

# 我记忆中的层子模型

黄涛

(中国科学院高能物理研究所 100049)

1965年9月~1966年6月,北京基本粒子理论组首先提出了相对论性强子结构的层子模型,1966年7月在北京国际暑期物理讨论会上报告了层子模型理论成果。层子模型理论是基于物质结构的层次性,认为基本粒子并不基本,强子是由下一层次的层子组成的,层子模型具体计算中以夸克作为层子的一种方案构造相对论性强子结构模型。半个多世纪前的事仍然历历在目,我将分三部分回顾这一科学成果的来龙去脉。

## 一、层子模型前期

20世纪60年代初,全国粒子物理理论队伍仅有几十人,直接或间接师承三位老前辈,张宗燧(1915~1969)、胡宁(1916~1997)、朱洪元(1917~1992)(图1)。这三位老先生的学术研究和学术风格各有所长,也直接影响着他们的研究生和跟随他们的青年科学工作者。我国研究生制度随着政治形势几上几下,1956年在向科学进军号召下招收研究生,那时只有这三位老先生能招收研究生,人数很少,例如戴元本是张宗燧的研究生。在1957年反右斗争冲击下停止了研究生制度数年,1962~1965年恢

复了研究生制度,在文化大革命冲击下又被取消。1978年又恢复了研究生制度直至今日。值得一提的是在20世纪50年代全国仅有几位老先生懂量子场论,1958年在青岛举办了全国暑期讲习班,由朱洪元系统讲授量子场论,讲稿经整理后于1960年9月由科学出版社出版,随即好几所高校开设了量子场论课程,朱洪元著的量子场论成为国内粒子物理学习量子场论的主要教科书。由于20世纪50~60年代国际国内的形势,我们国际交流的渠道只有苏联一条道,至于美欧无交流渠道,仅能从迟到影印的国际学术刊物(国家买到原版学术期刊影印后各单位图书馆订购)中获悉国际高能物理的信息和最新发表的文章。我们国内的研究成果和学术论文既不能送到国际会议也绝对不能送到美欧学术刊物发表。国内能发表物理专业的学术刊物很少,仅有《物理学报》和《中国科学》。

为了打开国际学术交流的局面,1964年8月21~31日在北京举行国际科学讨论会,邀请了日本、巴基斯坦等国科学家参加,中国科学家报告了高能物理、原子核物理和快中子物理等方面的工作。日本著名科学家坂田昌一参加了会议,受到毛主席接见并谈到基本粒子物理中的哲学思想,这对当时做

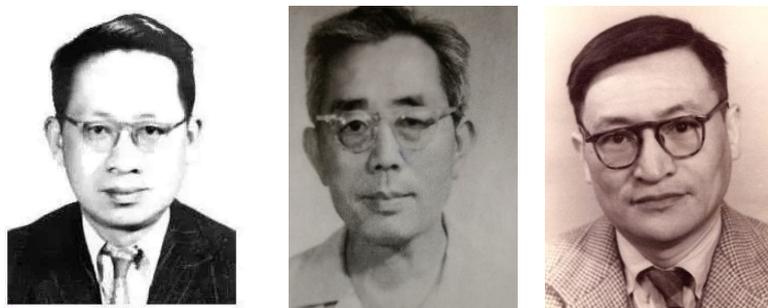


图1 我国粒子物理学家张宗燧、胡宁和朱洪元

基本粒子理论研究的人是极大的鼓舞和促进,我们决心赶超国际水平,找差距,以便大干一场,并开始为做出好成绩而深入调研。由于国家最高领导对基本粒子研究的重视,我们研究组当时在研究所的人没有下放参加当时的“四清”运动,还调动已参加“四清”运动的人回所做基本粒子理论研究。

