

量子色动力学的历史

哈拉尔德·弗里奇 著

麦迪娜·阿布里克木 译 邢志忠 校

本文作者哈拉尔德·弗里奇 (Harald Fritzsch) 是量子色动力学 (简称 QCD) 的奠基人之一。他回忆了 40 年前 QCD 理论发展的一些历史背景。

六十多年前, 实验上发现了许多新粒子, 特别是四个 Δ 共振态, 六个超子和四个 K 介子。 Δ 共振态是在核子- π 介子对撞中由美国伯克利的辐射实验室发现的, 其质量大约为 1230 MeV。超子及 K 介子是在宇宙线实验中被发现的。

默里·盖尔曼 (Murray Gell-Mann) 和尤瓦·尼曼 (Yuval Ne'eman) 利用 SU(3) 群的对称性体系成功地描述了这些新粒子。SU(3) 群是矩阵行列式为 1 的 3×3 么正群。SU(3) 对称性是同位旋对称性的延伸, 后者是由沃纳·海森伯 (Werner Heisenberg) 在 1932 年引入的。同位旋对称性用 SU(2) 群来描述。

实验上观测到的强子态可按 SU(3) 群的特殊表示分类。重子可以填充在八重态和十重态里, 而介子则属于 SU(3) 群的八重态和单态。重子八重态包含两个核子, 三个 Σ 超子, 一个 Λ 超子和两个 Ξ 超子 (如图 1 所示)。介子八重态的成员是三个 π 介子、

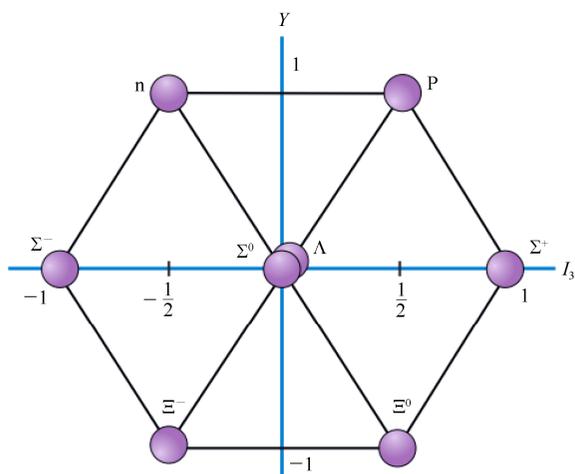


图 1 重子基态的 SU(3) 八重态

η 介子、两个 K 介子和两个 \bar{K} 介子。

1961 年, 人们已经知道了包含四个 Δ 共振态在内的九个重子共振态。这些共振态不可能是一个八重态的成员。盖尔曼和尼曼指出, 这些共振态应该用 SU(3) 的十重态来描述, 但其中缺了一个粒子。他们预言了这个 Ω^- 粒子的存在, 其质量约为 1680 MeV, 应该会很快被发现。1964 年, 尼古拉斯·塞缪斯 (Nicholas Samios) 与他的合作组在美国布鲁克海文国家实验室观测到了这个粒子。因此重子共振态是 SU(3) 十重态的成员。

当时不清楚的是, 为什么最简单的 SU(3) 群表示 (即三重态表示) 的成员没有在实验上被发现。这些粒子会有非整数的电荷, $+2/3$ 或 $-1/3$ 。

夸克模型

1964 年, 盖尔曼和费曼的博士生乔治·茨威格 (George Zweig) (后者当时正在欧洲核子研究中心 CERN 工作) 提出了重子与介子是假想的三重态粒子的束缚态的想法。盖尔曼称该三重态粒子为“夸克”。夸克一词曾出现在詹姆斯·乔伊斯 (James Joyce) 的小说《芬尼根的守灵夜》 (Finnegans Wake) 中。

由于夸克组成一个 SU(3) 三重态, 所以必须存在三种夸克: 一个上 (u) 夸克 (电荷为 $+2/3$), 一个下 (d) 夸克 (电荷为 $-1/3$) 和一个奇异 (s) 夸克 (电荷为 $-1/3$)。质子是两个 u 夸克和一个 d 夸克组成的束缚态 (uud), 而中子是由两个 d 夸克和一个 u 夸克构成的束缚态 (ddu)。 Λ 超子的内部结构是 uds。三个 Σ 超子包含一个 s 夸克和两个 u 夸克或两个 d 夸克 (uus 或 dds)。 Ξ 超子是由 uss 和 dss 构成的束缚态。 Ω^- 是三个 s 夸克的束缚态。八个介子是夸克和反夸克组成的束缚态。

