

1990年诺贝尔奖金物理学奖获奖成果简介

顾以藩

(中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

美国物理学家杰罗姆·弗里特曼 (Jerome Friedman)、亨利·肯德尔 (Henry Kendall) 和加拿大物理学家理查德·泰勒以他们在电子-核子深度非弹性散射实验方面的开创性研究荣获 1990 年诺贝尔奖金物理学奖。他们这项获奖的工作是在 60 年代后期到 70 年代初之间完成的。通过研究首次证实了质子和中子中夸克的存在。在粒子物理发展过程中,这是一个重要的里程碑,标志着人类对物质结构的认识深入到了一个新的层次。

—

60 年代是夸克模型逐步发展和形成的时期。在这之前,从 30 年代一直到 50 年代初,人们认为质子、中子和电子是构成通常物质的基本单元。随着大加速器的建造,在实验研究的过程中发现了数以百计的新粒子,统称为强子。它们的“基本性”受到了质疑。物理学家开始寻找它们的内部对称性,尝试可行的粒子分类方案。李群的概念被应用到粒子物理学中来。1961 年,提出了按 $SU(3)$ 群表示对强子进行分类的方案,将当时所有已知的重子与介子分别表成 $SU(3)$ 八维表示的成员,称作八正道方案¹⁾ (M. Gell-Mann; Y. Ne'eman)。这个方案预言了 Ω^- 粒子的存在,并给出它的质量、超荷、弱衰变方式以及寿命等性质。1964 年,在八正道方案的基础上又进一步提出了夸克模型 (M. Gell-Mann, G. Zweig)。在这个模型中引进了三种假设的基础粒子,名为夸克;它们(和它们的反粒子)之间的不同组合构成了各种强子。此后不久,实验上发现了 Ω^- 粒子,它的所有性质都和 1961 年的预言相符,有力地支持了夸克图象。夸克模型在描写强子谱与强子静态性质方面取得了广泛的成功。

但在当时,对待夸克有两种态度。许多物理学家认为:采用 $SU(3)$ 对称性并不一定

要求夸克的真正物理存在。夸克的提出者之一盖尔曼 (M. Gell-Mann) 自己就曾经强调夸克只是“纯粹的数学实体”(“purely mathematical entities”)。特别是夸克模型要求夸克具有分数电荷,而带分数电荷的粒子从来没有确定地看到过。另一些人则相信夸克是真实的粒子,可以象原子核中的核子即质子和中子那样直接观察到。但是,寻找自由夸克的努力却始终未见成效。这就导致了现时普遍接受的一种解释——所谓夸克囚禁的假说,即存在于夸克之间相互作用的特有性质决定了夸克一旦束缚在强子内部就不能彼此分开而成为自由粒子。

在实验方面,对于核子内部结构的研究早在夸克模型提出之前就在进行了。一种行之有效的办法是借助于其他粒子(称为探针)的轰击。电子(其他轻子如 μ 子和中微子也一样)在当前实验水平上是类点粒子,而且它的相互作用性质清楚,因此用来作为考察核子结构的探针,分析比较简单。50 年代间,在美国斯坦福大学创建的电子直线加速器 MARK III 上,利用高能电子在各种原子核上的弹性散射,对原子核以及核子的电荷分布进行细致研究,给出了关于核子结构的首批信息 (R. Hofstadter)。此外,还开展了最早的非弹性散射

1) 这个名称取自佛教名词“八正道”(或“八圣道分”),目前国内文献上多译成“八重法”或“八维法”,似已失其原意。

研究,集中于测量核子共振态的电致产生 (W. Panofsky).