国际上,1961年,由盖尔曼(M.Gell-Mann)及奈曼(Y.Neeman)提出了用强相互作用的 $SU(3)$ 对称性来对强子进行分类的“八重法”。这种分类非常像门捷列夫周期表对元素(原子)的分类。从数学上讲它们相应于 $SU(3)$ 对称群的不同表示,这意味着当时所有发现的强子都可以正确无误地填充在相应的 $SU(3)$ 群表示图中。八重法分类很好地说明当时已经发现的强子的自旋、宇称、电荷、奇异数以及质量等静态性质的规律性,这完全证实了强子按 $SU(3)$ 对称性分类的正确性。1964年盖尔曼(M.Gell-Mann)提出夸克假说(同时兹韦克(Zweig)也提出类似的假说)(图2),他在分析了现状以后认为对八重法分类的成功需要寻找一个基本的解释。从数学上讲,如果将产生 $SU(3)$ 对称性的基础表示的三个基作为基础客体(fundamental objects),设想它们为构成所有强子的基本单元就很容易理解为什么现有的众多介子和重子很好地按八重法分类。他将三个基相应的最小单元命名为三种夸克(three quarks),  $u, d, s$ 。由对称性的基础表示的三个基可得出三种夸克的电荷分别为  $(Q_u, Q_d, Q_s) = (\frac{2}{3}, -\frac{1}{3}, -\frac{1}{3})e$ , 表明基础客体的电荷不是电荷  $e$  的整数倍而是分数电荷。可是,自然界从未观察到分数



图2 盖尔曼(M.Gell-Mann),兹韦克(G.Zweig)

电荷的客体。因此他在文章中也提出问题:它们只是物理上不存在的数学符号吗?

1965年,莫尔柏果(G.Morpurgo)提出非相对论夸克模型,设想强子具有内部结构,由于实验上并没有发现具有分数电荷的夸克,一个直观的假定是夸克质量很大,由很重的具有分数电荷夸克和反夸克组成,它的质量超出当时实验所能及的能量,文章假定夸克质量为5 GeV。由夸克模型计算强子的静态性质如电荷、磁矩、质量等与实验符合很好。1966年,达立兹(R.H.Dalitz)进一步在非相对论夸克模型框架内研讨了介子谱和核子共振态等。

1964~1965年,国内有两个调研工作值得提起:一是原子能所理论室朱洪元先生带领大家调研“量子力学创立历史”,以便找出重大科学发现原始创新工作的思想要素;另一个重要的调研是北京大学胡宁先生领导的理论组调研“基本粒子 $SU(3)$ 对称性理论”,了解1962~1964年,强子对称性理论及基于对称性表示理论提出的基础客体“夸克”。在这两个调研工作基础上,1965年夏天,朱洪元和胡宁两位教授提议北京3个单位(北京大学、中国科学院数学研究所和原子能研究所)基本粒子理论研究工作定期举行研讨会(后来中国科技大学研究人员也加入),深入调研、共同学习、研讨国际上的最新进展。朱先生要我们几位研究生停止了色散关系的研究工作转入基本粒子物理对称性和夸克模型方向的研究。讨论班曾突出地介绍了当时国际上最新进展和存在于基本粒子物理强子对称性理论中的困难和矛盾。例如,北京大学老师就粒子物理理论研究几个方面的国际进展分别作综述报告,朱洪元就近代物理学的重大发展作系统的分析报告,并展开热烈的讨论。参加讨论的老师和学生逐步认识到20世纪60年代初已发现的基本粒子多达一百几十种,介子八重态、重子的八重态和十重态的强子质量谱的规律好比于早年原子的元素周期表,正像元素周期表反映原子的内部结构一样,强子质量谱的规律也是它们内部结构的反映,表明当时所谓的“基本粒子”并不基本。同时实验上测量了质