在夸克模型中, SU(3) 对称性的破坏可以用夸克的质量项来实现。奇异夸克的质量比两个非奇异夸

克的质量大，这就解释重子八重态、重子十重态和介子八重态内在的质量差别。

色自由度的引入

1970年夏天，我在阿斯彭（Aspen）物理中心度过了一段时光，在那里遇到了盖尔曼并同他一起工作（图2）。当年的秋季，我们研究了美国斯坦福直线加速器中心（SLAC）所获得的有关电子和原子核的深度非弹性散射实验的结果。一般情况下反应截面依赖于虚光子的质量和能量转移。然而，SLAC的实验发现，在高能过程中反应截面仅依赖于光子质量与能量转移的比值。这一结果证明了詹姆斯·比约肯（James Bjorken）所预言的“标度行为”。



图2 默里·盖尔曼（右）与哈拉尔德·弗里奇

在SLAC的实验中，两个电磁流的对易子的核子矩阵元是在类光距离被测量的。我和盖尔曼假设该对易子可以从自由夸克模型中提炼出来，并推导出光锥流代数。利用此代数，我们能够理解标度行为。在把夸克等价于部分子的情况下，我们得到了与理查德·费曼在他的部分子模型中所得到的结果完全相同的结果。由于QCD理论的渐近自由性质，随后的研究表明光锥流代数在QCD理论中几乎是正确的。

Ω^- 是由三个奇异夸克组成的束缚态。由于它是基态，其空间波函数应该是对称的。三个夸克自旋取向一致，给出 Ω^- 的自旋。如果两个夸克互相交换，那么 Ω^- 的波函数不变。然而，根据泡利不相容原理，该波函数必须是反对称的。这对于夸克模型而言是一个大问题。

1964年，奥斯卡·格林伯格（Oscar Greenberg）引入所谓的“秩三超常统计”（parastatistics of rank

three)来讨论夸克不遵从泡利不相容原理的可能性。在此情况下，泡利不相容原理没有问题，但不清楚的是超常统计能否在夸克的场论中成立。

两年以后，韩武杨和南部阳一郎考虑了九种夸克而不是三种。这些夸克的电荷是整数。在该模型中有三个u夸克，其中两个夸克的电荷为1，第三个夸克的电荷为0，因此它们的平均电荷为2/3。相应的对称群为 $SU(3) \times SU(3)$ ，假设其对称性被严重地破坏掉。相关的规范玻色子具有质量和整数电荷。

1971年，我和盖尔曼找到了一个解决上述统计问题的不同方案。正如韩武杨和南部阳一郎所做的那样，我们也考虑了九种夸克，但是假设三种同类夸克具有一个新的、守恒的量子数，我们称之为“色”量子数。 $SU(3)$ 色对称性是一种严格的对称性。我们假设强子波函数为“色”群的单态。重子波函数具有反对称的色指标，标记为红（r）、绿（g）和蓝（b）：

$$(qqq) \rightarrow (q_r q_g q_b - q_g q_r q_b + q_b q_r q_g - q_r q_b q_g + q_g q_b q_r - q_b q_g q_r)$$

如果两个夸克互相交换，重子波函数会因此改变符号，就像泡利不相容原理所要求的那样。同样，介子波函数也是色单态：

$$(\bar{q}q) \rightarrow (\bar{q}_r q_r + \bar{q}_g q_g + \bar{q}_b q_b)$$

高能正负电子湮没到强子的截面依赖于夸克电荷的平方和色的数目。三种色导致：

$$\frac{\sigma(e^+ + e^- \rightarrow \text{hadron})}{\sigma(e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-)} \rightarrow 3 \left[\left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 \right] = 2$$

假如没有色自由度的话，这个比值将等于2/3。然而实验结果与比值等于2相一致。

1971~1972年间，我和盖尔曼在CERN工作。我们与威廉·巴丁（William Bardeen）一起研究中性 π 介子衰变到两个光子的电磁过程。当时人们都知道，夸克模型所预言的衰变率比测量值小了大约九倍——这是夸克模型所遭遇的另一个问题。

$\pi \rightarrow 2\gamma$ 衰变的振幅用三角费曼图来描述，其中夸克-反夸克对可以虚产生，随后再湮没到两个光子。引入色量子数后，我们发现该衰变振幅增大三倍，每一种色对振幅的贡献都是同样大的。对于三种色而言，衰变率的理论值恰好比夸克模型的结果增大 $3^2 = 9$ 倍，这就与实验结果相一致了。

