常量, 将由实验测定), 即微分方程(2)式的解的确定方式下降, 有所谓的量子色动力学(高能的)的“渐进自由”性。

量子色动力学的高能“渐进自由”可以通俗地解释为: 该相互作用的强度随着相互作用的能量增加而变小。这一“渐进自由”性, 使得两个带颜色的客体(夸克、胶子等)随着对撞的能量增加, 它们互相感到对方和自己所带的“色荷”(实际上是耦合常数 g_R) 变小。根据量子力学测不准关系, 也可以表述为, 当两个带颜色的客体靠得越近(小距离, 小于 10^{-13} cm), 其“色荷”的有效(测量到)值将变得越小。

3 量子色动力学渐进自由的实验证实及其意义

直到 20 世纪 60 年代中期, 在高能电子在核子上深度非弹性散射实验中尚未证实比约肯(B. J. Bjorken)的“标度不变”的猜想之前, 强相互作用在高能(或小距离)时, 会有“渐进自由”的特性是难以想象的。但是, 当实验证实了比约肯的“标度不变”的猜想后, 和澄清了“标度不变”是“核子中的夸克是自由的”的反映, 人们关注强相互作用的“渐进自由”就变得十分自然了。

事实上, “渐进自由”是非对易规范(杨-米尔斯)场的共性; 而戴维·格罗斯和弗兰克·维尔茨克与戴维·玻利泽“两家”虽然都指出在杨-米尔斯规范场的自相互作用是“渐进自由”的关键, 但是在讨论“渐进自由”的物理应用时, 都首先把目光投向强相互作用的量子色动力学上。可见“渐进自由”的揭示是与实验证实比约肯“标度不变”分不开的⁷⁾。再次体现实验结果对理论的指导作用。

关于 β_0 的(4)式中的第一项正比 C_G , 对应量子色动力学中的胶子“自作用”的贡献, 在保证 β_0 值的正值起着“正(加强)”方向的作用; 第二项正比 T_R , 与带颜色的夸克联系, 在保证 β_0 值的正值中起着“负(抵消)”方向的作用。而且, 当夸克种类数 N_f 过大, 抵消掉了胶子自作用的贡献, 亦会失去“渐进自由”。因此, 在已知的物理时空中, 在可重整化的量子场(包括 QED)理论中, 除了杨-米尔斯(非对易规范)场外, 由于不存在规范场的“自作用”, 相应 β_0 值的(4)式的第一项不存在, 整个 β_0 值都为负值, 不会有“渐进自由”性。

如所预期, 利用量子色动力学“渐进自由”确实能够解释高能电子在核子上深度非弹性散射的近似“标度不变”, 并且能准确计算出实验观测到的“标度不变”的破坏的确切值。强作用耦合常数 $\alpha_s = \frac{g_R^2}{4\pi}$ 对 μ (或 E) 的依赖性亦可从理论上计算出来。图 1 是强作用耦合常数 α_s 对 μ (或 E) 的依赖性的理论值(精确到 NNLO 阶)与实验测量值(世界加权统计平均值)的对比。其中有阴影的曲线是理论计算值(阴影代表理论的不确定性), 图中空心圆点代表实验值。空心圆点上的竖“棒”代表实验误差。从图 1 可清楚地看到, 三位物理学家所揭示的“渐进自由”行为得到实验的充分证实。

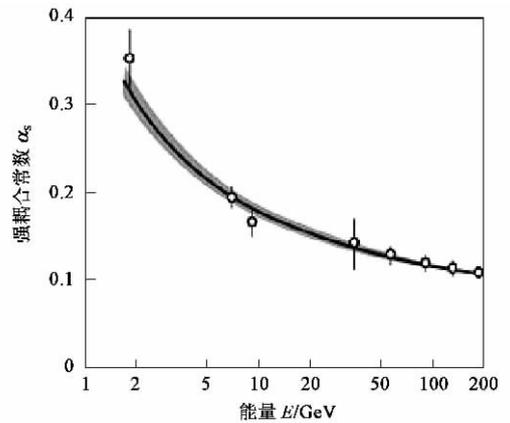


图 1 耦合常数 $\alpha_s = \frac{g_R^2}{4\pi}$ 对 μ (或 E) 的依赖, 其中有阴影的曲线是理论计算值(阴影代表理论的不确定性), 空心圆点代表实验值, 空心圆点上的竖线代表实验误差 (取自粒子表, 见 Phys. Rev. D 2002, 66: 010001—94)

