

量子色动力学札记

黄 涛

今年《现代物理知识》第1期向读者推荐了一本新书《量子色动力学引论》，已出版了数月。应编辑部约稿，谈谈我所经历以及在写作这本书时所知道的有关量子色动力学发展历史和有趣故事。

量子色动力学是物质结构在夸克层次的动力学规律。1973年格罗斯(D.J. Gross)、波利策(H.D. Politzer)和维尔切克(F. Wilczek)发现了强相互作用的渐近自由性质，奠定了量子色动力学理论基础，2004年他们三人获得诺贝尔物理学奖。从1973年创立经过近40年发展至今，量子色动力学已成为强相互作用的基本理论。

自然界中存在四种相互作用：引力、电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用。引力无处不在，电磁相互作用统一了电学和磁学，电磁波深刻地影响着人类社会的发展，在科技、军事、经济发展以及日常生活中都起了极为重要的作用。弱相互作用描述了微观世界中粒子的弱衰变和弱产生的转变过程，例如中子衰变为质子加上电子和中微子的beta衰变过程。强相互作用是短程力，它在原子核内将质子和中子紧紧地束缚在极小($\sim 10^{-13}$ cm)的原子核内。引力的相互作用强度最弱，在微观世界可以忽略，而强相互作用最强，是理解微观世界基本组成成份以及它们之间相互作用运动规律的关键。

强相互作用的存在可以追溯到1911年卢瑟福实验发现原子核，1932年查德威克发现原子核中有中子，由此海森伯和伊凡宁科提出了原子核是由质子和中子构成的原子核模型。原子核仅是原子的十万分之一大小，强相互作用将质子和中子束缚在如此小的核心内。

1935年汤川秀树(Hideki Yukawa, 1907~1981年)提出了强相互作用的介子交换理论(图1)，并预言了 π 介子的存在(那时物质结构的基本粒子只有质子、中子和电子)，1947年鲍威尔(Powell)在宇宙线中发现了 π 介子。一直到现在夸克发现以前，强相互作用理论都是用汤川介子交换理论



图1 汤川秀树1949年荣获诺贝尔物理学奖

来描述的，即质子和中子通过交换介子紧紧地束缚在原子核内，唯象地解释了核力以及描述各种强衰变和强产生过程实验结果，取得了有意义的进展。同时它也遇到了来自理论和实验两方面的挑战。理论上汤川介子交换理论是在量子场论框架中建立的，量子场论描述电磁相互作用物理现象相当成功，发展为量子电动力学。量子电动力学中传递电磁相互作用的媒介子是光子，电子和光子之间相互作用强度以电荷 e 来标记，又称为电磁耦合常数，其数值在自然单位制里 $\alpha = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137}$ 。量子场论中最有效的方法是微扰理论，由于展开参量 α 很小具有很好的收敛行为，理论上可以精确地计算到微扰论的高阶修正，例如电子的反常磁矩和兰姆位移(氢光谱的精细结构)相当精确地与精密实验结果一致。然而对于汤川介子交换理论，质子、中子与介子的相互作用强度以耦合常数 g 来表示，根据微扰论最低阶计算结果由实验上确定其数值 $\frac{g^2}{4\pi} \approx 14$ ，显然表明如此强的耦合常数不能作为展开参量，也无法计算高阶修正。这就表明量子场论中不能应用微扰理论到强相互作用汤川介子交换理论。

另一方面，20世纪60年代初，随着高能加速器的发展，实验上发现了一大批基本粒子，基本粒子已不是30年代只有质子、中子、电子三种，总数达到了一百多种。其中绝大多数粒子直接参与强相互作用称为强子，如质子、中子、 π 介子、 K 介子、 ρ 、 ω 、 Λ 、 Σ 、 Ξ 等。这一百多种强子之间的相互作用耦合常数很大，以致不能应用微扰理论，而且它们在以点粒子为出发点的定域量子场论中与实验结果有更多的矛盾。例如上世纪50年代末霍夫斯坦实验测出质子明显有一定大小，唯象地引入质子电磁形状因子和半径来描述。显然量子场论微扰理论描述众多强子间强相互作用受到了严峻的挑战。

20世纪50年代中期人们试图从理论上放弃微扰理论，发展不依赖于微扰展开的S矩阵理论和公理化场论以及20世纪60年代初研究众多强子性质的对称性理论。公理化场论试图从量子场论必须遵

