

1990年诺贝尔物理学奖授予美国物理学家杰罗姆·弗里德曼、亨利·肯德尔和加拿大物理学家理查德·泰勒，奖励他们在六十年代末七十年代初对于电子与质子及束缚中子深度非弹性散射进行的前驱性研究，这项研究对粒子物理学中夸克模型的发展曾起过重要作用。这是继霍夫斯塔特于1961年，丁肇中和里克特于1976年，费奇和克罗宁于1980年，鲁比亚和范德梅尔于1984年以及莱德曼、斯瓦茨和斯坦博格于1988年之后，实验粒子物理学家又一次荣获自然科学中的最高嘉奖。这件事说明了实验粒子物理学在当代物理学中占有相当重要的地位。

一、大型电子直线加速器的建设

这三位获奖者中，有二位（弗里德曼和肯德尔）是麻省理工学院（MIT）的物理学教授，另一位（泰勒）是斯坦福大学直线加速器中心（SLAC）的物理学教授。他们三人都是六十年代 SLAC-MIT 研究小组的关键人物。在他们主持下进行的“SLAC-MIT 实验”取得了有关核子（质子和中子）内部结构的重要信息，为进一步研究物质最深层结构铺平了道路。

这项成果的取得，首先要归功于高能加速器的建设。图1是从二十世纪三十年代开始到六十年代末，各种加速器的发展概况示意图。图中①表示电子感应加速器，②表示电子同步加速器，③表示同步回旋加速器，④表示电子直线加速器，⑤表示质子同步加速器，⑥表示质子直线加速器，⑦表示回旋加速器，纵轴表示加速器的能量指标。从图中可以看出，六十年代中期，电子直线加速器的能量处于领先地位，图中有一个点代表的就是 SLAC 新建的 20GeV 电子

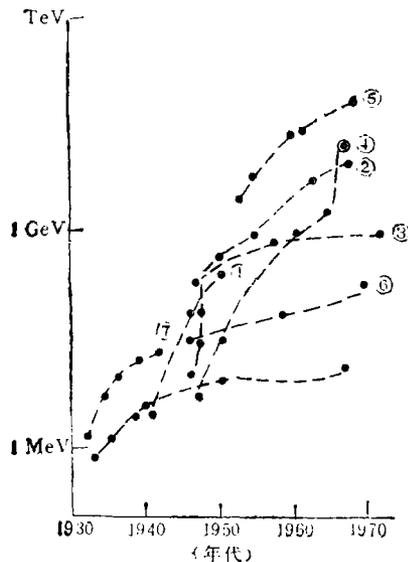


图1 加速器发展示意图

研究物质结构的重大突破

谷 青

直线加速器。

著名物理学家汉生和斯坦福大学的同事们发明了速调管微波振荡器后，于1947年创制了第一台电子直线加速器。1952年第三台电子直线加速器在斯坦福大学建成，命名为 Mark III，可使电子加速到 1 GeV。霍夫斯塔特就是用这台设备进行电子质子散射实验，对核子结构作了奠基性研究，由此判定质子是费米子，直径不小于 10^{-13} 厘米。在他的倡议下，斯坦福大学从1962年起，兴建能量大于 20 GeV 的电子直线加速器。微波加速的真空管道长 2 英里（3 公里），安装在 7 米多深的隧道里，280 号高速公路横跨其上，巍然壮观。加速管道每 12 米为一单元，每单元有一台安装在地面上的大功率（24 兆瓦）速调管微波振荡器提供驱动电场。共有 245 台类似的振荡器。在地下隧道中真空管道靠粗大的钢筒支持，用激光束准直，要求 3 公里长度的准直偏差不得超过千分之一厘米（参看本期封四）。在真空管道中安装有 8 万多个中空的铜盘和 8 万多个中空的铜柱。3 公里长管道的末端，电子束要通过 3 百米的开关区，再进入两个终端实验站，终端站 A 研究的就是电子散射实验。这是一座高约七层楼、面积二千多平方米的大厅，内有三台巨型磁谱仪，如图 2。入射电子束首先打到充有液氢（或液氘）的靶子上，靶子呈筒状，筒上开有铝窗或不锈钢窗。散射的电子投向四面八方。三台磁谱仪都可沿弧形钢轨移动，以接收不同角度的电子。三台磁谱仪接收电子的最大能量分别为 20 GeV、8 GeV 和 1.6 GeV。其中 20 GeV 磁谱仪最大，长达 50.2 米，重 1700 吨。