子形状因子,揭示了质子不是点粒子而是具有一定大小的粒子,这使我们认识到强子具有内部结构,如何从强子具有内部组元和结构的观点研究高能物理的讨论和合作研究。基本粒子大量发现和强作用 $SU(3)$ 对称性的建立使得人们自然要问,难道成百种强子都是构成物质的基本粒子吗,还是由几种更基本组元组成的?研讨会报告了基本粒子对称性理论和强子分类新进展(包括早年坂田模型和对称性分类的成功和困难),经过调研和分析发现了20世纪60年代初实验上已表明强子具有内部结构最重要的实验事实。例如(1)电子打质子的弹性散射实验发现了质子不是点粒子而是有一定大小内部结构的粒子,并且测量了质子的半径,大约在 $0.8\text{ fm}$ ,因此质子以至于上百种强子并不是“基本的点粒子”。(2)前面已表明一百多种基本粒子能按对称性分类,像原子的门捷列夫周期表一样排列成八个一组或十个一组。门捷列夫周期表是原子内部电子分布结构的反映,基本粒子的八重法分类也必然反映质子、中子、介子等强子具有内部结构。(3)实验上还发现许多高自旋的新粒子,如自旋 $3/2, 5/2$ 等,它们很可能由自旋 $1/2$ 的更基本成分组成。然而实验上所有观测到的粒子都是整数电荷,盖尔曼提出的分数电荷夸克能否成为组成众多强子的基本成分?在那个时候要承认自然界存在分数电荷粒子在物理概念上是个重要突破。

## 二、层子模型提出

在这些事实面前,朱洪元首先从强子具有内部结构这一物理图像出发,创新地提出强子是由物理上真实存在的下一层次的基本成分元强子(1966年6月才称为层子)构成的束缚态,那么强子所参与的相互作用归结为元强子所参与的相互作用,但那时并不知道束缚元强子相互作用动力学机制,他提出通过唯象地引入表达元强子在强子内部运动的波函数来着手研究。他引入内部结构波函数,借用原子核理论中处理电磁跃迁和弱衰变的方法,并将夸克作为元强子的一种方案去构造强子具有内部结

构的模型,研究了强子的电磁衰变和弱衰变具体物理过程。模型假定强子内部的元强子很重,在 $10\text{ GeV}$ 以上,它们在强子内部的运动,可以作非相对论近似,但强子作为一个整体运动,必须具有相对论协变的性质。具体计算中首先在强子静止坐标系,然后应用洛伦兹变换得到相对论强子波函数,对于物理过程则利用强子内部波函数以及物理过程中初、终态强子波函数的重叠积分将这些物理过程关联在一起给出较确定的理论预言。其结果得到了实验数据的支持,首战告捷。朱洪元起初邀请了何祚庥、汪容、冼鼎昌、戴元本等小范围内讨论,很快在定期合作研讨会上报告,这一创新尝试报告后极大地鼓舞了参与合作的基本粒子理论研究工作应用到更多的电磁衰变和弱衰变具体物理过程扩大战果。何祚庥物理思想活跃并具有很强的宣传鼓动和科研组织能力,先在原子能所理论室组织一批青年和研究生讲解朱洪元的思想和计算方法,列出扩大可计算的一系列电磁相互作用和弱相互作用过程的菜单,分给各位参加者。很快我们投入紧张的计算相继获得了一批计算结果,相互印证和激励,确认了这一模型的理论框架。进一步中科院数学所戴元本将内部结构波函数推广到相对论Bethe-Salpeter波函数。北京大学几位老师利用 $SU(6)$ 对称性质和相对论波函数的普遍性质系统地表达了模型计算结果。由于强子是元强子或反元强子的束缚态,强子不能当作点粒子处理,因此要发展计算含束缚态的矩阵元的方法,自洽地处理束缚态的内部运动波函数。1965~1966年间,在共同合作研讨的基础上形成了北京基本粒子理论组,共有39人,发表了3本论文集,共42篇论文,建立了基本粒子层子模型理论。通过这些模型探讨,人们认识到众多强子应具有内部结构,由下一层次的最小单元组成。强子的电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用的研究应建立在强子束缚态模型的基础上,同时还要充分考虑强子的结构特性和各种过程中的运动学特点,才能正确地解释强子的寿命、宽度、形状因子、截面等动态性质。一系列的研究成果表明不



图3 我国北京基本粒子理论组研讨层子模型理论,坐在前排沙发上左起何祚庥、戴元本、朱洪元和胡宁等  
(此照片来自人民画报为报道层子模型摄于20世纪70年代)



