

探索物质微观结构的历史回顾*

——纪念夸克提出50周年

刘金岩[†]

(中国科学院自然科学史研究所 北京 100190)

History of the investigations into the micro-structure of matter

——50th anniversary of the quark model

LIU Jin-yan[†]

(Institute for the History of Natural Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2014-04-22收到

[†] email: jyliu@ihns.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20141106

摘要 1964年盖尔曼和兹威格分别提出“基本粒子”由夸克或艾斯组成。至今,这一领域仍是粒子物理研究的前沿领域。经过50年的发展,夸克(艾斯)理论取得诸多辉煌成就。文章简要地回顾了夸克的提出过程及随后实验和理论方面的进展。

关键词 粒子物理, 盖尔曼, 兹威格, 夸克, 标准模型

Abstract The concept that quarks (or aces) are the fundamental building blocks of "elementary particles" was proposed independently by Gell-man and Zweig in 1964. Since then, the field has always been at the frontier of particle physics. After 50 years of development, numerous outstanding achievements both in experiment and theory have been accomplished. In this paper, how the quark (or aces) was proposed and the subsequent development of theoretical and experimental investigations are briefly reviewed.

Keywords particle physics, Murray Gell-Mann, George Zweig, quark, standard model

1 引言

1964年,对于粒子物理学家来说,是不同寻常的一年。这一年,克罗宁(Cronin)和菲奇(Fitch)发现了中性K介子弱衰变过程存在电荷宇称(CP)对称性破缺,这对解释宇宙中物质和反物质不对称性意义重大;这一年,布鲁特(Brout)、恩格勒特(Englert)和希格

斯(Higgs)提出的使基本粒子获得质量的BEH机制,使人们对质量起源的研究更进一步;还是这一年,盖尔曼(Gell-Mann)提出“基本粒子”由夸克(兹威格也独立提出类似的想法,并将其称为艾斯)组成,拉开了探索物质更微观结构的序幕。50年过去了,夸克一词已被大众耳熟能详,与之相关的工作多次获得诺贝尔物理学奖。本文简要回顾夸克的提出过程以及随后实验和理论方面所取得的进展。

2 一度“混乱”的粒子物理学界

物理学家始终致力于探索物质微观结构。电子、质子、中子、正电子以及 π 介子的相继发现,使得物理学家一度认为已经找到构成物质的基本组元。但是,宇宙线实验和人造加速器实验使得越来越多的新粒子被发现。所有这些粒子都是基本粒子的可能性越来越小。

* 国家自然科学基金(批准号: 11205105)资助项目

20世纪中期的粒子物理学界处于一个“混乱不堪”的时期。当时通常以希腊字母命名新粒子。有物理学家抱怨说，学植物命名法都比记住所有新粒子的名字容易。冯·诺依曼(Von Neumann)建议在用完希腊字母后可以用“普尔曼式客车(Pullman cars)的名字来为新粒子命名”。奥本海默(Oppenheimer)则建议将这些新发现的粒子称为“亚原子动物园”。不过，此时的物理学家们还没能力将那些野兽放入兽笼并贴上标签。该时代的科学作家喜欢说：“粒子物理真的需要一位门捷列夫。”美国物理学家戈德哈伯(Gerson Gold-

haber)描绘的20世纪50年代和60年代发现新粒子的情景如图1所示。

π 介子发现后，部分物理学家开始怀疑所有这些新粒子是否都是基本粒子。1949年，费米(Fermi)和杨振宁指出^[1]：“在最近几年发现了几个新的粒子，它们一般被假设为基本的，也就是根本没有结构的。所有粒子确实都是基本粒子的可能性，随着它们数目的增加变得越来越少了。”二位提出了基本粒子的第一个复合模型，认为介子是由一个核子和一个反核子构成的复合粒子。但该模型只能部分地解释介子的质量谱，不能解释介子的短寿命