这座大型加速器的诞生，与斯坦福高能物理实验室主任、美籍华裔物理学家潘诺夫斯基教授的积极活动是分不开的。经过五年的周折，他们的建设方案才在 1962 年得到批准。

SLAC 建设之初，前面提到的理查德·泰勒，负责磁体和谱仪的安装，后来成了实验项目的总负责人；杰罗姆·弗里德曼和亨利·肯德尔原来都是斯坦福大学的教师，后转 MIT 任教，新加速器工程上马后，他们参加了 MIT 研究小组，回到 SLAC，二人亲自为谱仪制作粒子探测器，后来负责处理实验数据，1972 年代表全体实验小组成员作了总结报告。

二、电子质子弹性和非弹性散射

1967 年，大型电子直线加速器建成并达到设计能

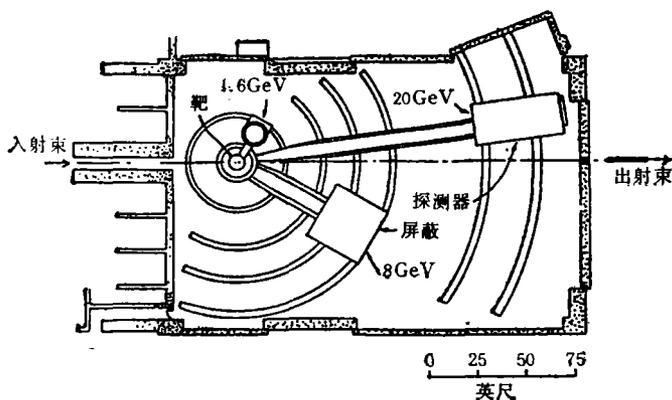


图2 终端站A实验大厅

量。作为试运行开始了一系列电子质子散射实验。实验结果证明性能良好，不但电子束入射能量比一般大得多，而且电子束强度也大得多。在经过论证的十九项实验方案中，有三项是 SLAC、MIT 和加州理工学院 (Caltech) 联合提出的。这三项的内容是：电子质子弹性散射、正电子质子弹性散射、电子质子非弹性散射。第一轮实验结果很平常，只不过是进一步证实了已有结论。Caltech 成员感到工作过于单调，决定退出联合小组。SLAC 和 MIT 成员继续实验，并逐步加大电子束能量，进行电子质子非弹性散射实验，测到了三个峰值，这三个峰相当于质子的共振态。再进一步把能量加大到几 GeV 量级，进入所谓深度非弹性区域。这是从未有人探索过的区域。为什么叫深度非弹性呢？因为这时电子的能量是如此之高，竟可以深入质子内部，甚至把质子打碎。这时非弹性散射公式 $e + p \rightarrow e + X$ 中的 X 可以是一系列强子。由于质子分裂成碎片，要吸收更多的能量，散射电子的能量要比平常低得多。

然而，出乎实验者预料，当进入深度非弹性区域时，电子损失了很多能量后，竟比能量损失小时，以更大的几率出现在大角度上。换句话说，就是电子质子深度非弹性散射的大角度散射截面，比弹性散射的大角度散射大得多。起初他们还以为是结果不正确，或者是解释有错误，还可能是因为出现了系统误差，误差的来源也许是所谓的辐射修正，即入射电子或散射电子以光的形式辐射掉了相当大的能量。于是他们对辐射修正作了仔细研究。结果证明，辐射修正并不重要。他们把电子质子深度非弹性散射和电子质子弹性散射及电子电子弹性散射分别进行比较，发现随着散射角的增大，电子质子弹性散射截面急剧下降，而深度非弹性散射截面与电子电子弹性散射截面之比却保持不大的变化。这一事实表明，电子以极大的能量深入到质子内部时，遭遇到的不是“软”的质子靶，而是和电子类似的点状“硬”核。然而，当时实验家们并没有领悟到