图4 著名物理学家钱三强,周培源

同的强子的动态性质,通过强子所满足的 $SU(3)$ 对称性及相对论协变的束缚态波函数有着一定的内在联系。通过元强子所参与的相互作用和强子内部结构波函数及波函数的重叠积分,将强子的一系列电磁相互作用过程和弱相互作用过程关联在一起,获得介子和重子的性质和衰变几率,当时的实验数据验证了束缚态模型的理论对一系列过程的计算结果。模型成功地说明当时粒子物理实验数据的一些主要方面,纷繁的粒子物理现象呈现出有机联系的、统一的图像。

众所周知,科学论文只有发表了才能立此存照,连发表的日期都很重要。可是1949年以后从不允许将文章送到国外期刊发表,闭关自守,论文必须发表在国内学术刊物,否则大逆不道。更不可思议的在文化大革命开始后,为了破旧立新的革命理想又先后将国内学术刊物全部停刊,写好的多篇论文无处投稿发表,怎么办?大家心急千方百计寻找

发表的刊物,并向上级反映。钱三强(当时第二机械工业部副部长、中国科学院副院长)还特地来到中关村原子能所听取了汇报,鼓励我们努力做出好成绩并应允解决期刊发表问题。幸好,在钱三强和周培源(北京大学副校长)两位老前辈(图4)和老领导的关怀和干预下,这42篇论文得以在第二机械工业部主管的《原子能》杂志1966年第3期和7~8期和《北京大学学报》1966年第2期上发表(这两个刊物尚处于停刊前夕)(图5)。在当时条件下不提倡个人署名发表文章,大多数文章以集体署名的方式发表,脚注处标明撰稿人。实际上,这些文章发表时并没有用“层子”这一名称,最开始用的是“元强子”,顾名思义是组成强子的组元。层子一词是在1966年暑期物理讨论会之前在民族饭店准备会议报告时众多参加人员讨论由钱三强拍板确定的,源于物质结构深入到下一层次,很可能有无限层次,英文译成“straton”。层子是组成强子的最小成分,它可以是具有分数电荷的夸克也可以是其他可能的整数电荷组成成分,有待未来的实验判断。模型构成以夸克为例,计算结果表明与所有已知众多实验数据相自洽。虽然同样以夸克为例构成模型,但相对于当时的非相对论夸克模型,我认为层子模型的创新点有三:(1)基于强子具有内部结构,它们是层子或层子与反层子的束缚态的物理图象,引入反映强子内部结构的波函数较系统地计算了一系列