1972年春季，我们开始把“色”群解读为规范群，所导致的规范理论类似于量子电动力学（简称

QED)。夸克之间的相互作用是由我们称之为胶子的无质量“色”规范玻色子的八重态来产生的。我们后来把该理论叫做“量子色动力学”，简称为 QCD。一年后，我们与汉里奇·劳意特维勒（Heinrich Leutwyler）一起发表了该理论的详细结果。

在 QCD 理论中，胶子不但与夸克相互作用，而自身也存在相互作用。这种胶子与胶子之间的直接相互作用很重要，它会导致耦合常数随着能标的增高而减小，即该理论是渐近自由的。QCD 的渐近自由性质是由赫拉尔德斯·特霍夫特（Gerardus't Hooft）于 1972 年（未发表）以及戴维·格罗斯（David Gross）、戴维·波利泽（David Politzer）和弗兰克·维尔切克（Frank Wilczek）于 1973 年分别发现的。因此在能量很高时夸克和胶子的行为几乎如同自由粒子。这导致了深度非弹性轻子-强子散射的截面具有近似的标度行为。高能夸克的所作所为几乎与自由粒子无异。

强相互作用耦合常数随能标的对数减小依赖于 QCD 的能标参数 Λ 。该参数是一个自由参数，只能由实验来测定。目前的实验值为 $\Lambda = 213^{+38}_{-35}$ MeV。在 SLAC、DESY 和 CERN 的大型正负电子对撞机（LEP）以及在美国费米实验室的正负质子对撞机（Tevatron）等实验中，已测量到了 QCD 耦合常数随能量的增加而减小的行为（图 3）。利用 LEP 实验也可以在 Z 玻色子的质量阈附近更精确地确定 QCD 耦合常数： $\alpha_s(M_Z) = 0.1184 \pm 0.0007$ 。为了说明问题，考虑只有一个重夸克 Q 的 QCD 理论是有帮助的。在这种假想的情况下，基态介子是夸克与反夸克的束缚态。当夸克与它的反夸克之间的距离很短时，其有效势为库仑势，正比于 $1/r$ ，其中 r 是夸克与反夸克之间的距离。然而，在长程的情况下，胶子的自相互作用变得很重要。胶子的场线在长程时不像电动力学中的电力线那样扩散。相反，它们互相吸引。因此夸克和反夸克由一串胶子场线连接起来（图 4）。夸克与反夸克之间的力为常数，也就是说它不像在电动力学中那样随距离增大而减小。夸克是禁闭的。该图像是否也适用于轻夸克？这仍旧是一个尚未解决的问题。

在正负电子湮灭过程中，虚光子产生一个夸克和一个反夸克，它们以高速运动，远离对方。由于夸克的禁闭性质，所产生的介子（主要是 π 介子）差

不多在同一方向运动。夸克和反夸克“碎裂成片”，产生两个粒子喷注。每一个喷注中粒子的能量及动量的总和应等于初始夸克的能量，即等于每个碰撞轻子的能量。1978 年，这些夸克喷注第一次在 DESY 实验室被发现（图 5）。费曼在 1975 年就已经预言了这类喷注。

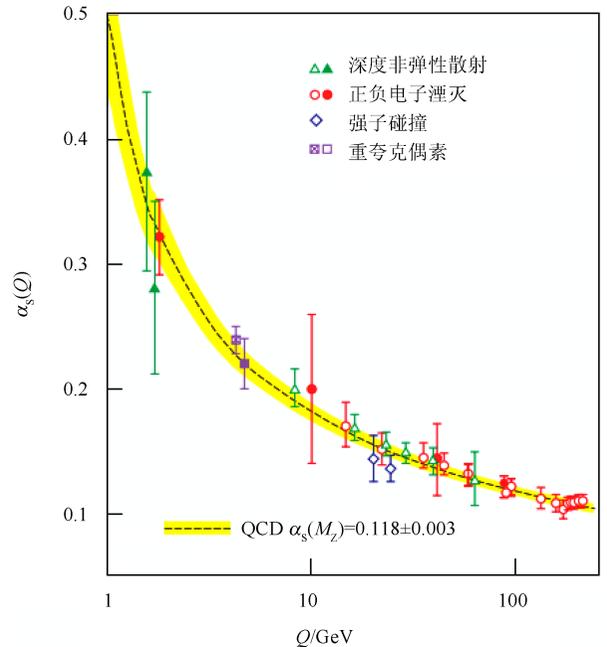


图 3 强耦合常数作为能标的函数

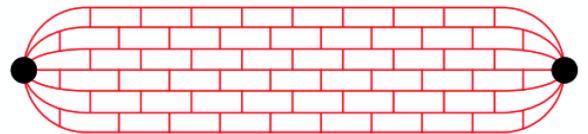


图 4 两个重夸克由胶子弦连接

如果一个夸克对产生于正负电子湮灭，那么 QCD 预言其中一个夸克有时会放出一个高能胶子。胶子也将碎裂成片并产生一个喷注。所以有时候应该会产生三个喷注的事例。1979 年，这种现象在 DESY 实验中被观测到了（图 5）。