从的几个基本公理性假定出发最大限度地导出格林函数或 S 矩阵元的普遍性质，其中在复 q^2 平面上的解析性质和由此导出的色散关系就是公理化量子场论的重要成就之一。这几条基本公理性假定是：

Lorentz 协变性、微观因果性、Hilbert 空间完备性、么正性、强子质量谱条件和渐近条件等。导致 S 矩阵元解析性质的关键是微观因果性假定。1961 年人们进一步发现实验上观察到的一百多种强子按它们的自旋、同位旋、宇称和质量谱可以填充在 SU(3) 对称性表示中，即按 SU(3) 对称性很好地对众多强子按自旋和宇称进行分类，盖尔曼(M. Gell-Mann) 在一篇文章中称它为八重态方法。这种分类非常像原子按门捷列夫周期表分类，其分类图类似于古代的八卦图。这些图形可以设想为由基本的正三角图形堆积而成。1964 年盖尔曼在一篇仅有两页纸的论文中将 SU(3) 对称性中基础表示（基本的正三角图形）的三个基称为三种夸克，并由夸克场构成电磁流和弱流算符的场论模型。同时茨维格(G.Zweig) 称它们为 Aces，他们注意到夸克所对应电荷是分数

电荷，即 $\frac{2}{3}e$ ， $-\frac{1}{3}e$ ， $-\frac{1}{3}e$ ，这在当时很难接受，

因为所有实验上观察到的粒子都是整数电荷。因此他们认为夸克是数学符号或是具有无穷大质量的实体。所有已发现的介子和重子（即一百多种强子）都是由夸克组成的束缚态。夸克一词是盖尔曼借助于“Finnegan’s Wake”（译为芬尼根彻夜祭）书中一首诗，诗文中有一句“Three quarks for Muster Mark”。书中夸克是描述一种海鸟的叫声。顺便提及盖尔曼很喜欢鸟类，他在世界各地访问中有时会安排时间观赏鸟类。在 1964 年盖尔曼提出夸克后国际上发展了从非相对论夸克模型到相对论夸克模型研究强子性质的理论潮流。盖尔曼的这篇论文虽然只有两页纸，历史证明了这一物理思想的划时代意义。盖尔曼由于提出基本粒子的分类和“夸克”物理思想而获得 1969 年诺贝尔物理学奖（图 2）。正是在这样的背景下，1963 年开始了我的研究生学习和研究，在导师朱洪元先生的指导下及时地从研究色散关系理论转向基本粒子对称性和层子模型理论研究。

层子模型理论研究工作起始于 1965~1966 年北京三个单位（北京大学、中国科学院数学研究所和原子能研究所）基本粒子理论合作研讨会，后来



图 2 盖尔曼 1969 年荣获诺贝尔物理学奖

称为北京基本粒子理论组。在一段较长的时间内集中了三个单位 39 人的队伍（老、中、青梯队）共同学习国际上最新进展，研讨科学问题，发表了三本论文集 42 篇论文，并在北京科学讨论会 1966 年暑期物理讨论会上报告成果。不同单位的研究队伍合作攻关创新的精神非常值得称赞和传承，这在中国物理学史上也是少见的。概括地说，层子模型理论是基于强子具有内部结构的认识，认为强子是由下一层次的层子组成的，并以夸克为对象引入相对论性束缚态波函数描述强子参与的各种过程并获得了一系列有科学意义的成果。之所以称为层子是因为它体现了物质结构深入到下一层次的含义，夸克作为可能的实体构造强子结构模型。层子模型理论研究由于以相对论性波函数描述强子内部结构，其研究成果领先于当时国际上非相对论夸克模型。但是由于文化大革命前就不允许送到国外期刊发表，文革开始后国内大部分学术期刊停刊，最后在钱三强和周培源两位老前辈和老领导的关怀和干预下，42 篇论文才得以在《原子能》杂志（第二机械工业部出版的刊物）和《北京大学学报》发表。1966 年暑期讨论会后由参加会议的萨拉姆(Salam) 和日本科学家介绍到国外，国际著名科学家温伯格(Weinberg) 说“北京一小组理论物理学家长期以来坚持一种类型的夸克理论，但称之为层子，而不称之为夸克，因为这些粒子代表比普通强子更深一个层次现实”（见温伯格著《最初的三分钟》）。层子模型和夸克模型对于强子的电磁衰变和弱衰变以组分夸克的电磁衰变和弱衰变图像以及引入的强子波函数得到了一系列与实验相符合的结果。但对于强相互作用过程，由于不知道夸克之间的相互作用性质，只能引入某些唯象耦合形式，不能做出有效的理论预言。