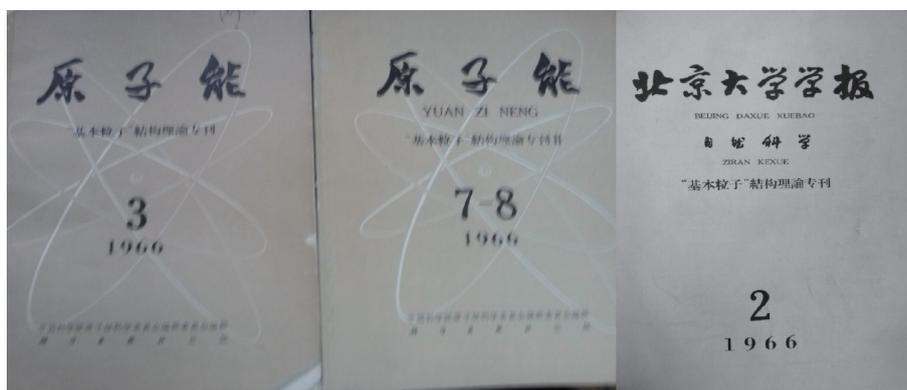


图5 1966年三本论文集发表了共42篇文章

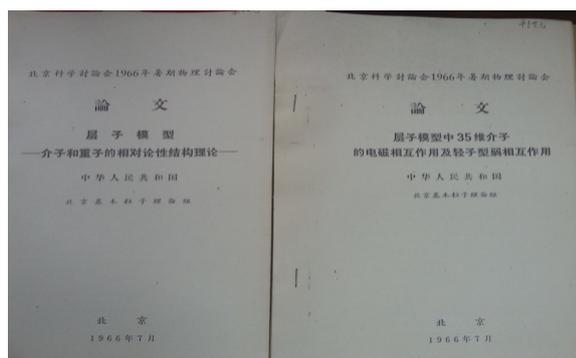


图6 1966年暑期物理讨论会上报告的两篇论文

的强子束缚态的弱相互作用和电磁相互作用过程矩阵元;(2) 利用包含层子间动力学信息的强子内部结构波函数和波函数的重叠积分将一系列过程

关联在一起,增强了计算结果的关联性和确定性;(3) 强子的自旋波函数和空间波函数相对论化以描述高速运动的强子。

在北京科学讨论会1966年7月暑期物理讨论会(图7)上以“北京基本粒子理论组”集体署名的方式报告了层子模型理论所取得的有科学价值的研究成果(图6)。著名物理学家萨拉姆(A.Salam)和与会科学家对层子模型的结果给予了好评。在当时情况下并非所有参加的研究人员能够参加会议,各单位党组织从政治上严格审查和筛选参加暑期物理讨论会的代表和报告人,仅有少数几位代表参会,以至于我们这些参加层子模型工作的大多数研



图7 北京科学讨论会1966年暑期物理讨论会

究人员不被信任被拒之会外。当时,这些研究成果领先于国际上非相对论夸克模型,比国际上同类相对论夸克模型要早1~2年左右。遗憾的是我们的文章以中文发表在国内非常普通且即将停刊的期刊上,国际学术界无法了解和引用这些成果。1966年暑期讨论会后,层子模型的结果可能由参加会议的萨拉姆和日本科学家介绍到国外,以至于国际著名科学家温伯格(S.Weinberg)后来说:“北京一个小组的理论物理学家长期以来坚持一种类型的夸克理论,但将其称之为层子,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的实际”(见温伯格著《最初的三分钟》)。

### 三、层子模型传承

层子模型取得系统成果不久,由于文化大革命被迫停顿,科研人员纷纷下放到农村和部队农场改造思想,无一幸免。可以设想如果没有这十年中断,我们这些刚入门科研工作的研究生和青年科学工作者正值有创新能力的时期,很有可能在层子模型基础上做出一些重要的贡献。举个例子来讲,层子模型研究过程中曾遇到自旋和统计的困难,1966年中科大刘跃阳的文章尝试以三套夸克方案来解决,如果坚持探索并选对对称群完全可能走向提出

色自由度(国际上1972年出色自由度,1973年提出量子色动力学)概念的路上。然而科学研究道路上是没有“如果”的,有时谁先捅破窗户纸可能就是重大突破,其他人再谈“如果”也是无用的。十年停顿深深影响我们这一代人,甚至更远。70年代初,恍如大梦醒来发现国际上粒子物理理论飞速发展,早已从10多年前的夸克模型发展到动力学的标准模型理论。不仅非相对论夸克模型在随后的2~3年内发展为相对论夸克模型,特别是美国1967~1968年电子-质子深度非弹散射实验,弗里德曼(J. I. Friedman)、肯德尔(H.W.Kendall)和泰勒(R.E.Taylor)发现了标度无关性规律(scaling law),这一规律表明他们发现了质子中称为“夸克”的更小的粒子,证实了强子内部夸克存在,完全确立了强子内部的最小单元夸克。理论家布约肯(J.Bjorken)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点粒子相互作用。质子内不只是夸克模型中的三个夸克(称为价夸克)而且还有由夸克和反夸克构成的海夸克以及传递夸克之间相互作用的胶子。此规律表明大动量迁移下电子看到了质子内由夸克,反夸克以及将它们束缚在强子内部的胶子组成的。那时著名物理学家费曼短暂访问斯坦福直线加速器中心(SLAC),他以物理直观分析标度



图8 1978年11月粒子物理战略研讨会参会人员桂林大榕树下的合影,中立者为钱三强

无关性规律的物理含义,洞察质子内部结构图象并提出质子内的这些无穷多点粒子为部分子(Parton)概念。由此人们构建了“部分子模型”成功地描述了高能碰撞过程中各种物理现象。