还可以用另一方法检验量子色动力学的“渐进自由”性。即从完全不同的实验方法, 即不同能量下测量到的强耦合常数值, 再利用重整化群方程将所测量的强耦合常数“跑”到同一个重整化点, 例如 $\mu = M_Z$ (M_Z 中性弱玻色子质量), 对比是否得到应该相同的数值。以此方法检验量子色动力学的“渐进自由”的情形如图 2 所示。从图 2 可见, 32 种实验测量到的强耦合常数 α_s 在误差范围内是相同的, 证实了“渐进自由”的正确性。

历史上, 只有被实验证实的理论才会获得诺贝尔奖。

三位物理学家揭示出了强作用具有“渐进自由”的特性, 开辟了量子色动力学的重要应用: 在高

7) 文献 [13] 甚至在摘要中便明确指出: “渐进自由”可以说明实验中观测的强相互作用的标度不变。

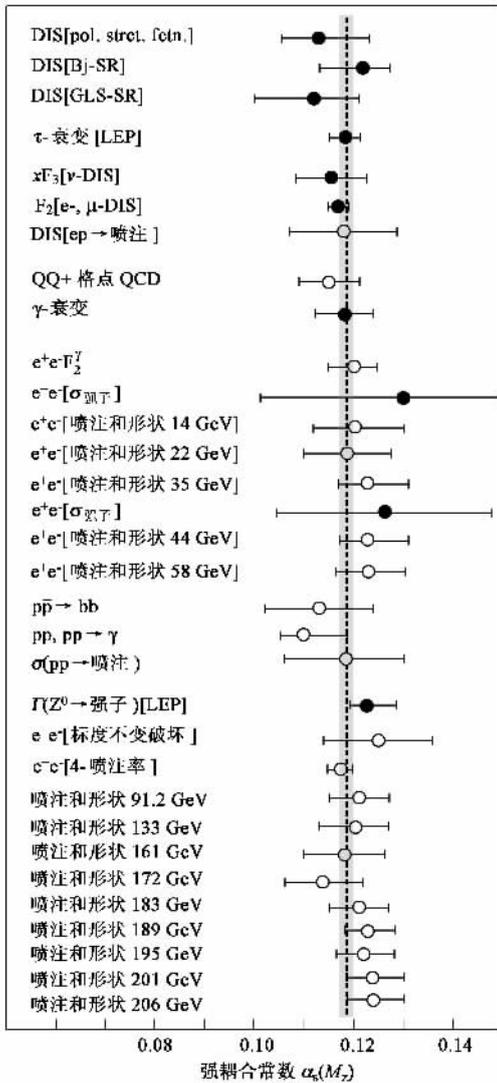


图2 强耦合常数 $\alpha_s(M_z)$ 从不同实验测出的值,空心圆点代表中心实验值,穿过空心圆点的短线代表误差 (取自 hep-ex/040721 by S. Bethke)

能情况下,实际上在重整化点 $\mu \geq 1.5 \text{ GeV}$ $\alpha_s(\mu) \leq 1$ 时,强作用过程可以利用微扰方法进行“逐级”地计算.在“逐级”计算的基础上,还可以应用各种技巧把所得结果重新求和(resummation),得到更加精确的理论预言.这方面应用的进展也都得到实验证实.量子色动力学理论在高能、小距离方面取得许多成功,已经发展得相当成熟.文献上称其为微扰量子色动力学(PQCD).微扰量子色动力学的成功是确立量子色动力学是强相互作用的正确理论的重要依据.

在此应当指出,在计算(3)式中的 $\beta_{g_R}(\mu)$ 时,只能在 $\alpha_s(\mu) \leq 1$ 时进行.这意味着微扰量子色动力学的理论预言越趋于高能(小距离)越好;而且到了低能(大距离) $\alpha_s(\mu) \geq 1$ 时,预言不再适用.在微

扰量子色动力学适用的范围内,若把“渐近自由”反过来推论,带“颜色”客体间的作用,越趋于低能(大距离),作用的强度变得越大.但是,这种“反推”只能进行到 $\alpha_s(\mu) \leq 1$,即微扰量子色动力学仍能适用的范围内.

