

“粲”量子数的诞生*

邢志忠[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2025-01-15 收到

† email: xingzz@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20250302

CSTR: 32040.14.wl20250302

The birth of quantum number “Charm”

XING Zhi-Zhong[†]

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

摘要 1964年6月，布约肯和格拉肖合作完成了题为“基本粒子与SU(4)对称性”的论文，提出一种全新的量子数：“粲”量子数，对应一种全新的基本粒子——当时还属于假想粒子的“粲”夸克。但是随后的各种高能物理实验始终没有观测到“粲”强子，直到1974年11月，由粲夸克及其反粒子构成的束缚态——“粲夸克偶素”J/ψ粒子被丁肇中和里克特各自带领的实验组独立发现。这一在粒子物理学史上称作“十一月革命”的重要发现，成就了夸克物理学“2G”时代的辉煌，也深刻影响了中国高能物理实验和理论研究的发展进程。

关键词 粲夸克，粲强子，粲夸克偶素

Abstract In June 1964, James Bjorken and Sheldon Glashow proposed a brand-new quantum number “charm” in their paper entitled “Elementary particles and SU(4)”. This new quantum number implied a new elementary particle, the hypothetical charm quark that had not been observed in various high-energy physics experiments until November 1974, when the charmonium J/ψ—formed by charm quark and its antiparticle—was independently discovered by Sam Ting and Burton Richter. This great discovery, known as the “November Revolution”, is an important milestone in the history of particle physics. It not only meant that the glorious “2G” era of quark physics started, but also had a high impact on the development of experimental and theoretical particle physics in China.

Keywords charm quark, charmed hadrons, charmonium

1 “粲”猜想的合理性

1964年初，美国理论物理学家盖尔曼(Murray Gell-Mann)和青年学者茨威格(George Zweig)各自提出了关于重子和介子的内在组分的模型^[1, 2]，即SU(3)夸克模型。尽管利用上夸克(up)、下夸克(down)和奇异夸克(strange)及其反粒子足以

描述当时已经发现的众多强子态，但该模型的成功却凸显了夸克和轻子之间的“不对称”，即形成了三种夸克“对阵”四种轻子的局面，尽管它们参与带电流弱相互作用的行为非常相似。

从1897年电子的发现到1962年缪子型中微子的发现，时至1964年的轻子家族包含电子 e^- 、电子型中微子 ν_e 、缪子 μ^- 和缪子型中微子 ν_μ 及其反粒子，呈现出完整的“2G”(两代)模式。这两套轻子参与带电流弱相互作用的方式具有明显的一

* 国家自然科学基金(批准号: 12075254)资助项目

致性，如图1所示。将电子和电子型中微子换成上夸克u(电荷+2/3)和下夸克d(电荷-1/3)，并考虑夸克混合因子 $\cos\theta_c$ ，就构成了这两种夸克参与带电流弱相互作用的基本顶点；同样的置换在SU(3)夸克模型中也适用于上夸克u和奇异夸克s(电荷-1/3)，如图2所示，尽管相应的相互作用顶点应包含夸克混合因子 $\sin\theta_c$ 。夸克混合角 $\theta_c \approx 13^\circ$ 是由意大利物理学家卡比博(Nicola Cabibbo)在1963年引入的^[3]，它描述了夸克的强相互作用态(即质量本征态)和弱相互作用态(也称为“味”(flavor)本征态)之间的“不匹配”。在标准模型的框架内，这种“不匹配”源自两代夸克同时与希格斯场和规范场发生相互作用而形成的难以调和的“三角关系”。

为何不存在一种与上夸克同电荷的第四种夸克，从而实现夸克和轻子之间相互呼应的“2G”图像呢？如果自然界存在这样一种拥有“粲”量

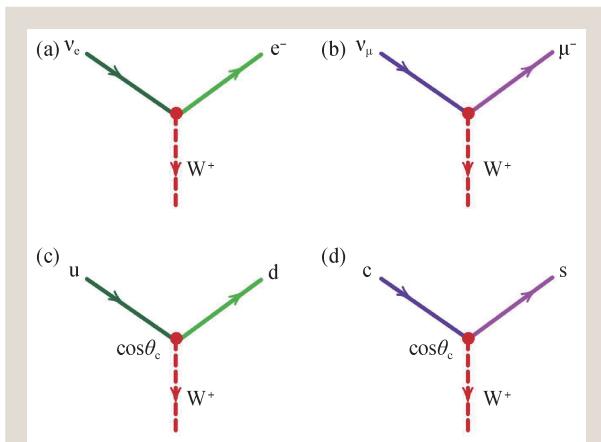


图1 (a, b) 电子、缪子以及与其相关的中微子参与带电流弱相互作用的基本顶点；(c, d) 对应的上夸克、下夸克和粲夸克、奇异夸克的带电流弱相互作用顶点及其卡比博因子。这里轻子处于味本征态，而夸克处于质量本征态