同时基于 Yang-Mills 非阿贝尔规范理论,描述夸克和轻子之间电磁相互作用和弱相互作用统一模型于 1967 年建立,统一描述了两种不同类型的相互作用。夸克模型和层子模型中存在的自旋-统计困难也由于引入夸克具有“色”自由度而解决。1973 年建立了描述带色夸克之间通过胶子传递的量子色动力学理论,成为强相互作用的基本理论。这意味着国际粒子物理学发展已从夸克模型发展到夸克和胶子相互作用动力学理论阶段。

20 世纪 70 年代初,我们刚从完全停顿状态到允许每周可用一半时间做研究,朱洪元和胡宁两位老先生鼓励我们在层子模型基础上深入和扩展已取得的成果。例如,1974 年何祚庥和黄涛基于强子是由层子和反层子组成的束缚态图象提出的复合粒子场论。又如丁肇中和里克特发现粲粒子后将层子模型推广到  $SU(4)$  研讨新的粲强子内部结构等。可是文化大革命迫使粒子物理研究仍停顿在 10 年前的唯象模型水平,再用已被搁置十年的层子模型理论在国际上已毫无竞争力。1978 年 8 月我国派出以朱洪元为团长的代表团首次参加了在日本东京召开的第 19 届国际高能物理大会,开始并逐步扩大了国际学术交流,认识到国内粒子物理学发展与国际发达国家的水平差距很大。我们只能刻苦努力,奋起直追。同年 11 月粒子物理理论科学家们聚集在桂林举行了战略研讨会研究国内粒子物理理论下一步如何发展,钱三强亲自参加了会议并寄予了期望(图 8)。

时隔十多年后,我国科学发展终于迎来春天。国际交流不扩大,派出和请进增多,1980 年召开了广州粒子物理国际会议作为开端,请了多位海外著名华裔粒子物理学家参加,诺贝尔奖获得者李政道和杨振宁特邀出席。当年的北京基本粒子理论组决定请朱洪元代表所有参加者在会议上做层子模型研究的总结报告(题目为 Reminiscences of the

straton model),系统地总结了层子模型理论的物理动机,计算技巧和主要物理结果,以英文发表在会议文集。与会者李政道,杨振宁以及华裔粒子物理学家对 20 世纪 60 年代层子模型所取得的成就给予了肯定和好评。1982 年,朱洪元、胡宁、何祚庥、戴元本等 39 人荣获国家自然科学奖二等奖,奖金平分。

层子模型这一成就由国内几位老前辈带领一批中青年科学工作者创新提出新理论、新方法,受人瞩目。从科研学风上来讲层子模型这一成就至少有三点值得称赞和传承。第一,创新精神,在朱洪元和胡宁两位老先生的带领下创新地建立了描述强子内部结构的相对论性层子模型理论。第二,合作攻关,在完成层子模型理论过程中,不同单位的研究队伍 39 人合作攻关完成,这在中国理论物理学史上也是少见的。第三,人才培养,在短暂的一年时间内这一研究团队完成了 42 篇论文,其中大多数参加者为研究生和青年科学工作者,从对粒子物理领域一无所知到工作在这一领域的前沿。我们这些年轻人很荣幸参加了这项理论研究,学习几位老一辈科学家的物理思想和科研方法,在层子模型框架内计算了强子的电磁和弱形状因子和电磁跃迁过程以及推广到强相互作用的尝试等,研究生也完成了毕业论文,青年科学工作者受到了训练,所有参加者都从中熟悉了高能物理当时的前沿课题,培养了独立从事研究的能力,掌握了研究方法。

改革开放开创了科学研究的新局面,部分早年参加层子模型理论研究的学者受到过良好的训练,较快地从不同角度开展电弱统一理论和量子色动力学理论的研究,追到粒子物理学前沿做出成绩,从研究成果中也可以看到当年层子模型对他们的影响,例如有些人应用强子波函数研究强子物理和重味物理。这几个单位中在中断十年后能奋起直追迅速成长起来的多位教授和科学家起到了承上启下和学术带头人作用。他们从 20 世纪 80 年代初就开始培养了一批优秀的研究生,对于全国粒子物理研究队伍成长和增强参与国际竞争能力都起到了重要的作用。