为 MARK III 上获得的研究成果所鼓舞,在一些物理学家积极倡议和推动之下,1961 年在斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 开始建造一台更高能量的电子直线加速器,并于 1966 年完成。这就是有名的 SLAC 二英里长的电子直线加速器。它最初的能量设计指标为 20 GeV,实际达到 24 GeV (以后又逐步增大),作为当时 (以及长期保持为) 世界上最高能量的电子加速器,为新一代的实验研究工作奠定了基础。

二

在上述背景情况下,从 1967 年夏天开始,弗里特曼、肯德尔和泰勒会同他们在马萨诸塞理工学院 (MIT) 及 SLAC 的合作者组成实验组 (简称 MIT-SLAC 实验组),在 SLAC 二英里电子直线加速器上进行了电子在核子上的深度非弹性散射的研究工作。深度非弹性散射在当时是一个尚未有人涉猎过的新的实验领域。当入射电子能量由低向高上升时,相继出现弹性散射和核子共振区。当入射电子的能量很高时,即在大 ν 和大 q^2 条件下 ($\nu = E - E'$ ——初末态电子能量转移; q^2 ——动量转移平方值),核子“碎裂”成为许多强子,即进入深度非弹性散射区,出现“连续区”激发。

MIT-SLAC 实验组的研究计划覆盖了很大的动量转移与反冲强子系统丢失质量范围。在实验中只测量散射电子,这类实验称做单举散射实验。从加速器来的 4.5—20 GeV 初级电子打到固定靶 (氢、氘及其他元素材料) 上,散射电子在两台精心设计建造的磁谱仪中进行动量重建。其中,8 GeV 谱仪测量粒子动量上达 8 GeV/c; 20 GeV 谱仪具有较小立体角,测量粒子动量至 20 GeV/c。谱仪中包括了闪烁计数器描述仪、气体切连科夫计数器和电磁簇射计数器。入射电子能量、散射电子能量以及角度的测量都保证了良好的分辨性能。

早在实验开始之前,理论预期非弹性谱会

象电子-质子弹性散射那样随 q^2 而急剧减弱。第一批 6° 散射角的测量结果却是出乎意料的: 大角散射的电子比预期的要多得多。非弹性散射截面 (或表为结构函数,即截面中反映核子内部结构的因子) 呈现出平坦的 q^2 关系,并且可以简单地表示为无量纲变量 $x = q^2/2m\nu$ (m 为核子质量) 的函数 (而不是 q^2 和 ν 分别的函数)。这种现象被称做标度无关性,由于变量 x 是无量纲的,既没有质量标度也没有长度标度。以后进行的测量又增加了 $10^\circ, 18^\circ, 26^\circ$ 和 34° 散射角的数据。在大的 q^2 范围里,标度无关性现象表现得十分明显。

这个发现引起了一系列的理论工作,试图从物理上解释标度无关性现象。最简单的也很成功的一种方案是费因曼 (R.P. Feynman) 于 1969 年提出的部分子模型。按照这个模型,核子是由少数动态的类点散射中心,即称为部分子,构成的。电子在核子上的非弹性散射可以看成是电子在各个部分子上非相干准弹性散射之和。电子和单个部分子之间的基本作用是单纯的电磁相互作用,可以借助于量子电动力学进行计算。不难从数学上证明,受电子碰撞的部分子的动量可以从电子散射后的能量与角度计算出来。因此,测量某个能量末态电子的角分布就能定出部分子的动量分布。鉴于不同作用能量下散射电子的角分布来源于同一个夸克分布,这就表现出了实验上观察到的标度无关性现象。

由上可见,在某种意义上,MIT-SLAC 的实验是 60 年前卢瑟福发现原子核的实验的“重演”。在 α 粒子散射实验中, α 粒子通过大角散射的事实导致原子内存在类点核的结论。在电子散射实验中,电子通过大角散射的事实导致核子内存在类点组分即部分子的结论。“重演”当然是在不同物质层次上进行的。

在 1970 年的基辅国际高能物理会议上,MIT-SLAC 实验展示的部分子内存在准自由类点组分的证据作为事实得到了确认。

这些类点组分或部分子进一步被认同为诠释强子谱所采用的夸克: 从电子-核子散射数

据定出部分分子自旋为 $1/2$ ，与夸克相同；中微子-核子散射数据与电子-核子散射数据联合起来得出部分分子电荷，也与夸克预期的分数电荷值符合得很好。此外还发现带电部分分子仅仅携带大约一半核子总动量，另外一半动量为中性部分分子所携带。这种中性部分分子就是作用在夸克之间的强相互作用力的场量子——胶子。