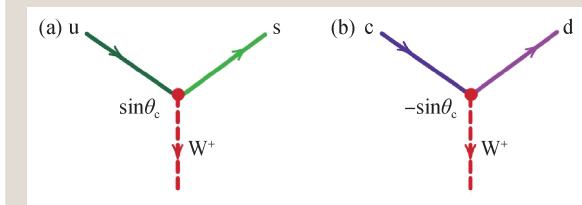


图2 上夸克、奇异夸克(a)和粲夸克、下夸克(b)的带电流弱相互作用顶点，及其相应的混合因子。这里夸克处于质量本征态

子数的新夸克“c”，那么可以预期它与奇异夸克和W⁺玻色子的耦合顶点包含夸克混合因子 $\cos\theta_c$ ，而它与下夸克和W⁺玻色子的耦合顶点应包含夸克混合因子 $-\sin\theta_c$ ，如图1(d)和2(b)所示，从而保证两代“上型”夸克(u和c)和两代“下型”夸克(d和s)的带电流相互作用项中出现的是2×2幺正矩阵，其中的混合角就是卡比博角。这种朴素的“夸克—轻子”对称性正是布约肯和格拉肖在1964年提出“粲”量子数的初衷之一^[4]。但另一方面，粲夸克的质量应该远大于当时已知的三种夸克的质量，因而包含粲夸克的强子很难被20世纪60年代那些能量还不够高的高能加速器所发现。

其实早在1962年6月，即缪子型中微子被发现之际，日本名古屋学派的三位物理学家牧二郎(Ziro Maki)、中川昌美(Masami Nakagawa)和坂田昌一(Shoichi Sakata)就写出了两代中微子的2×2幺正混合矩阵^[5]，这为后来中微子振荡理论的建立奠定了重要基础。他们的研究工作也旨在追求“2G”轻子和“2G”坂田强子模型之间的结构对称性和统一性。

2 “GIM机制”的成功

将SU(3)夸克模型推广到SU(4)情形的动力学意义直到1970年初才令人信服地体现在著名的GIM机制中，后者是由格拉肖与希腊物理学家伊利奥保罗斯(John Illiopoulos)以及意大利物理学家马亚尼(Luciano Maiani)合作提出的^[6]。他们在题为“具有轻子—强子对称性的弱相互作用”(Weak interactions with lepton-hadron symmetry)的论文中，首次将SU(4)夸克模型与温伯格(Steven Weinberg)1967年创立的关于轻子的电弱统一理论有机地结合在一起^[7]，这再次凸显了三位理论物理学家对轻子和夸克之间潜在的对称性的高度重视。

既然粲夸克由于质量较大而暂时无法在当时的高能物理实验中被直接产生和探测，那么利用量子效应“间接”确认它的存在就成为一条切实可行的途径。典型的例子之一就是研究中性K介

子的“纯轻”衰变 $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 过程，如图 3 所示^[8]。该衰变属于“味”改变的中性流过程，只能通过单圈费曼图发生，其实验测量值远小于 $SU(3)$ 夸克模型的理论预言。

结合图 1、2 和 3 可以看出，在 $SU(4)$ 夸克模型的框架内， $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰变的两个费曼图所对应的夸克混合因子大小都等于 $\cos \theta_c \sin \theta_c$ ，但符号相反。倘若上夸克 u 和粲夸克 c 的质量值比较接近，那么图 3 中两个衰变振幅之和将彼此严重相消，从而强烈压低该反应发生的概率。事实上，只要这两种“上型”夸克的质量都远小于 W^\pm 玻色子的质量 M_W ，即便是 m_c 远大于 m_u ，也能导致图 3 中的两个振幅彼此相消得足够小，这就是 GIM 机制的精髓所在^[7]。基于这一简单明了的物理图像，可以利用该衰变的实验测量数据反过来限制粲夸克质量的大致取值范围，并得到 $m_c \sim 2 \text{ GeV}$ 的初步结果。

