

在 高能加速器上寻找自由夸克

唐孝威 杨保忠

(中国科学技术大学近代物理系)

自从 Gell-Mann^[1] 最早提出带分数电荷的夸克假设以来,用夸克理论统一解释强子谱和高能强子现象,获得了很大的成功^[2].现在人们对于夸克已经不感到陌生了.在 高能正负电子对撞实验中,观察到终态强子空间分布的双喷注现象,更明确地显示了夸克的“踪迹”.

人们迫切地希望直接观察到自由夸克.如果在实验上直接看到自由夸克,对人类进一步认识微观物质结构以及对目前的量子色动力学理论(QCD)将有重大影响.所以,世界上相当数目的实验物理组,采用各种探测手段寻找自由夸克.但是,都没有找到^[3,4].实验的基本思想是:如果自由夸克单独存在,它的分数电荷特性很容易通过它在物质中的电离作用而区分出来;如果它存在于其他原子中(夸克化学),也可以用各种不同的方法(质谱法或密立根类型的实验)来测量它的未中和的分数电荷.

按照一般的想法,既然强子是由夸克和反夸克组成,用高能粒子作为“炮弹”相互轰击,只要能量足够高,理应把强子内部的夸克打出来,成为自由的粒子.因此,在 高能加速器上进行实验去寻找自由夸克,一直是实验物理学家的一个重要课题.遗憾的是,经过多年的实验,在 高能粒子碰撞中至今没有看到自由夸克出现.尽管如此,寻找自由夸克的实验一直在进行.本文介绍几个在当前加速器最高能量区域中寻找自由夸克的实验.

一、高能质子-质子对撞实验

这是 C. W. Fabjan 等人做的实验^[4].实验是在西欧中心交叉贮存环 ISR 上进行的.实

验中两股高能质子束(p)对撞,在 pp 的质心系总能量的平方 $s = 2830$ (京电子伏)² 下进行.实验上寻找下面类型的反应产生的自由夸克:

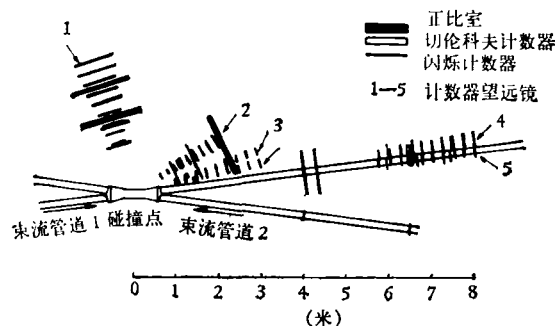
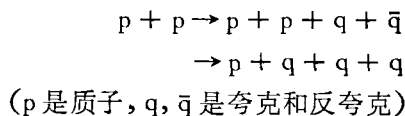


图 1 在 ISR 上寻找自由夸克的实验装置原理图

实验装置见图 1. 高能质子束分别在管道 1 和管道 2 的真空管道中飞行,在交叉处对撞,实验中用多丝正比室、切伦科夫计数器、闪烁计数器等组成许多个“计数器望远镜”,测量质子和质子对撞反应产生的次级粒子在各种探测器中的能量损失 dE/dx 和粒子的运动速度 β . 为减小能量损失的统计涨落,对同一粒子进行多次测量.分数电荷的自由夸克比起速度相同的单位电荷粒子来,在探测器中产生的能量损失异常小(对电荷 $(2/3)e$ 的夸克,能量损失为单电荷粒子的 $4/9$,对 $(1/3)e$ 的夸克,仅为单电荷粒子的 $1/9$). 实验中寻找这种事例来鉴定自由夸克.

1) 只有 Fairbank 组声称在铌球中找到有分数电荷.
2) 1 京电子伏 = 10^9 电子伏 = 1GeV.