和重子结构问题。

实验方面，在1947年进行的宇宙线研究中，观察到了“奇异”粒子。这些“奇异”粒子总是通过强相互作用协同产生，通过弱相互作用过程衰变，即快产生、慢衰变。物理学家起初对此无法解释，故将其称为“奇异”粒子。1954年，盖尔曼(Gell-Mann)^[2]和中野-西岛(K. Nishijima)^[3]各自提出了奇异数的概念来解释这种“奇异”现象。进而，他们发现电荷 Q 、奇异数 S 与同位旋第三分量 I_3 之间存在 $Q=I_3+(B+S)/2$ 的关系。日本物理学家坂田昌一(Sakata)研读了费米-杨模型，开始研究基本粒子结构问题。为了解决在费米-杨模型的框架内从动力学上理解奇异数所面临的困难，坂田昌一于1956年提出质子 P 、中子 n 和 Λ 粒子是基本粒子。三种基本粒子构成已知的介子和重子^[4]。在坂田昌一模型中把“奇异数”这一数学概念用 Λ 粒子的个数来代替，克服了奇异数理论的唯一性质。坂田昌一模型能够较好地解释介子族，不过对重子族却难以自圆其说。

基于奇异数守恒定律，利用群论的 $SU(3)$ 对称性，盖尔曼于1961年提出了强子按质量和电荷等性质分类的方法——“八重法”^[5]。之所以命名为“八重法”，一方面是由于8个粒子填入 $SU(3)$ 群的8维表示，另一方面还由于受到东方佛学文化中的佛学符号的影响，即源自于古印度佛学教义中的“八正道”¹⁾。图2即为介子八重态、重子八重态和重子十重态示意图。盖尔曼并不是唯一试图用群论来理解“粒子动

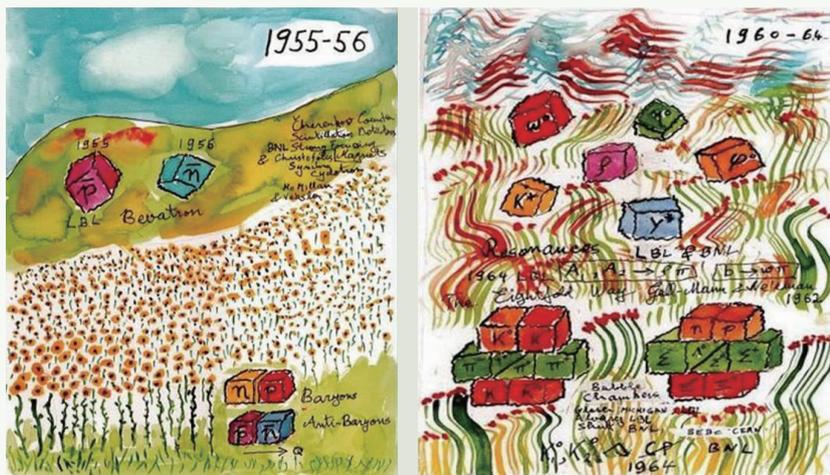


图1 美国物理学家戈德哈伯描绘的20世纪50年代(左图)和60年代(右图)发现新粒子情景

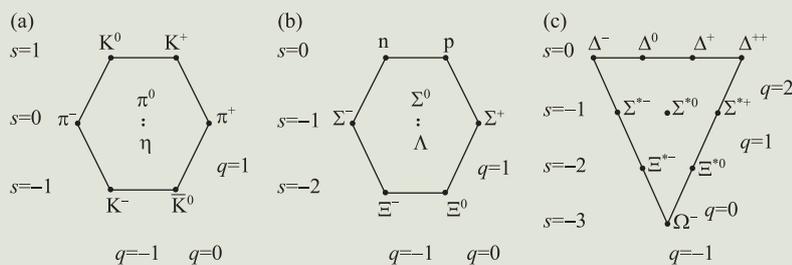


图2 介子八重态(a)和重子八重态(b)、重子十重态(c)示意图(其中 S 代表奇异数，同一水平线上的粒子具有相同的奇异数，对角线上的粒子具有相同的电荷)