换句话说，引入粲夸克的理论操作不仅使得夸克和轻子之间拥有了相互平行的 $SU(4)$ 对称性，而且一举摆脱了 $SU(3)$ 夸克模型本身无法压低“味”改变中性流过程的困境。后者在动力学上是非常不平庸的，从而使得粲夸克的存在具有了更基本的理论意义。粒子物理学的发展历程一再表明，新自由度的引进如果无助于有效解决现有理论框架中的重大难题，即无助于使相关的理论变得更完备和更强有力，那么它最终被实验证伪的概率一定非常大。正如美国凝聚态物理学家安德森(Philip Anderson)所强调的那样，“多则不同”(more is different)的那种“多”^[9]，才具有深刻的科学意义，否则“多”出来的就是与自然界无关的平庸自由度以及探索新物理之路上的“垃圾”。

温伯格曾在 2012 年夏天提及，他在 1967 年没有将夸克纳入自己的电弱统一理论的主要原因，是由于他当时并不相信夸克模型^[10]。直到 1973 年，当格罗斯(David Gross)和韦尔切克(Frank Wilczek)课题组以及波利策(David Politzer)分别基于夸克模型证明了强相互作用具有渐近自由的神奇属性后^[11, 12]，温伯格才完全接受夸克作为物质世界的基本组分。这是一位大理论家对待新自由

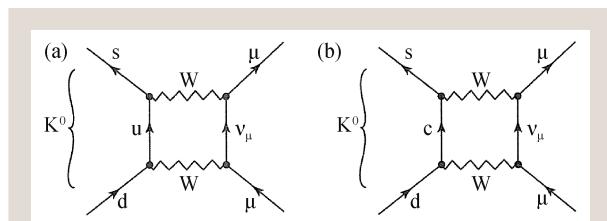


图 3 中性 K 介子的“纯轻”衰变过程 $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 的费曼图^[8]。这里省略了与 Z^0 和 H^0 相关的单圈费曼图

度的鲜明态度，但最终的判据只能来自实验物理学家。

1974 年 11 月，丁肇中和里克特领导的团队分别在布鲁克海文国家实验室的质子轰击固定靶实验和斯坦福直线加速器中心的正负电子对撞实验中，独立发现了由正反粲夸克构成的“J”(丁)粒子和“ψ”粒子^[13, 14]，即众所周知的“ J/ψ ”粲夸克偶素。仅一年之后，里克特实验组的成员之一佩尔(Martin Perl)就在同一台对撞机上发现了第三种带电轻子——陶轻子 τ ^[15]。1976 年，丁肇中和里克特因发现粲量子数而荣获诺贝尔物理学奖；佩尔也由于发现陶轻子而在 1995 年获得了诺贝尔物理学奖。1989 年，作为第一代“陶—粲粒子工厂”的北京正负电子对撞机和北京谱仪开始运行取数，就此拉开了中国高能物理实验进入国际前沿的序幕。

3 费米子的“3G”时代

粲夸克的实验发现标志着人类对基本粒子的认知从此进入了 GeV 能区。1977 年，美国物理学家莱德曼(Leon Lederman)领导的合作组在费米实验室利用高能质子轰击固定靶，发现了由第五种夸克——电荷为 $-1/3$ 、质量比粲夸克大了约三倍的底夸克(bottom)及其反粒子构成的束缚态^[16]。陶轻子和底夸克的实验发现使得轻子和夸克先后进入了“3G”时代。但与底夸克相配、电荷为 $+2/3$ 的顶夸克(top)和与陶轻子相伴的陶子型中微子 ν_t ，直到 1995 年和 2001 年才分别在费米实验室的正反质子对撞机上被发现^[17-19]。这些“多”出来的第三代基本费米子令人期待，但它们有助于使粒子物理学的标准模型更完备吗？

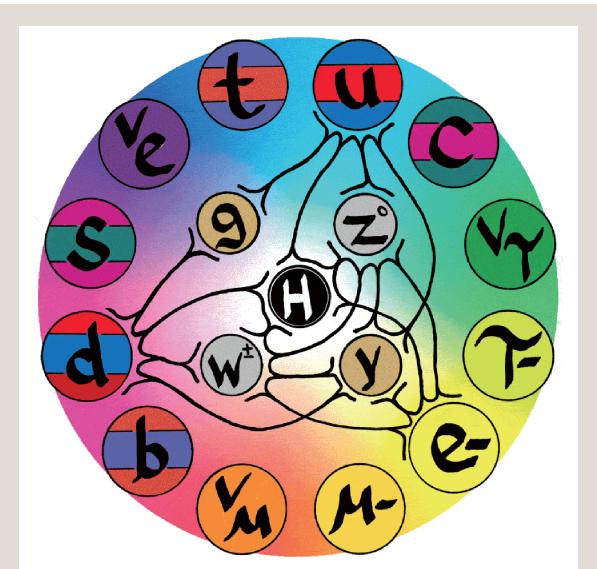


图4 粒子物理学的标准模型所包含的基本费米子和基本玻色子(图片来自网络)