国内“十年浩劫”直至 1976 年才结束，这十年

中科研工作停顿，学术期刊停顿，就连订购国际期刊也停止，仅有个别单位还保留有国际著名学术刊物的复印本。讲一个故事可见当时的状态。1972年美国总统尼克松访华后一些美国科学家相继访问北京，其中加州理工大学校长哥德波格（Goldberg）到达后第二天，胡宁先生陪他去长城，他说两天后他的学术报告不是讲他自己的工作，而是讲代表美国最高水平的工作。胡先生从长城回来后立即告诉我们北京三个合作单位，于是动员所有的人去图书馆查文献猜测他讲什么，要有所准备，不要暴露出我们不知道国际上的进展。由于长期与国外无交流，经过突击准备总算猜到了一点眉目，当哥德波格讲电磁-弱相互作用统一模型（Weinberg-Salam）时还能跟上提出问题。1967年温伯格以格拉肖（Glashow）1963年提出的模型为出发点，引入黑格斯机制（Higgs）构建了电、弱统一模型并预言了中性流和中间玻色子W和Z的质量。值得指出1972年富有才华的理论物理学家本·李（B.W.Lee，韩国人）在一篇题为《弱相互作用理论前景》的讲演中，非常清晰地介绍了电、弱统一模型，使得这一理论为更多理论家和实验家所重视，功不可没。1973年实验上发现了中性流，1979年格拉肖、温伯格和萨拉姆三人获诺贝尔奖（图3）。1976年后我们从灾难性的文革中清醒过来，本·李的文章成为我们学习非阿贝尔规范场（杨-Mills场）迅速掌握弱、电统一模型和量子色动力学规律的必读文献。1979年本·李于一次车祸中丧生（高速路上由于对面高速行驶的卡车所撞），是国际粒子物理界的一大损失。



图3 格拉肖（左）、温伯格（中）和萨拉姆（右）
1979年荣获诺贝尔物理学奖

对于强相互作用来讲，也是在那段时期（1967~1973）迅速发展，从夸克模型到夸克-部分子模型，再到量子色动力学的建立。20世纪60年代中期的夸克模型也好，层子模型也好，都遇到了两个难题：(1)实验上为什么看不到分数电荷的自由夸克？夸

克是否存在？(2)强子是夸克的束缚态，如何束缚在一起？回答这两个难题推动强相互作用理论进展有两个关键实验：1967年美国斯坦福直线加速器中心（SLAC）在电子打质子的深度非弹性散射实验中，发现了标度无关性规律（scaling law）以及不久发现的标度无关性规律破坏现象。弗里德曼（Jerome Friedman），肯德尔（Henry Kendall）和泰勒（Richard Taylor），因深度非弹性散射所做的一系列开创性的发现而荣获1990年诺贝尔物理学奖（图4）。特别指出，这些发现也应归功于SLAC的理论家比约肯（J. Bjorken），当肯德尔把崭新的数据分析拿给比约肯看了以后，比约肯建议用标度无关变量 ω 来分析这些数据，原本杂乱无章的数据显示出一种强有力的标度无关性现象。正是比约肯首先认识到，标度无关性规律意味着大动量迁移下电子是与质子内无穷多（不止是三个夸克）无相互作用的自由点粒子相互作用。费曼（Richard Feynman，1918~1988）称质子内的这些点粒子为部分子（Parton），而这些部分子就是夸克和反夸克。这意味着实验上标度无关性现象已观察到夸克的存在，建立了所谓的夸克-部分子模型。这个模型告诉人们在动量迁移足够大时，电子与质子内部分子相互作用，而这些无穷多部分子之间近似无相互作用呈准自由状态，即具有渐近自由现象。此后SLAC又发现了标度无关性规律破坏现象，这表明这些部分子的准自由状态是近似的，它们之间的相互作用不可忽略。那么很自然地要问它们之间的相互作用形式和性质是什么？能否解释渐近自由性质和标度无关性破坏现象。20世纪60~70年代SLAC可以说处于高能物理全盛时期，实验上发现许多重要物理现象，同时也吸引了众多理论家访问，形成了世界高能物理一个重要中心。除了上述实验上发现外，夸克具有颜色自由度这一物理概念的提出，对量子色动力学建立起了重要作用。早在夸克模型刚建立时就发现其存在自旋-统计矛盾。例如夸克是自旋为 $1/2$ 的费米子，总波函数应满足Fermi-Dirac统计，然而在夸克模型中并不是这样，以 Δ^{++} 为例，它的自旋为 $3/2$ ，它由三个u夸克组成，处于基态（S波）空间波函数是对称的。为了解决这一矛盾，早先夸克模型和层子模型中是修改统计性质引入了三套夸克或综合（para）统计。1972年盖尔曼和弗里希提出另一种崭新想法，引入了一个新的内部自由度“色”（“Color”）。尽管空间、