尽管能量、动量和各种量子数守恒允许观测到单独的带“颜色”的客体:夸克和胶子等,但实验上只单独观测到“颜色”中性的客体:强子.带“颜色”的夸克和胶子只能在强子的内部,以束缚的形态,或者以一束强子,被称作“喷注(jet)”的形式所观测.现在人们称这一现象为“色禁闭”⁸⁾.由于“色禁闭”现象,影响到微扰量子色动力学的应用.在应用微扰量子色动力学时,“色禁闭”带来了困难.理论上,绕过(解决)这一困难的办法是采用“因子化”的办法,即把整个物理过程因子化为3个因子:“碎裂函数”、“结构函数”和可采用微扰量子色动力学计算的夸克和胶子间的“硬”反应(产生,湮灭,散射等)的因子.整个过程的计算结果是把这些因子“卷积”起来.碎裂函数是描述有“渐近自由”的夸克、胶子“碎裂”成为强子的几率;结构函数是描述从参加高能过程的强子中将“渐近自由”的夸克或胶子“取出”来的几率的.在大多数情况下,二者包含了“色禁闭”等非微扰效应,是理论上不能计算的⁹⁾;但它们不依赖所计算的具体过程,是“普适”的,可由实验直接测量出来的.而可采用微扰量子色动力学方法计算的“渐近自由”的夸克和胶子间的“硬”反应过程(产生,湮灭,散射等)是与所计算的整体过程相关的,使得整个计算依赖所计算的具体过程.

把三位物理学家所揭示的“渐近自由”反推,在低能、大距离下,夸克、胶子之间的作用变强,是与“色禁闭”的趋势一致的.但是,这种“反推”是有限度的.“色禁闭”涉及的问题超出了微扰量子色动力学适用范围,进入了非微扰量子色动力学的范围,所

8) 实验上观测不到带色的客体(例如夸克和胶子),只能观测到“色中性”(“无色”)的强子的现象,这被归纳称为“色禁闭”.

9) 多年前,人们一直认为结构函数和碎裂函数包含了非微扰效应,都是理论上不可以计算的.但是,我国科学家于1992年在世界上率先发现重夸克到所谓的双重味介子的碎裂函数可以进一步因子化出一个可以微扰计算的因子,而再“剩下”的因子,尽管包含了非微扰效应,却能利用建立在QCD之上的位势模型的波函数描述,使整个碎裂函数可以理论计算了,同时还给出了从b夸克到双重味介子 B_c 的实例^[9].可见关于双重味介子的碎裂函数的计算是例外,从而打破了以前“不可以计算”的结论.所以在此只好说“在大多数情况下,二者包含了‘色禁闭’等非微扰效应,是微扰量子色动力学方法不能计算的”.

以“色禁闭”的问题是不能靠微扰量子色动力学来解决的。目前最“无懈可击”的处理非微扰效应的方法是所谓的“格点量子色动力学”(lattice QCD),但它需要利用计算机模拟,现代计算机的计算能力距离解决“色禁闭”还差得很远。“色禁闭”是否真能用格点量子色动力学解决?总之,“色禁闭”仍是目前理论上未解决的难题。

无疑“渐近自由”特性的揭示、证实和应用是量子色动力学的巨大成功(即微扰量子色动力学的巨大成功),有力地证明了量子色动力学是描述强相互作用的正确理论。尽管当前量子色动力学存在着许多所谓非微扰待解决问题,例如:需要证明“色禁闭”,需要揭示量子色动力学可能的物态:手征对称恢复和手征破缺态,极端高温、极端高密度下的夸克-胶子等离子态等,和从量子色动力学来解决核力,原子核中的问题等是量子色动力学的前沿研究课题。但是,他们不影响人们对量子色动力学是描述强作用的正确理论的信念。

强相互作用是基本相互作用之一。“渐近自由”的揭示,使人们能够采用微扰方法处理高能下的这一基本相互作用主导的过程,以及电弱过程中它的影响。“渐近自由”的揭示,为量子色动力学描述强作用奠定了坚实的基础。同时,所揭示出的仅有杨-米尔斯量子场自作用对 $\beta(g(\mu))$ 贡献实质上是负