答案是肯定的！其实早在粲夸克尚未被发现的1973年，日本名古屋学派的两位年轻弟子小林诚(Makoto Kobayashi)和益川敏英(Toshihide Maskawa)就大胆预言了标准的电弱统一理论应该包含三代由电荷 $+2/3$ 和 $-1/3$ 的夸克构成的二重态，而出现在带电流弱相互作用项的 3×3 幺正“味”混合矩阵含有三个实混合角和一个复相位，后者是该理论框架中唯一导致电荷共轭(C)和宇称(P)联合变换不变性(CP)发生破坏的根源^[20]。之所以要付出一次性引入三种新粒子及其相关参数的高

昂代价，原因在于他们发现了“多则不同”的动力学收益——只有当夸克家族的成员数目达到“3+3”的规模，理论中才会出现不可约的CP破坏相位，从而造成物质和反物质之间的不对称或不平等。

与布约肯和格拉肖的 $SU(4)$ 夸克模型相比，小林诚和益川敏英的 $SU(6)$ 夸克模型以更大的尺度扩充了标准模型的基本费米子内容。两者在动力学上都取得了极不平庸的成功，分别解决了 $SU(3)$ 夸克模型所面临的无法压低“味”改变中性流过程和无法提供CP破坏的来源这两大理论难题，因此所引入的新自由度都在标准模型中找到了自己的位置并最终被实验所证实。如图4所示，6种夸克和6种轻子平行地构成了标准模型的“物质”粒子部分，它们与传递相互作用的“力”粒子共同揭示了大自然的微观奥秘。

物理学大师温伯格在1983年提出了“理论物理学进展三定律”^[21]，其中第三定律在很大程度上反映出他本人在探索新物理的历程中对引进新自由度的谨慎态度，值得后来人借鉴：“你可以采用自己喜欢的任何自由度去描述一个物理系统，但如果你采用了错误的自由度，你会后悔的”(You may use any degrees of freedom you like to describe a physical system, but if you use the wrong ones, you will be sorry!)。

参考文献

- [1] Gell-Mann M. Phys. Lett., 1964, 8:214
- [2] Zweig G. CERN-TH-401, CERN-TH-412, 1964
- [3] Cabibbo N. Phys. Rev. Lett., 1963, 10:531
- [4] Bjorken B J, Glashow S L. Phys. Lett., 1964, 11:255
- [5] Maki Z, Nakagawa M, Sakata S. Prog. Theor. Phys., 1962, 28:870
- [6] Glashow S L, Iliopoulos J, Maiani L. Phys. Rev. D, 1970, 2:1285
- [7] Weinberg S. Phys. Rev. Lett., 1967, 19:1264
- [8] Griffiths D. Introduction to Elementary Particles. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008
- [9] Anderson P. Science, 1972, 177:393
- [10] Baggott J. Higgs. Oxford University Press, 2012
- [11] Gross D, Wilczek F. Phys. Rev. Lett., 1973, 30:1343
- [12] Politzer D H. Phys. Rev. Lett., 1973, 30:1346
- [13] Aubert J J et al. Phys. Rev. Lett., 1974, 33:1404
- [14] Augustin J E et al. Phys. Rev. Lett., 1974, 33:1406
- [15] Perl M et al. Phys. Rev. Lett., 1975, 35:1489
- [16] Herb S W et al. Phys. Rev. Lett., 1977, 39:252
- [17] Abe F et al. Phys. Rev. Lett., 1995, 74:2626
- [18] Abachi S et al. Phys. Rev. Lett., 1995, 74:2632
- [19] Kodama K et al. Phys. Lett. B, 2001, 504:218
- [20] Kobayashi M, Maskawa T. Prog. Theor. Phys., 1973, 49:652
- [21] Weinberg S. Why the Renormalization Group is a Good Thing. In: Guth A H, Huang K, Jaffe R L eds. Asymptotic Realms of Physics: Essays in Honor of Francis E. Low. MIT Press, 1983