自旋、味空间（夸克不同味 u 、 d 、 s ）是对称的，然而只要新引入的自由度“色”是反对称的，总的波函数仍是反对称的。即假定每种夸克除了味（ u 、 d 、 s 以及后来发现的粲夸克 c 、底夸克 b 和顶夸克 t ）不同外还具有三种不同颜色（红 r 、绿 g 、蓝 b ），由此就可以在夸克模型里，强子遵从相应的费米和玻色统计。这种“色”自由度的引入立即获得了实验上的证实，1972 年出色自由度的同时假定可观察的强子态是无色的，因为实验上并未观察到带色的强子，亦即强子具有零色量子数（有时称为色中性或色单态）。这就是说由三种色量子数作为基张开的色空间，在色空间内作任一变换 U 不会使强子态变出颜色来，而是变换到强子态自身。因此实验上既观测不到自由夸克，也观测不到由夸克组成的带色的束缚态。那个时期，盖尔曼和费曼两位大师都在加州理工学院（Caltech），是该校粒子物理最强盛时期。1979 年笔者访问该校时，见到他们两人的办公室分别在秘书办公室的两边。我手头有一张不多见的他们二人的合影，但不知哪一年（图 5）。



图 4 泰勒（左）、肯德尔（中）和弗里德曼（右）
1990 年荣获诺贝尔物理学奖



图 5 盖尔曼（左）和费曼（右）
费曼 1965 年荣获诺贝尔物理学奖

1970 年前后研究夸克之间相互作用形式和性质成为当时粒子物理研究的主流方向。各种物理思

想和理论推演出现在一系列的论文中，其中最值得一提的是对比电磁相互作用重整化理论中的 β 函数。电磁相互作用的基本理论是量子电动力学（简称 QED，是阿贝尔规范理论），人们测量到的电荷是屏蔽以后的有效电荷 e ，即在小动量转移（汤姆逊极限）下确定的，在 QED 理论中随着动量转移 Q^2 的增加，有效耦合常数（电荷 e ）随之变化而增大。当 Q^2 很大时，探测电荷的波长很短，直接探测到未被屏蔽的电荷，其电荷自然增大。因此，QED 理论不具有上述渐近自由的特点。人们推测只有具有反屏蔽性质使得有效耦合常数 g_s 随着 Q^2 增大而减小，有可能得到渐近自由性质。如何才能获得反屏蔽性质？即真空极化修正效应会使得有效色荷（强相互作用有效耦合常数 g_s ）会增加。用量子场论语言来说，这样一个屏蔽和反屏蔽行为是由重整化理论中的 β 函数完全确定，在 QED 中 β 函数是正的，有效耦合随能量增加而增大，正、反电子对屏蔽电荷，那么要想获得反屏蔽性质，只有具有 β 函数为负的场论，才是给出渐近自由特点的强相互作用理论。1972 年射曼切克（Symanzik）和特霍夫特（'t Hooft）在马赛的国际会议上，注意到非阿贝尔规范理论有可能具有负 β 函数的性质。旅美华裔科学家徐以鸿（A. Zee）也做了类似的计算。1973 年春天，格罗斯和他的学生维尔切克以及波利策（柯尔曼的学生）分别在 *Phys. Rev. Lett.* 上发表了两篇划时代的论文（图 6），提议了 SU(3) 色规范群下非阿贝尔规范场论可以作为强相互作用的量子场论，其 β 函数是负的，根据物理上的需求选择了色空间中变换遵从 SU(3) 规范群（非阿贝尔规范群）。设夸克场量 q_i ($i=1, 2, 3$ 是夸克的三种不同颜色) 是 SU(3) 群的三个基，三种色的夸克 q_i 属于规范群 SU(3) 的基础表示。将此变换群定域化，从而得到夸克之间的相互作用是通过八个规范场玻色子传递的，这些媒介子称为胶子。胶子是带色的，它们产生不同带色夸克之间的转换，传递强相互作用。在 QED 中媒介子是光子，它是不带电的，然而这里胶子是带色荷的，正是由于胶子带色荷，因此胶子之间有相互作用，从而产生反屏蔽效应，决定了强相互作用的渐近自由性质。由于色空间变换群 SU(3) 是精确的对称性，不像 SU(3) 味对称性是近似对称性，这样就解释了为什么带色量子数的物质在实验上观察不到，实验上只观察到无色（色单态）的强子态。由格罗斯、维尔切克和