这样，自从夸克作为物质基本单元提出以来，人们虽然始终没有“看到”自由夸克，但是通过高能电子在核子上的散射第一次“看到”了存在于核子内部的夸克。

三

在弗里特曼-肯德尔-泰勒的工作之后，强子中存在夸克的证据也在采用其他轻子—— μ 子、中微子及其反粒子作为探针的深度非弹性散射实验中观察到。解释这些实验采用了散射在轻子与部分分子之间进行的相似图象。

在正负电子湮没产生强子的过程中发现了喷注现象，这被认为是看到了各别夸克的证据；类似的现象也在很高能量下的质子-质子或质子-反质子碰撞过程中出现。

甚至在强子碰撞过程中也观察到了类似卢瑟福散射实验的情况，即强子中的部分分子直接进行硬散射而表现为单粒子单举截面在大横动量区显著大于预期值，即所谓大 p_T 现象。

物质的夸克亚结构在所有各种相互作用——电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用中展现出来。用夸克-部分分子模型描写和分

析各种高能反应过程的实验结果显示了高度的自洽性。所有这些充分肯定和支持了弗里特曼-肯德尔-泰勒的发现，并彻底改变了物理学家中对于夸克作为真实基本粒子的动摇态度。

弗里特曼-肯德尔-泰勒的研究成果为进一步研究物质基本结构开辟了前进的道路。两个年代以来粒子物理的研究进程充分表明：人类对于物质结构的认识，已经从他们的工作开始扎扎实实地进入到了一个新的层次——夸克-轻子的层次。

今天，以 MIT-SLAC 实验为发端的轻子-核子深度非弹性散射研究，无论在运动学范围或是实验精度方面都有了很大的扩展和提高。研究的内容也从核子结构研究扩大到其他方面。德国 DESY 实验室即将建成的 HERA 对撞机，采用 30GeV 电子同 820GeV 质子实现对撞，预期将成数量级地拓展质心能量及动量转移范围，为电子-核子散射物理开辟崭新的实验研究前景。

弗里特曼-肯德尔-泰勒在粒子物理研究中做出的杰出贡献，在 20 年后得到了诺贝尔奖，说明他们的工作是经得起时间的考验的。

弗里特曼和肯德尔都是马萨诸塞理工学院教授。泰勒是斯坦福大学教授，长期在 SLAC 从事实验研究。他在 70 年代间在 SLAC 二英里直线加速器上领导的纵向极化电子在氦核上散射的实验，令人信服地测出了来源于电弱相互作用干涉的小到 10^{-5} 的宇称破坏效应，也是一项十分出色的工作，赢得了粒子物理学界的高度赞誉。

激光化学和激光物理讨论会将于 1991 年 5 月在大连召开

由中国科学院大连化学物理研究所、中国科学院物理研究所、复旦大学、南京大学联合主办的“激光化学和激光物理讨论会”将于 1991 年 5 月 19 日至 6 月 1 日在大连举行。会议的主要内容有：1. 超短脉冲激光及其应用，特别是飞秒激光和超快现象。2. 宽范围可调激光及其在化学和物理学中的应用。3. 化学反应、表面和界面、生物分子的激光探测及激光辅助探测。下列著名学者将应邀作系列演讲：

Prof. S.T. Ceyer(MIT); Prof. K.B. Eisenthal

物理

(Columbia); Prof. M.A. El-Sayed (UCLA); Prof. R. M. Hochstrasser (U Penn); Prof. Y.T. Lee (李远哲) (UC Berkeley); Prof. E.W. Schlag (TU Munchen); Dr. C.V. Shank (LBL); Prof. Y.R. Shen (沈元壤) (UC Berkeley); Prof. C.L. Tang (汤仲良) (Cornell).

同时欢迎与会者报告与本次会议内容有关的学术论文。

(张承浩)