这个实验的结果是：在约 10^{10} 次 pp 相互作用中，没有观察到一个自由夸克。从而得到：对于电荷为 $(1/3)e$ (e 为电子电荷)、质量在 20 京电子伏范围内的夸克，其产生截面的上限小于 $4 \times 10^{-35} \text{cm}^2$ ；对于电荷为 $(2/3)e$ 、质量在 20 京电子伏范围的夸克，其产生截面上限小于 $8 \times 10^{-35} \text{cm}^2$ 。

二、高能中微子打靶实验

这个实验也是在 CERN 做的，是 A. Zichichi 等人在西欧中心超高能质子加速器 SPS 上进行的^[5]。质子能量为 400 京电子伏。质子加速器可产生能量很高的次级中微子束 ν ，它们打到靶的核子上，产生反应： $\nu + N \rightarrow qq\bar{q} + \text{其他}$ (ν 是中微子， N 是核子， q 是夸克)。

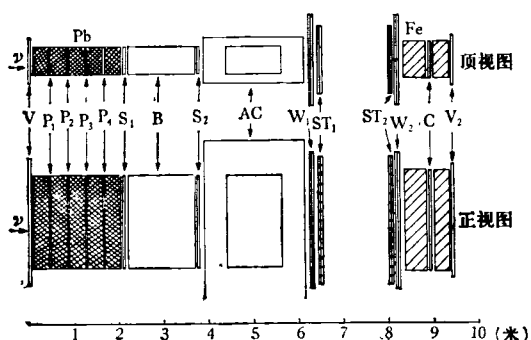


图2 在SPS上用中微子束打靶寻找自由夸克的实验装置原理图

Pb: 铅靶; V: 反符合计数器; $P_1, \dots, P_4, S_1, S_2$: 中微子反应触发闪烁计数器; B: 偏转磁场; AC: 流光室; W_1, W_2 : 多丝正比室; ST_1, ST_2 : 低 dE/dx 触发闪烁望远镜; C, V_2 : μ 子闪烁望远镜

实验装置见图2，中微子束从左侧进入实验装置，23吨重的铅作为靶，靶中的夹层闪烁计数器 P_1-P_4 以及 S_1, S_2 组成触发计数器，保证选择中微子在靶中引起反应的事件。V反符合计数器排除了各种非中微子产生的反应。靶后面的磁铁B用于去除簇射产生的低能粒子，再后面的多丝室、闪烁计数器描述仪和流光室，用于测量反应产物的飞行时间和它在探测器中的电离损失。这个装置设计得能有效记录夸克和排除本底。通过自由夸克在探测器中产生反

常小的能量损失这个特征，来鉴定自由夸克。

在这个实验中也未观察到自由夸克。1978年他们给出用高能中微子产生自由夸克的截面与高能中微子反应总截面之比，上限小于 10^{-3} 。1980年9月又报道这个比值上限小于 10^{-5} 。

三、高能正负电子对撞实验

这是在西德汉堡高能正负电子对撞机 PETRA 上工作的 JADE 合作组做的实验^[6]。这个实验在正负电子对撞反应中寻找自由夸克。主要反应为 $e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q}$ 或 $e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q} + \text{其他}$ 。探测器可以分辨电荷为 $(2/3)e, e, (4/3)e$ 和 $(5/3)e$ 的自由夸克 (e 是电子的电荷)。

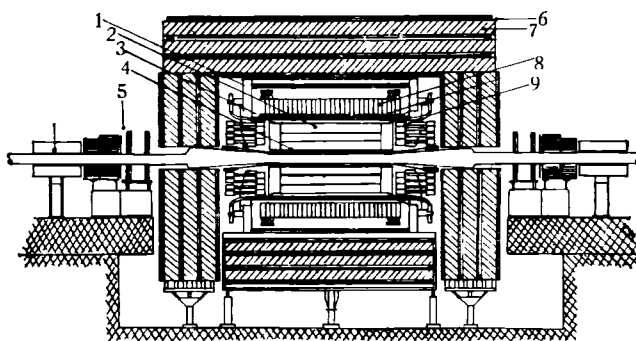


图3 JADE探测器剖面图

1. 铁轭; 2. 圆柱形漂移室; 3. 飞行时间计数器; 4. 束流管道计数器; 5. 触发系统; 6. μ 子漂移室; 7. μ 子吸收体; 8. 铅玻璃; 9. 铅玻璃端计数

实验装置见图3。实验的主要探测器是高压圆柱形漂移室。它是一个围绕着正负电子对撞点的圆柱形室，共分96个扇形单元，每个单元有16个阳极丝，室内充有四个大气压的氩-甲烷-异丁烷混合气体。它利用丝地址给出粒子径迹的径向坐标，利用原电离电子的漂移时间测定粒子的方位角，用阳极电流分配法给出粒子沿对撞束流方向 (z) 的坐标。因此，用这样一个漂移室可给出反应产物中的次级带电粒子径迹的三维空间坐标，具有较高的空间分辨本领。这个室又称为喷注室 (jet chamber)。