波利策三人发现了强相互作用非阿贝尔规范理论的渐近自由性质，导致建立了量子色动力学（简称 QCD）理论。



图6 格罗斯（左）、波利策（中）和维尔切克（右）
2004 年荣获诺贝尔物理学奖

从上面的介绍可以见到，从 1967 到 1973 年正是粒子物理实验和理论的飞速发展，诞生了电、弱相互作用统一理论和强相互作用的量子色动力学理论，两者合在一起构成了当今粒子物理标准模型理论。此后大量的高能物理实验证实了粒子物理中标准模型理论的成功，标准模型理论是近半世纪以来探索物质结构研究的结晶，是 20 世纪探索微观世界规律的极重要的成就。这一成就可以与 20 世纪初的玻尔原子模型相比，正是有了玻尔原子模型，才有 20 世纪 20 年代末量子力学理论的建立。可以相信，标准模型理论的发展必将导致深层次动力学规律的发现和建立。而我国这一段时期由于文革折腾，造成科研、教育停顿时期，既不知国外最新成果又无学术论文发表，总体停留在文革前的科研水平上。直至 1972 年以后，杨振宁、李政道以及一些美、欧科学家访华以及国内著名科学家应邀访问美、欧，这些不多的交流带来了国外粒子物理研究成果的信息。例如，1974 年底周培源先生访美回国，带回了在斯坦福大学时见到的一份斯坦福大学的报纸，报道说 SLAC 发现了一种新粒子，大质量、窄宽度，很难填充在已有的夸克模型中（这就是 1974 年 11 月丁肇中发现的 J 粒子和里克特发现的 ψ 粒子，后来统一称为 J/ψ 粒子）（图 7）。于是召集北京在层子模型时期合作的三个单位科研队伍一起，就凭这张报纸的信息研究新粒子的性质。值得庆幸的是我们获得特许，少参加点革命多点时间做科研，有机会开始了对新粒子的研究，在层子模型的基础上将三种夸克推广到包含第四种夸克—粲夸克 c，认为新粒子是粲夸克和反粲夸克的束缚态，从 SU(4) 对称

性研究它的产生和衰变性质，在 1974 年复刊的《物理学报》和《中国科学》上发表了一些论文。又如哥德波格和萨拉姆来访，学术报告介绍了建立在非阿贝尔规范场和黑格斯机制基础上的电、弱统一模型理论。1974 年以后，在所谓抓革命促生产的口号下，国内开始部分恢复了科学研究工作和学术期刊，至少每周可以有三天公开从事科学研究。国内粒子物理界一部分人开始注意国际上最新进展，学习和研究非阿贝尔规范场的性质以及电、弱统一模型的进展。也有一部分人试图在层子模型理论上，理解标度无关性等实验现象。1978 年 5 月斯坦伯格（Steinberg）和艾利斯（Ellis）访华，在北京系统讲演了量子色动力学的实验基础和理论发展，电、弱统一模型，中微子实验和新粒子物理。特别是艾利斯的系列报告，对国内粒子物理界了解国际最新研究成果影响很大。1978 年 5 月底 6 月初在广州举办了全国规范场专题讨论会，集中研讨了规范场性质，电、弱统一模型和量子色动力学。国内大部分粒子物理学家转向了非阿贝尔规范场，电、弱统一模型和量子色动力学理论研究，不少研究成果发表在 1977 年创刊的《高能物理与核物理》学术刊物上。