这一点，而是感到迷惑不解。在发表第一批实验结果时，他们非常谨慎。大家知道，六十年前盖革和马斯登发现 α 粒子大角度散射时也曾出现过类似情况。如果不是卢瑟福的及时指导和理论分析，也许会错失发现原子核的良机。SLAC-MIT 小组在六十年代末的情况虽然比较复杂，但也有类似之处。如果不是有理论家，特别是布约肯和费因曼的及时配合，恐怕一时很难对实验结果作出正确解释。时隔半个多世纪的两件有历史意义的重大实验发现，都为我们提供了理论与实验相辅相成的典型例证。

三、历史性的进展

1932 年查德威克发现中子，是继 1911 年卢瑟福论证原子有核之后的又一重大进展，从此关于原子核结构的知识与日俱增。海森伯在发现中子的基础上提出核由质子和中子构成的主张，于是中子、质子和电子被认为是物质的三种基本成分。然而不久就认识到，质子和中子比电子复杂的粒子。因为核子具有反常磁矩，会产生出人意料的强磁场，这只能解释成核子内部有电流。五十年代，用电子散射方法研究核子结构，对核子内部电荷分布和磁性分布进行了测量。与此同时，一大批强子陆续发现，它们的性质与核子类似。于是促使人们进行有关强子分类的理论研究。经过多次尝试终于成功地解决了强子之谜，其中主要是通过盖尔曼的工作。他在 1961 年提出用 SU(3) 对称性对强子分类的“八重法”。1964 年，他预言的重子 Ω^- 被实验证实，进一步促使他提出假设，即作为 SU(3) 群的物理基础的所谓三重态，实际上是三种不同的基本粒子。盖尔曼统称之为夸克，并且认为，夸克是自然界中更基本的物质组成单元，所有已知的强子都是由这三种夸克及其反粒子组成。由于夸克模型能够成功地解释许多事实，把极为复杂的事情变得非常简单，立即得到人们的普遍重视，于是掀起了一场寻找夸克的热潮。人们用海水和陨石作实验；探测宇宙射线；运用各种高能加速器，希望能找到夸克存在的证据。然而，在 1969 年以前，什么证据也没有找到。这时，大多数人已经不抱希望，认为找不到夸克存在的证据，只能解释为所谓的夸克只不过是某种数学符号，物理方程中的一个数学量而已。

费因曼和布约肯则是从另外一些角度研究这个问题。早在六十年代初，费因曼就曾用直观图象来描述高能强子之间的相互作用，认为这种相互作用是通过交换强子内部的组成部分来完成的，他把这些组成部分称为部分子。

布约肯是 SLAC 理论组的成员。他曾运用流代数研究中微子散射。当 SLAC-MIT 实验得到反常结



夸克之间的色相互作用

魏安赐



夸克和反夸克具有质量、电荷、弱荷和强荷(色荷),可以参与引力作用、电磁作用、弱作用和强作用四种基本相互作用。本文主要介绍夸克之间的强相互作用,即色相互作用。

一、夸克的味与色

目前确认夸克共有六种,即 u 、 d 、 s 、 c 、 b 、 t , 它们各有对应的反夸克,夸克的种类被形象地比拟为味道。六味夸克分为三代: (u 、 d), (c 、 s), (t 、 b)。在强子中,同一代夸克以及不同代夸克之间,都可以通过交换中间矢量玻色子而发生弱相互作用,弱相互作用可以改变夸克的味道。但是,只在不同代的夸克之间,才有弱相互作用的混合效应。