的,对于人们认识杨-米尔斯量子场具有重要意义。除了开辟了量子色动力学本身前沿的研究课题外,同时推动了电、弱、强三种基本相互作用的统一等方面的研究。因此,强相互作用、杨-米尔斯量子场的“渐近自由”获得诺贝尔奖早已是在人们预料之中的,三位物理学家获得2004年度诺贝尔物理学奖是一件非常“顺理成章”的事情。

参 考 文 献

- [1] David J. Gross, Frank Wilczek. Phys. Rev. Lett. ,1973 ,30 : 1343
- [2] H. David Politzer. Phys. Rev. Lett. ,1973 ,30 :1346
- [3] David J. Gross, Frank Wilczek. Phys. Rev. D, 1973 ,8 : 3633
- [4] 原子能,1966年,第3期,第7—8期;北京大学学报(自然科学版),1966年,第2期;1966年暑期北京国际物理讨论会上的报告;Hung-yuan Tzu(朱洪元),Reminiscence of the Straton Model,Proceedings of the 1980 GUANGZHOU Conference on Theoretical Physics, Litton Educational Publishing, P4
- [5] J. D. Bjorken. Phys. Rev. ,1969 ,179 :1547
- [6] J. D. Bjorken, E. A. Paschos. Phys. Rev. ,1969 ,185 :1975
- [7] L. D. Faddeev, V. M. Popov. Phys. Lett. B, 1967 ,25 :29
- [8] M. J. G. Veltman. Nucl. Phys. B, 1968 ,7 :637; G. t'Hooft. Nucl. Phys. B, 1971 ,35 :167; G. t'Hooft, M. J. G. Veltman, Nucl. Phys. B, 1972 ,44 :189; G. t'Hooft, M. J. G. Veltman. Nucl. Phys. B, 1972 ,50 :318
- [9] Chao-Hsi Chang(张肇西), Yu-Qi Chen(陈裕启), Phys. Rev. D, 1992 ,46 :3845; Erratum. Phys. Rev. D, 1994 ,50 : 6013

· 物理新闻和动态 ·

${}^6\text{Li}$ 费米原子气中的配对能隙

在超导体中,为了拆散一个库珀对,必须提供某种激发能,这一能量的下限即所谓能隙。超导能隙可以通过光电子能谱实验进行测量。 ${}^6\text{Li}$ 原子其质子、中子和电子的总数是奇数 q ,因此属于费米原子。除非 ${}^6\text{Li}$ 原子两两结成库珀对,它们不可能共同占据量子力学的基态,实现玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)。

自从1995年在玻色原子气系统中实现了BEC,该领域的科学家们就一直致力于使费米原子气凝聚。2004年年初,美国实验室天体物理联合研究所的Jin D等取得了重要进展(参阅Science 2004年2月6日,第741页)。最近,来自奥地利Innsbruck大学的Grimm R等宣称,他们已在超冷 ${}^6\text{Li}$ 原子气中看到了库珀对形成的证据。

研究者用单束激光偶极阱捕获原子,并通过磁捕获下的蒸发冷却,将双组分(即处于不同的塞曼子能级) ${}^6\text{Li}$ 原子气的温度降低到理论BEC温度($T_{\text{BEC}} = \hbar(\omega_r^2\omega_z M/1.202k_B^3)^{1/3}$)的40%,即500nK以下,其中 ω_r 和 ω_z 分别是径向和轴向磁捕获的频率, M 是阱中 ${}^6\text{Li}$ 原子对的数量。接着,实验者用微波照射凝聚物,测量激发谱,进而导出配对 ${}^6\text{Li}$ 原子在凝聚体中的百分比以及库珀对的束缚能。按照Feshbach共振理论, ${}^6\text{Li}$ 原子间的二体相互作用可以通过外加磁场 B 加以调节。当外场达到共振值时,库珀对的能隙开始出现。Grimm等的实验展示了能隙对外场、温度以及费米能级的依赖关系。在更低的温度下,未配对的原子不复存在,研究者认为,系统进入了超流态。2001年诺贝尔物理学奖获得者Ketterle W高度评价Innsbruck大学的这一进展,但同时指出,要想证明系统进入了超流态,还需要更多的证据,例如观察量子涡旋。

(戴闻 编译自 Science 2004 ,305 :459 和 WWW.ScienceMag.org/cgi/content/abstract/1100818)