同时，用喷注室能够对每一个粒子径迹的

电离能量损失,独立进行 48 次取样测量.室内充气 4 个大气压,给出很好的能量分辨.整个室工作在 4.5 千高斯的轴向磁场中,利用粒子径迹在磁场中的偏转方向和曲率半径,可给出粒子的电荷极性以及粒子的“表观动量” p/Q (其中 p 是粒子的实际动量, Q 是粒子的电荷).在处理实验数据时,为了减少朗道起伏效应,取其中 60% 的低幅度脉冲求出平均值,这样可以得到每个粒子的平均能量损失.根据平均能量损失和“表观动量”,就可以完全确定粒子的电荷和质量,分辨出不同质量和电荷的自由夸克.

这个实验的结果,到目前为止也没有找到自由夸克.分析实验数据,给出了由高能正负电子对撞反应产生自由夸克的上限.在正负电子质心系总能量为 27 到 35 京电子伏的范围内.对于电荷为 $2/3$ 电子电荷、质量小于 12 京电子伏(约为质子的 12 倍)的自由夸克,其产生截面与正负 μ 子对的产生截面的比值,上限小于 10^{-2} .

上面介绍的几个实验,只是最近做的高能实验中的几个例子.从这些例子中,我们也可以看到,人们是怎样付出努力,在高能加速器上不断地搜索自由夸克.为什么在高能加速器上

找不到自由夸克呢?人们对此有种种解释.比如有人说,夸克只能绝对禁闭在强子内部,它要跑出强子,需要克服一个无穷大的势垒^[7];还有人说,自由夸克的质量比预想的要大得多,现在的高能加速器提供的能量还不能产生自由夸克,实验物理学家也寄希望于在更高能量的新加速器上继续寻找自由夸克;还有人认为,过去所做的实验中,假定的产生自由夸克机制和探测夸克的方法都是错的,所以没有能够探测到^[8]等等.虽然现在的高能加速器实验还没有找到自由夸克,但自由夸克的问题强烈地吸引着实验物理学家们作进一步的探索.

参 考 文 献

- [1] M. Gell-Mann, *Phys. Lett.*, **8**(1964), 214.
- [2] 参见《高能物理》1980 年第三、四期关于夸克学说的介绍.
- [3] L. W. Jones, *Rev. Mod. Phys.*, **49**(1977), 717.
- [4] C. W. Fabjan et al., *Nucl. Phys. B*, **101**(1975), 349.
- [5] M. Basile et al., *Nuovo Cimento*, **45A**(1978), 281. and CERN-EP/80-169, 9. September, 1980.
- [6] JADE-Collaboration, DESY, 80/71.
- [7] T. de Grand et al., *Phys. Rev. D*, **12**(1975), 2060.
- [8] A. de Rujula et al., *Phys. Rev. D*, **17**(1978), 285.

透射扫描电子显微术的一些进展*

阿·豪维

自从 1968 年 Crewe 教授及其同事们进行了场发射透射扫描电子显微镜的开创性工作^[1]以来,透射扫描电子显微术有了很大的进展.透射扫描电子显微镜 (STEM) 把扫描电子显微镜 (SEM) 和普通透射电子显微镜 (CTEM) 的优点结合起来,成为材料科学和生物学的强有力的研究工具.

Crewe 和 Wall^[2]指出,透射扫描电子显微镜的各种衬度图象与普通透射电子显微镜的相应衬度图象十分相似,这种相似性可以用倒易原理来说明^[3].倒易原理指出,当光源 S 在 r_1

位置时,位于 r_2 位置的探测器所探测到的信号振幅为 $\psi(r_1, r_2)$;将光源和探测器互易位置后,在 r_1 位置上的探测器所探测到的信号振幅为 $\psi(r_2, r_1)$,与 $\psi(r_1, r_2)$ 相等.当光源和探测器之间存在散射介质时,严格说来,上述倒易原理仅对弹性散射波成立;对能量损失小的非弹性散射波,信号的强度仍存在倒易关系,即

* 本文是英国皇家学会会员、剑桥大学卡文迪许实验室阿·豪维 (A. Howie) 博士于 1980 年 9 月来华讲学的部分内容,由北京大学物理系冯孙齐整理,未经原作者审阅.