1978 年随着改革开放带来了科学的春天，在全国科学大会上，高能物理被列为全国八大重要科技领域和带头学科之一。八个领域和学科是农业、能源、材料、电子计算机、激光、空间、高能物理、遗传工程。高能物理迅速成为当时的热门名词，知名度很高，我们很多人都被很多单位邀请去做高能物理的科普报告。同时科学界领导的一个重大决定，我国科学家首次参加在东京举办的第 19 届国际高能物理大会。在这之前一直是只有台湾科学家参加历届高能物理会，我国的政策是只要有台湾科学家参加的国际会议，即使邀请我国科学家也绝不参会，除非主办方不邀请台湾科学家。经过会议主席西川哲治努力，每位科学家的胸卡只标记城市名而不提国名，我国派出了以朱洪元为团长的五人代表团（成员还有胡宁、叶铭汉、戴元本、黄涛）参加此次国际会议。1978 年 8 月 22 日张文裕所长亲自送我们到北京机场（图 8），可见重视。当我们出现在国际高能物理大会会场时受到了与会科学家的欢迎和日本媒体的高度注视。高德瓦沙在会议总结报告中还专门提到此次会议是第一次在亚洲召开，中国科学家第一次参加国际高能物理会议。特别是会议报告

绝大多数是电、弱统一模型，量子色动力学两方面理论和实验检验的进展情况，对我们冲击很大，感到了多年来隔世的差距。我们会后还访问了东京大学、京都基础研究所、名古屋大学等，受到日方热情接待。此次会议开创了我国科学家参加国际会议的先例，经杨振宁先生精心安排与会华人科学家聚餐叙情，此后两岸科学家开始了友好的交流和合作。由于从国际会议上了解到很多国际高能物理新进展，8月从东京回国后向领导汇报了会议情况，科学院领导立即筹备了11月在桂林召开的国内粒子物理理论研讨会（图9），听取了参加东京会议代表介绍国际动态，特别研讨了我国改革开放形势下高能物理发展如何走自己的路。钱三强副院长（图中第三排中站立者，细心的读者还可以在这张照片上发现更多的我国著名理论物理学家）参加了此会，使得会议级别提高了很多，桂林市政府派了公安干部负责保卫工作。



图7 丁肇中（左）和里克特（右）1976年荣获诺贝尔物理学奖



图8 张文裕所长送代表团到机场

1979年在邓小平访美以后，国家派出了一批访问学者去美国、欧洲、日本等国家著名国家实验室和高等学府学习和工作，李政道教授在北京系统讲授粒子物理和量子场论以及统计物理，还专门安排高能物理理论、实验和加速器方面的科研工作者以访问学者身分去美国做访问研究。丁肇中教授安排了一批中国高能物理工作者参加他的实验。一系列

的长期和短期学术交流，极大地缩短和弥补了由于文革造成的国内科研水平落后于国际先进水平的差距，为我国高能物理实验和理论培养了一批科研人才。改革开放的大门打开所带来的冲击，影响着我国经济、科学、教育等各方面的发展，包括在国际学术刊物发表文章再也无法禁止，各单位学术论文英文预印本和送到国外杂志发表成为自然。记得原子能研究所归国老科学家丁渝教授，由于20世纪50年代初在《美国物理评论》（*Phys.Rev.*）上发表了一篇文章，在文革中受到了批判。



图9 钱三强副院长和参加会议的理论物理学家合影

量子色动力学建立后应用到电子-质子深度非弹过程和正、负电子湮灭过程取得了成功，人们认为它有可能成为强相互作用基本理论的候选者。当时也有不同声音，例如1979年6月在日内瓦召开的欧洲国际高能物理会议上，就有科学家对微扰量子色动力学能否应用到其他过程提出质疑。因此关键问题是进一步扩大应用量子色动力学理论到更多的物理过程，并在实验中不断检验和验证。1979年在美国费米国家实验室召开的国际轻子光子会议上，宣布了四个实验组在汉堡 DESY 的 PETRA 上发现了量子色动力学预言的胶子存在的证据，即正、负电子湮灭过程的三喷注现象。胶子是传递强相互作用的媒介子，量子色动力学就是描述夸克和胶子相互作用的基本理论，发现胶子存在的证据，无疑是对量子色动力学理论极大的支持。同时国际上有三个组开创应用量子色动力学推广到一大类遍举过程，得到了实验的支持。1979年笔者去美国 SLAC 访问有幸参与了部分工作。同年11月底在尔文（Irvine）召开的“味道、颜色和统一”的国际会议上，费曼作了微扰量子色动力学的报告，报告总结