格润伯格和盖尔曼分别于 1964 年和 1972 年提出:夸克、反夸克具有发生强相互作用的内禀属性,其表征量度是一种称为强荷或色荷的量子数。每一味夸克按其在强相互作用中的状态,可以区分为三种不同的态,称为颜色三重态。每一种态具有一种色荷,每味夸克都分别具有三种色荷,形象地比拟为颜色中的三基色——红(R)、绿(G)、蓝(B)。每味反夸克也都分别具有三种反色荷,形象地比拟为三基色的补色:青蓝(反红色 \bar{R})、洋红(反绿色 \bar{G})、淡黄(反蓝色 \bar{B})。

夸克和反夸克的每种“颜色态”,都对应两种色量

果时,他转而研究电子质子深度非弹性散射,运用流代数求和规则对实验结果作了分析,并提出标度无关性(scaling)对实验结果作出解释。流代数是抽象的数学方法,他的工作一时未能得到人们的理解。

1968年8月,正当人们对标度无关性的物理意义疑惑费解之时,费因曼来到 SLAC。实验小组向他展示深度非弹性的反常结果并告诉他布约肯用标度无关性作出的解释。费因曼很感兴趣,只用了一个晚上就解决了这个难题。他把质子看成是部分子(类点粒子)的复合体,把电子质子深度非弹性散射看成是电子与部分子发生弹性散射。经过计算,证明布约肯的标度无关函数正是部分子的动量与质子动量之比。就这

子数,即颜色同位旋 I_c 和颜色超荷 Y_c 。

夸克的某种色态和反夸克的相反色态(彼此互为补色),对应的每一色量子数互相等值异号。

二、夸克相互作用的规范场理论

按照量子场论,每种粒子都对应着与之相当的场,场是没有几何形体、但有时空广延和特征量度的物质。轻子和夸克这些自旋为 $1/2$ 的费米子所对应的场称为物质场。费米子或物质场之间的相互作用,是通过自旋为整数的玻色子所传递的。传递相互作用的玻色子所对应的场称为规范场。

物理系统的基本性质(如运动方程、能量、动量、角动量等),被拉格朗日函数(体系的动能和势能之差)所表征。在确定的时空点上,描述微观粒子状态的波函数(也是粒子所对应的场的场量)具有的一定相位,表征粒子在该时刻和位置上的波动状态。把粒子的波函数在不同时空点的各自相位,分别改变与各自时空点相关的数量 $\alpha(x_\mu) \approx \text{常量}$ 。在这种与时空坐标 x_μ 有关的可变换下,若系统的拉格朗日函数具有不变性,从而相应粒子的运动规律和场方程的形式保持不变,则该粒子及其对应的场就称为具有定域规范不变性。在定域规范变换下,与其它粒子或场没有相互作用的自由粒子或自由场的运动规律,是会改变的;而自由场和规范场发生相互作用后的运动规律却是不变的。物质场之间的相互作用,往往导致场量发生和时空坐标有关的相位变化。双方都需要再和某种相应的规范场发生相互作用,才能在必然伴随的上述相位变换下具有定域规范不变性,从而双方才能保持各自原来的物理面貌发生相互作用。因此,物质场及其相应粒子之间的相互作用,是通过规范场的媒介而实现的。规范场是传递物质场及其相应粒子相互作用的具有定域规范不变性的场。

样,费因曼从深度非弹性散射和标度无关性找到了部分子模型的重要证据。

费因曼的部分子模型和盖尔曼的夸克模型有异曲同工之妙,他们从不同角度用不同方法达到了相同结论。人们很快就明白了,原来部分子和夸克是一回事。

电子质子深度非弹性散射实验还表明,盖尔曼在 1962 年提出的电中性粒子“胶子”有可能存在。1971 年韦斯柯夫和库提提出,正是这样“胶子”在夸克间传递强相互作用,才使夸克组成强子。接着,1973 年创立了量子色动力学,1979 年丁肇中小组首先找到了支持胶子存在的证据。由 SLAC-MIT 实验引起的一系列新进展,使物理学进入了一个新的时代。