1) 佛祖关于获得涅槃的8种方法的格言：“喂，僧侣们，引导我们远离痛苦的崇高的真理，乃是至高无上的八正道，即正见、正思维、正语、正业、正命、正精进、正念、正定”。
2) 当盖尔曼提出“八重法”时，尼尔曼正在伦敦帝国学院萨拉姆教授指导下攻读博士学位。尼尔曼将自己完成的与盖尔曼“八重法”等价的题目为《从规范不变性得出强相互作用》的文章投稿给 *Nuclear Physics* 杂志。不过由于打字以及某些不符合排版规定等问题，文章被延迟发表。而此时，盖尔曼的文章预印本已经到达伦敦帝国学院。

物园”的物理学家。当时在物理学界知名度不高的以色列物理学家尼尔曼(Ne'eman)^[6]建立了与八重法等价的方案²⁾。类似于元素周期表,八重法也预言了表中特定位置空缺的粒子,即在重子十重态中有一个空位还没有被已发现的粒子填充。1964年,美国布鲁克海文实验室发现了 Ω^- 粒子,其特性与盖尔曼八重法所预言的空缺处的粒子完全吻合。这一粒子的发现强有力地支持了八重法。因对基本粒子分类及其相互作用的贡献,盖尔曼于1969年获得了诺贝尔物理学奖。

3 “夸克”的提出

盖尔曼(见图3),这位1929年出生于纽约的普通犹太家庭,14岁考入耶鲁大学,22岁在麻省理工学院获得博士学位,25岁成为加州理工学院最年轻终身教授的天才物理学家,迈出了人类对微观物质结构的认识中的重要一步。他于1964年初,在*Physics Letters*上刊登了题目为《重子和介子的一个简略模型》^[7]的文章。在这篇文章中,盖尔曼第一次提出了夸克概念。

1963年3月末,盖尔曼在哥伦比亚大学做了关于强相互作用、八重法和靴绊理论的三个系列讲演³⁾。此时哥伦比亚大学的物理学家已经转向研究SU(3)理论。在一次午餐期间,谢伯尔(Robert Serber)询问盖尔曼为何没有考虑用三重态构建强

相互作用粒子⁴⁾。盖尔曼在餐巾纸上写下了一些方程,指出如果是这样的话,那么构成三重态的这些粒子会带分数电荷 $-1/3e$ 或 $+2/3e$ ^[8]。谢伯尔的问题促使盖尔曼深入思考:“分数电荷似乎不可能,因为没有人见过它们,但是这不一定意味着它们就不存在。如果这些亚粒子以某种方式隐藏在强子内部又如何呢?也许它们可以被认为具有无穷大质量,那么没有什么能量可以打散它们。所以这些三重态粒子就一直困在由它们自己组成的粒子里面而永远都逃脱不出来,这将会解释为何在实验上还没有找到分数电荷。”^[8]

1963年秋,盖尔曼试图在电话中向欧洲核子中心(CERN)主任魏斯考普夫(Weisskopf)解释他的这一想法。当他提到分数电荷的时候,魏斯考普夫说道:“默里,请让我们严肃点,这是一个国际电话”。可见,魏斯考普夫也不相信分数电荷的存在。同年末,盖尔曼完成了题为《重子和介子的一个简略模型》的文章,并将其投到*Physics Letters*,该文在第二年2月发表。文章中解释了为何三重态中的3个粒子可以组合成重子,2个粒子则组成介子。盖尔曼同样认识到如果想要维持标准的整数电荷,则需要引入第4种粒子。但是“当我们允许分数电荷存在的时候,将会得到一个简洁而优美的框架”,“然后我将三重态的成员称为‘夸克’⁵⁾”。盖尔曼将3个夸克表示为u(上夸克)、d(下夸克)和s(奇异夸克)。u, u, d结合