量子色动力学的成功，说量子色动力学物理图象是可以接受的，但仍需做进一步的检验。我记得在费曼主持的讨论会上，他向做“统一理论”的科学家提了一个有趣的问题“什么样的实验可以证明你的理论是不正确的”引起了与会科学家的热烈讨论。因为世界上所有理论家的报告总是找实验上如何支持他的理论，费曼反过来提个问题至今仍是发人深省的。果不出所料，若干年后质子衰变实验结果否定了SU(5)大统一理论。大家知道费曼对量子场论最大贡献之一是发明了费曼图方法，与会者指给我们看费曼的汽车，外表画了好些量子电动力学费曼图。费曼听说有来自中国的科学家参加会议，特地与我们一起交谈合影（图 10），至今仍珍藏着这张照片。当时他刚过花甲，61岁。他不幸在1988年2月15日去世，享年70岁。1987年当我的美国朋友送我一本书费曼自己写的书 *Surely you're joking, Mr. Feynman*，当即决定将它译成中文，1989年2月由科学出版社出版（译者为吴丹迪、吴慧芳、黄涛），书名为《爱开玩笑的科学家——费曼》。据说还有其他中译版本，但都在我们译本之后。



图 10 费曼在会议休息时与我们聊天

量子色动力学理论经历了 30 年实验检验和理论自身的发展，不仅表明它应用到从较低能量到很高能量大量物理过程的成功，而且较好确定了理论中唯一参量 Λ 和有效耦合常数的渐近自由性质以及理论上把握计算高阶修正的方法。量子色动力学理论预言夸克-胶子间相互作用的有效耦合常数 g_s （即色荷）满足下列等式，

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{g_s^2}{4\pi} = \frac{4\pi}{\beta_0 \log \frac{Q^2}{\Lambda^2}},$$

其中 $\beta_0 = -(\frac{2}{3}N_f - 11)$ 是单圈近似下的 β -函数值。 N_f 是夸克的味数， Λ 是 QCD 的标度参量。从上式可以见到当能量 Q^2 趋于无穷大时，强相互作用耦合常数 $\alpha_s(Q^2)$ 以对数形式减小而趋于零，定量地表达了强相互作用渐近自由的性质。人们形象地将反映这一特点的耦合常数称为跑动耦合常数。跑动耦合常数随能量 Q^2 增大而对数减小这一规律已得到一系列物理过程的实验结果证实。图 11 给出了 Q^2 从几个 GeV^2 到 $(100\text{GeV})^2$ 范围内不同物理过程实验上测到的跑动耦合常数都处在理论预言的对数曲线上。图中阴影部分是量子色动力学 (QCD) 理论计算中参量 Λ 的不确定性。随着理论和实验进展，人们也逐渐将它作为强相互作用理论的候选者改为它是强相互作用的基本理论。2004 年授予三位开创者诺贝尔物理学奖，从此量子色动力学理论进入精密检验和发展的阶段。