QCD 的基本量子为夸克和胶子。两个色八重态的胶子可以形成一个色单态，这样的态是一个中性胶子偶素介子态（即所谓的胶球）。胶子偶素介子的基态所具有的质量大约为 1.4 GeV。在只包含重夸克的 QCD 理论中，这种态是稳定的；但在现实世界中，这种态将会与中性的、由夸克和反夸克组成的介子态相混合，并迅速衰变到 π 介子。迄今为

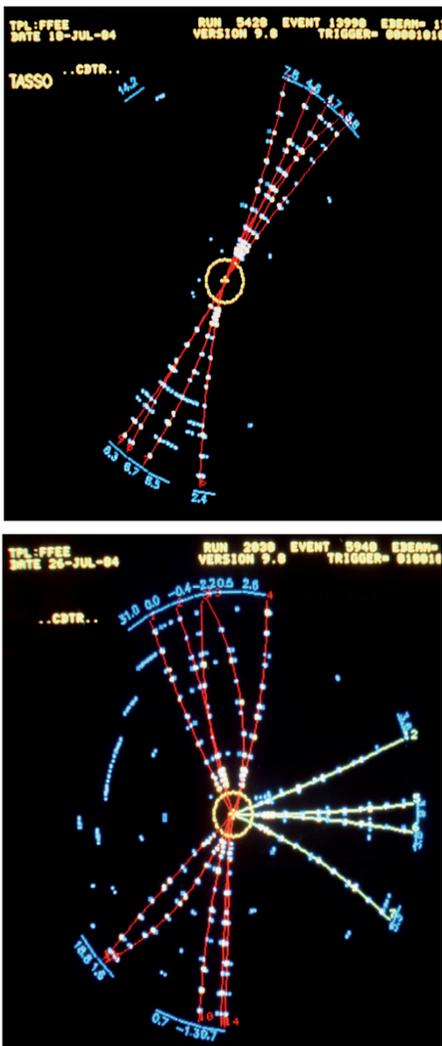


图5 DESY 实验测量到的夸克二喷注事例（上）和三喷注事例（下）

止，实验上还没有明白无误地确定胶子偶素介子态的存在。

在 QCD 中，最简单的色单态强子是重子和介子，它们分别由三个夸克以及正反夸克对组成。然而，还有其他方式形成色单态。两个夸克可以处在一个反三重态，它们可以与两个反夸克构成一个色单态。结果就是一个由两个夸克和两个反夸克组成的介子，这样的介子叫做四夸克态。三个夸克可以处在一个色八重态，一个夸克或一个反夸克也可以处在色八重态——它们合在一起可以形成一个色单态的强子，包含四个夸克合一个反夸克。这样的重子叫做五夸克态。到目前为止，实验上还没有明确地观测到四夸克态的介子和五夸克态的重子。

人们当初引入了三种夸克来描述“味”的 SU(3)

群所给出的对称性。然而，我们现在知道实际上存在六种夸克：三种轻夸克 u、d、s 和三种重夸克 c（粲）、b（底）、t（顶）。这六种夸克构成电弱对称群 SU(2)的三个二重态：

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \leftrightarrow \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \leftrightarrow \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}.$$

在 QCD 中，夸克的质量为任意参数，就像 QED 中轻子的质量一样。既然夸克不像自由粒子那样存在，它们的质量就不能直接被测量。不过可以用观测到的强子质量来估算夸克质量。在 QCD 中，夸克的质量依赖于所取的能标。在能标为 2 GeV 时，夸克质量的典型值为：

$$m_u = 0.004 \text{ GeV}, m_c = 1.2 \text{ GeV}, m_t = 174 \text{ GeV},$$

$$m_d = 0.006 \text{ GeV}, m_s = 0.1 \text{ GeV}, m_b = 4.4 \text{ GeV}.$$

t 夸克的质量很大，类似于金原子的质量。由于质量太大，t 夸克通过弱相互作用衰变，其寿命小于形成一个介子所需的时间。因此不存在由 t 夸克所组成的强子态。

QCD 理论是关于强相互作用及核力的正确的场论。强子与原子核都是夸克、反夸克和胶子的束缚态。值得注意的是，一个简单的规范理论就可以描述强相互作用的复杂现象。

（中国科学院高能物理研究所 100049）

本文译自 CERN COURIER，2012 年 10 月，第 52（8）卷