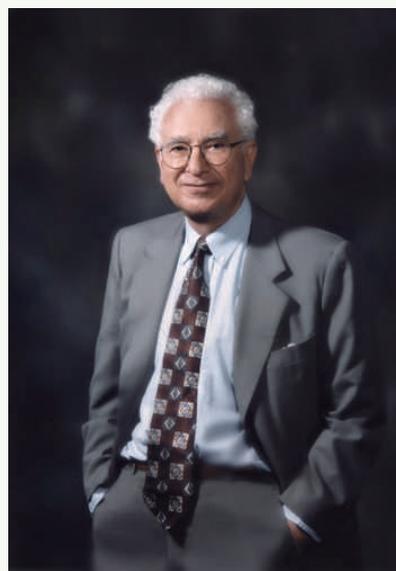


图3 盖尔曼(1929—)

在一起构成质子, d, d, u 结合在一起构成中子, 奇异粒子中含有s夸克。夸克的提出解释了为何八重法能成功地对粒子分类, 并给出了SU(3)对称性的物理基础, 使得奇异数和同位旋有了更深刻的意义, 这是现代物理学发展的一个重要里程碑。

由于当时实验上没有观测到任何具有分数电荷的自由粒子的证据, 多数物理学家怀疑夸克的真实性, 甚至盖尔曼本人也曾一度认为夸克只是一个数学符号。他在论文中这样提到:“将夸克看作是质量有限的物理粒子(而非无穷大质量极限的纯数学实体), 而推测它们的行为方式乃是一个玩笑……在最高能量的加速器上寻找带有 $-1/3e$ 或 $+2/3e$ 的稳定夸克, ……将促使我们确信并不存在真正的夸克!”

3) 实际上, 早在1963年初, 正在休假的盖尔曼在麻省理工学院的报告中已经注意到强相互作用粒子可以由一个三重态(3个粒子)组成。不过麻烦的是这3个粒子带有分数电荷, 而实验上还从未发现过带分数电荷的粒子。

4) 谢伯尔曾学习过群论, 并利用其分析原子核分子能级。他想到也许是三重态构成八重态和十重态, 使得SU(3)将粒子按8个一组或10个一组划分。这意味着存在某种更基本的亚粒子, 亚粒子构成重子和介子。

5) 对于夸克(quark)这一命名, 盖尔曼引用了乔伊斯的小说《芬灵根的守灵夜》(第383页, Viking Press, 1939年版本)中的一句诗词“Three Quarks for Master Mark”, 中译文为“向马克王三呼夸克”。在这里“quark”指的是海鸥的咕咕叫声。

6) “Aces”原意指扑克中的“A”。因为在所有扑克牌上, 唯有“A”牌的表面上有3个符号, 代表3个夸克。这是典型的现象学方法, 也是“艾斯模型”的由来。

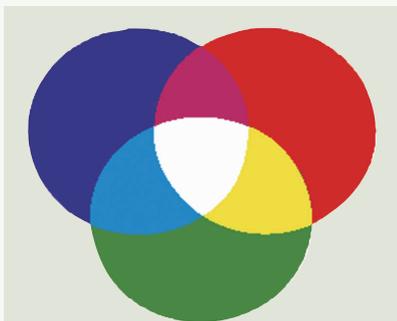


图4 通常每味夸克具有三种不同的“颜色”：红、黄、蓝，三种颜色组合在一起为色中性

对于盖尔曼的模棱两可，有人“解释”：“如果夸克没被找到，请记住我从来没说过它们存在；如果它们被找到了，请记住是我最先想到了它们。”