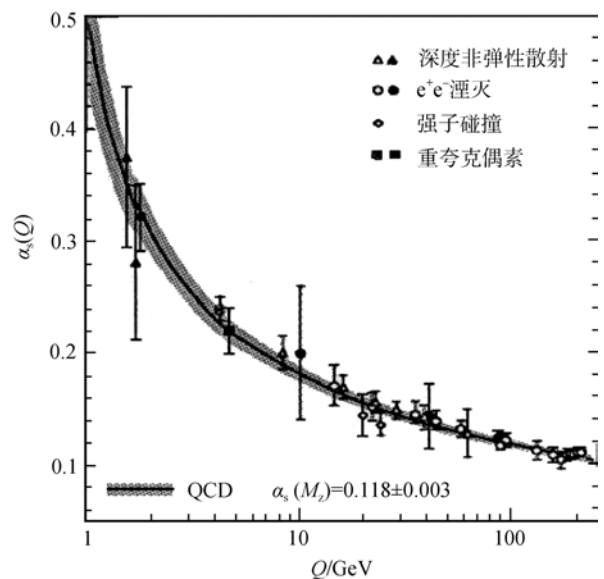


图 11 强相互作用有效耦合常数 $\alpha_s(Q^2) = \frac{g_s^2}{4\pi}$ 随 Q 变化而改变，一系列物理过程的实验证实了上面有效耦合常数公式的正确性 (M_Z 是中性中间玻色子 Z 的质量)

2004 年宣布诺贝尔奖时，新闻发布会明确说获奖理由是“发现强相互作用渐近自由”，量子色动力学理论具有两大特点：渐近自由和夸克禁闭。前面提到的理论理解和实验验证都是与渐近自由性质相关。关于夸克禁闭性质，目前量子色动力学理论尚不能给出定量的解答。定性上从图可以见到随着能

她用物理的情趣，引我们科苑揽胜； 她用知识的力量，助我们奋起攀登！

欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn。投稿时请将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目，并于 2009 年增加了彩色中心插页。2011 年《现代物理知识》，每期定价 8 元，全年 6 期 48 元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

汇款到编辑部 地址：北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要过去杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1994 年合订本，22 元；1994 年增刊，8 元；1994 年附加增刊合订本，36 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2000 年附加增刊合订本，38 元；2000 年增刊，10 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007~2010 年单行本每期 8 元；2007~2010 年合订本每本 50 元。

量转移减小有效耦合常数趋于无穷大，这可以定性理解为什么夸克在强子内部不能以自由状态分离出来，因为当两个夸克之间的距离增大时，夸克之间交换胶子的能量 Q^2 变小，跑动耦合常数变大，以至于耦合强度变为无穷大，这意味着夸克之间的相互作用随着分开的距离增加而增加，使得夸克和胶子永远束缚在强子内部，人们形象地称此物理现象为“夸克禁闭”。夸克之间通过交换胶子相互作用束缚在一起，而胶子之间相互作用产生反屏蔽效应越聚越多，这正像橡皮筋一样，拉得愈长弹回得强度愈大，永远束缚在一起。正是由于夸克禁闭性质，实验上当电子或强子打到另一个强子上可以产生一个或多个强子而观测不到单个自由夸克。这和早年电子或质子打原子或原子核完全不一样，不能击出带分数电荷的自由夸克。由于夸克禁闭是与有效耦合常数增大到微扰论不能应用的区域，因此它是量子色动力学的非微扰性质，目前尚未有实质性的进展回答这一问题，也是在低能区域检验遇到的难题。夸克禁闭这一难题从一开始建立夸克模型时就存在，至今仍是 21 世纪物理学中重大难题之一。夸克禁闭是由量子色动力学物理真空性质造成的，在物理真空中真空不空，它充满着夸克、反夸克对以及

胶子，物质与真空中的夸克、反夸克对和胶子不断发生相互作用产生新的强子结构图像。目前美国在布鲁克海文正在进行的相对论重离子碰撞机就是要从实验上揭示物理真空的性质。就是在极端条件下将夸克和胶子从质子和中子中解放出来，也就是实现从夸克的禁闭相到退禁闭相的跃迁。只有完全掌握了渐近自由和夸克禁闭这两个特点，人们才能说对强相互作用有了深刻的理解。

时至今日，量子色动力学作为强相互作用基本理论已进入精密检验阶段，人们一方面深入研究微扰理论的高阶修正的逐阶计算，另一方面对夸克禁闭难题相关的非微扰理论研究更为深入。国内的北京正、负电子对撞机升级已完成提供了更精密的实验检验工具必将促进发展量子色动力学理论。经过 30 年的发展，我国已有了很强的实验和理论队伍在强子物理，量子色动力学相跃迁（夸克-胶子等离子相），微扰量子色动力学计算和格点规范理论等方面取得了具有国际竞争力的成果和在国际竞争中占有一席之地能力。我相信在不远的未来人们最终将解决夸克禁闭的难题并将强相互作用理论发展推向新阶段。

（中国科学院高能物理研究所 100049）