与此同时，为解释强子多重态，另一位物理学家乔治·兹威格(George Zweig)提出了类似于盖尔曼的想法⁹⁾。不过，兹威格将这种粒子称为“Aces”⁶⁾，这种图像更易于理解。兹威格于1963年在加州理工大学获得博士学位。他在1963—1964年访问CERN期间完成了两篇论文，即《强相互作用对称性及其破缺的SU(3)模型》⁹⁾及其续篇¹⁰⁾。在第一篇论文中，兹威格指出：“介子和中子是由一组3个称作艾斯的基本粒子构成的”。由于*Physics Letters*是CERN主办的杂志，CERN理论组领导建议兹威格将论文发表在*Physics Letters*上。不过，兹威格计划将该文投往*Physical Review*。面对*Physical Review*审稿人咄咄逼人

的问题和反对意见，兹威格不得不放弃发表该论文⁸⁾。此文直至16年后才作为追溯夸克历史的文章正式发表在一本历史性文集中。从事20多年理论物理研究后，兹威格转去研究神经生物学。

4 怀疑与证实

质疑夸克的分数电荷但又不情愿放弃三重态方案促使施温格(Schwinger)、李政道、格拉肖(Glashow)等提出一些模型，使得夸克具有整数电荷。然而，接踵而来的问题是，如果夸克存在，比分数电荷更糟糕的是夸克会破坏泡利不相容原理⁹⁾。盖尔曼和兹威格的想法提出不久，格林伯格(Greenberg)建议用仲统计法(parastatistics)解释此问题。费米子遵从费米统计，玻色子遵从玻色—爱因斯坦统计，而夸克遵从“第三类的仲统计法”。由此可以打开泡利原理的一个天窗。芝加哥大学的南部阳一郎(Yoichiro Nambu)提出2个或3个交叠在一起的SU(3)三重态给予夸克整数电荷，夸克不仅有“味”(即上夸克、下夸克或奇异夸克)，同时还具有称之为“粲”数的性质¹⁰⁾。例如u, u, u三个上夸克具有不同的“粲”数，这样就满足了泡利原理。不过，夸克怀疑者对上述诸多尝试抱怨道：“这些苦苦编织出来的东西正如古代天文学家托罗密那样，

为了保持地球是宇宙中心的思想，他无止境地修补他的宇宙学理论。当天体不是以完美的圆周绕着地球运动时，他提出它们的轨道包含称为本轮的花边。为了使得他的宇宙学理论与观测符合，托罗密就不断地把本轮加到本轮上去。”直到20世纪70年代，物理学家提出夸克还具有“颜色”自由度，并且在实验上观察到的强子是色中性的(见图4)，即色量子数为零，夸克之间由胶子“粘合”，因此，实验上不会观测到单独夸克。此时，随着实验上几种“味道”夸克的相继发现，对夸克存在的质疑慢慢消除。

1968年，斯坦福直线加速器(SLAC)进行电子—质子散射实验，表明质子内部存在点状粒子¹¹⁾。随后几年，实验证明这些组分确实携带 $-1/3e$ 或 $+2/3e$ 分数电荷，即确认了夸克的存在。接下来，又相继发现3“味”新夸克：1974年丁肇中和里克特(Richter)发现粲(c)夸克；1977年费米实验室发现底(b)夸克；1994年费米实验室CDF实验组宣布发现顶(t)夸克。

夸克提出后，与之相关的理论工作多次获得诺贝尔物理学奖。格拉肖(Glashow)、温伯格(Weinberg)和萨拉姆(Salam)因建立弱电统一模型而获1979年诺贝尔物理学奖；特霍夫特(t'Hoof)和威特曼(Veltman)因“阐明物理学中电

7) 兹威格的两篇论文的完成日期分别是1964年1月17日和1964年2月21日。

8) 作为刚由实验物理转入理论物理的兹威格，他构造的艾斯模型竟然落到“臭名昭著”的地步。他后来回忆道：“理论物理共同体对‘艾斯模型’的态度是不宽容的。我要以这种形式在CERN得以发表是如此之难，以致于我最终不得不放弃这种努力。当时有一所颇有声望的大学正考虑邀请我到他们的物理系去讲学，一位资深的物理学家、该系最受尊敬的发言人在一次全系会议上竟取消了这次邀请，还情绪激动地争辩艾斯模型是‘骗子的产物’。”¹¹⁾

9) 盖尔曼和尼尔曼曾简要考虑过这个问题，他们听说过一种新型的统计可能让夸克不违反泡利原理。但当他们去加州理工学院图书馆查阅这篇文章时，却发现该文章的计算存在错误。盖尔曼只得决定不管统计的问题，把关于夸克的文章写了出来。

10) “粲”数后来被命名为新发现的第4类夸克的名字。

11) 费曼(Feynman)将这种点状粒子称之为部分子。

12) 渐近自由行为指的是夸克之间很强的相互作用在大动量转移下变弱，即夸克之间靠得越近，相互作用就越弱。

弱相互作用的量子结构”方面的理论研究而获1999年的诺贝尔物理学奖；1973年，格罗斯(Gross)、维尔切克(Wilczek)和波利策(Politzer)因发现强相互作用规范理论的渐近自由^[2]行为而获2004年诺贝尔物理学奖；小林诚(Kobayashi)和益川敏

英(Maskawa)因在1973年提出存在第三代夸克以解释弱相互作用电荷宇称(CP)对称性破缺而获2008年诺贝尔物理学奖。

迄今，量子色动力学能够很好地描述强相互作用。渐近自由和夸克禁闭可以解释为何在实验上不能

观察到自由夸克。不过，现有理论还不足以解释诸如多夸克态、强CP破坏、手征对称性自发破缺等问题。随着Higgs粒子的发现以及大型强子对撞机在2015年以最大能量运行，物理学家将对夸克层次的物理进行更精细研究。

参考文献

- [1] Fermi E, Yang C. N. Phys. Rev., 1949, 76:1739
- [2] Gell-Mann M. Phys. Rev., 1953, 92: 833
- [3] Nakano T, Nishijima K. Prog. Theor. Phys., 1953, 10: 581
- [4] Sakata S. Prog. Theor. Phys., 1956, 16: 686
- [5] Gell-Mann M. The Eightfold Way: A Theory of Strong Interaction Symmetry. Report CTSL-20(1961), unpublished
- [6] Ne'eman Y. Nuclear Physics, 1961, 26(2): 222
- [7] Gell-Mann M. Phys. Lett., 1964, 8(3): 214
- [8] 乔治·约翰逊 著, 朱允伦, 江向东, 杨美霞, 郭鹏 译. 奇异之美——盖尔曼传. 上海: 上海世纪出版社, 2005. 223—224
- [9] Zweig G. An SU(3) Model for Strong Interaction Symmetry and Its Breaking. CERN preprint, 1964
- [10] Zweig G. An SU(3) Model for Strong Interaction Symmetry and Its Breaking (II). Published in: Developments in the Quark Theory of Hadrons. Volume 1. Hadronic Press, 1980. 22—101
- [11] Zweig G. Origins of the Quark Model. CALT Rept. No. 68—805 (1980)

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕——<物理>四十年集萃》

的关爱和支持，《物理》编辑部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅两年(2015—2016年)《物理》杂志的订户，将免费获得《岁月留痕——<物理>四十年集萃》一本(该书收录了从1972年到2012年在《物理》各个栏目发表的四十篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏)。

欢迎各位读者订阅《物理》(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

订阅方式

(1) 邮局汇款

地址：100190，北京603信箱
《物理》编辑部收

2012年《物理》创刊40周年，为答谢广大读者长期以来

(2) 银行汇款

开户行：农行北京科院南路支行
户名：中国科学院物理研究所
帐号：11250101040005699
(银行汇款请注明“《物理》编辑部”)
咨询电话：(010)82649266；82649277
Email: physics@iphy.ac.cn

