

变革粒子的科学实验

翁以文

用概括的几句话来说，高能物理学就是探索“基本”粒子的内部结构以及它们之间的相互作用、相互转化的规律性的一门学科，它的目的是深入了解微观世界物质运动的基本规律，以求运用这方面的认识来改造世界。

高能物理学的研究工作是指实验工作和理论工作两个

方面。毛主席在《实践论》中指出：“通过实践而发现真理，又通过实践而证实真理和发展真理。”这条辩证唯物主义的认识论的原理，同样适用于高能物理学。在高能物理学的研究工作中，实验工作经常是推动理论工作的，同时，理论工作获得的结果又必须通过实验来检验，从而使理论得到验证、修改和发展。

高能物理实验所研究的物理问题包括两个方面，一个方面是研究“基本”粒子的内部结构，另一个方面是研究“基本”粒子的相互作用、相互转化的规律。从实验工作的角度来看，这两个方面的问题又常常是不能截然分开的。

关于“基本”粒子内部结构的实验

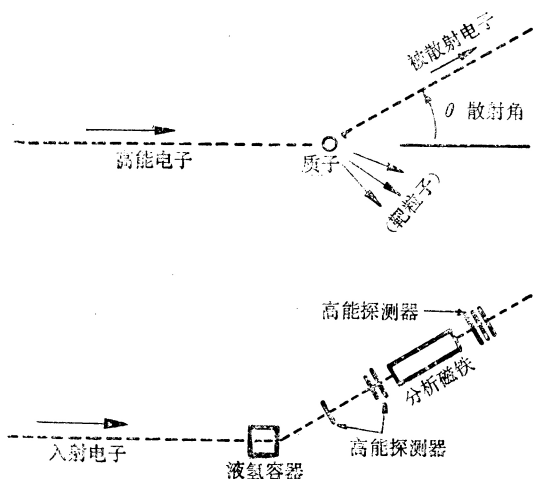


图1 电子被质子所散射

上图表明物理过程。在弹性散射时，质子向箭头方向移动(反冲)；在非弹性散射时，质子变成某个激发态粒子，或产生一些其他粒子(图中用几个箭头表示)。下图表明仪器安排(只测量被散射的电子)

到目前为止，已经积累了很多有关“强子”(参与强

相互作用的粒子的总称，包括各种介子和重子)内部结构的实验资料，可以归纳为三类：

第一类：说明强子不是点粒子

例1：用几十亿电子伏到几百亿电子伏的高能电子打液体氢的靶，观察打靶后的电子的偏转情况。发现在弹性散射时，只要散射电子稍微有一

点偏转角度，散射电子的数目就急剧下降，比质子的点模型理论值的下降快得多。这说明质子不是一个点，它的电荷及磁矩并不聚在一个点上，而且有一定的分布，半径测定为 0.8×10^{-13} 厘米。

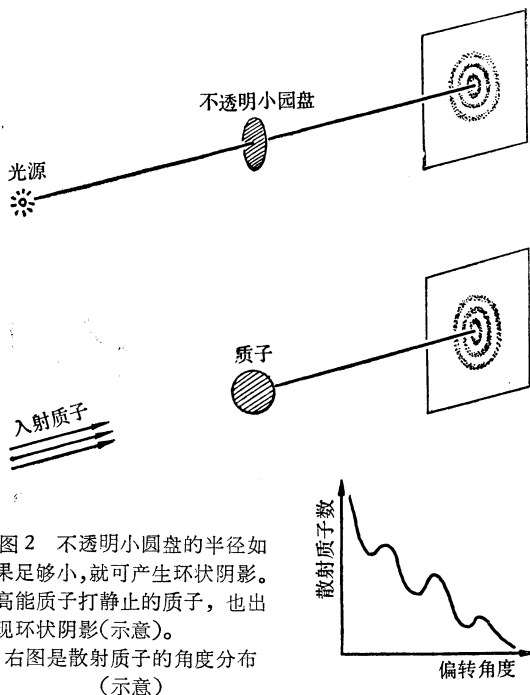


图2 不透明小圆盘的半径如果足够小，就可产生环状阴影。高能质子打静止的质子，也出现环状阴影(示意)。右图是散射质子的角度分布(示意)

例2：用高能质子(或 π^-)轰击液体氢的靶，观测轰击前后质子(或 π^-)飞行方向的改变(也是只考察弹性散射)。发现散射后质子的分布很像光线被一个很小的圆屏挡住时的阴影，我们知道，如果圆屏的半径足够小，阴影就是一圈一圈的，中间是光点。现在散射的质子也是这样，阴影也是一圈一圈的。这就说明：(i)入射的质子好像光波(表现出来波动性)，(ii)靶质子好像一个小圆屏，它挡住入射质子的波。从而也就说明

了靶质子(也就是所有的质子。)不是点粒子,而是有一定大小的。

第二类: 说明强子有内部结构

例3: 用高能质子或高能介子打靶,可以产生很多种新的强子,目前已知的有二百多种。这二百多种强子可以按照它们的电荷以及其他性质(如自旋、奇异数、重子数)排列成有规则的图式,例如:

	重子(自旋 $\hbar/2$)		介子(自旋 0)			
奇	0	n	p	奇		
异	-1	Σ^-	$\Sigma^0 \Lambda$	Σ^+	异	
数	-2	Ξ^-	Ξ^0		数	
	重子(自旋 $3\hbar/2$)		介子(自旋 \hbar)			
奇	0	Δ^-	Δ^0	Δ^+	Δ^{++}	奇
异	-1	Σ^{*-}	Σ^{*0}	Σ^{*+}		异
数	-2	Ξ^{*-}	Ξ^{*0}			数
	-3	Ω^-				

可以看到,每一个图式中,奇异数相同的强子都排在同一行,电荷相同的强子都排在同一条斜线上。这些有规律的排列使我们立刻联想到元素周期表:元素的周期性反映了原子的内部结构,强子的上述图式必定也反映了强子的内部结构。根据这种规律性还可以预言未发现的粒子,例如 η, η', Ω^- 就是先有预言,然后在实验上找到的。

例4: 发现了不少高角动量的强子。这些高角动量的强子显出一种迹象:强子内部包含着与角动量有关的自由度,整个系统可以处于各种高角动量的激发状态。这也表明,强子必定具有某种内部结构。

第三类: 说明强子内部有更基本的东西

例5: 高能 π 介子-核子(中子、质子的统称)的散射全截面(散射全截面的大小代表碰撞几率的大小)和高能核子-核子的散射全截面之比是 2:3。这就支持了强子内部有更基本的东西的图象。譬如说,假定核子里面有三个更深一个层次的东西, π 介子里面有两个更深一个层次的东西,那末,介子与核子碰撞是两个和三个相撞,核子与核子碰撞是三个和三个相撞,两种情况的几率之比显然是:

$$(2 \times 3) : (3 \times 3) = 2:3$$

例6: 高能电子与核子的深度非弹性散射(在这种散射过程中,要产生很多介子,甚至还产生重子和反重子,见图1)中,随着散射电子的偏转角度的增大,散射电子数目的下降并不像例1中那么快,这显示出来核子内部有一些很硬的半径很小的散射中心:电子与核子的深度非弹性散射,就是电子与核子中的个别散射中心相碰撞的结果。

人们也期望用类似的方法去探索电子的内部结构,但一直到目前还没有发现这种结构。人们还期望把强子打散,把其中更深一个层次的东西打出来,但目

前还没有实现。看来这些都有待于今后进一步的努力。

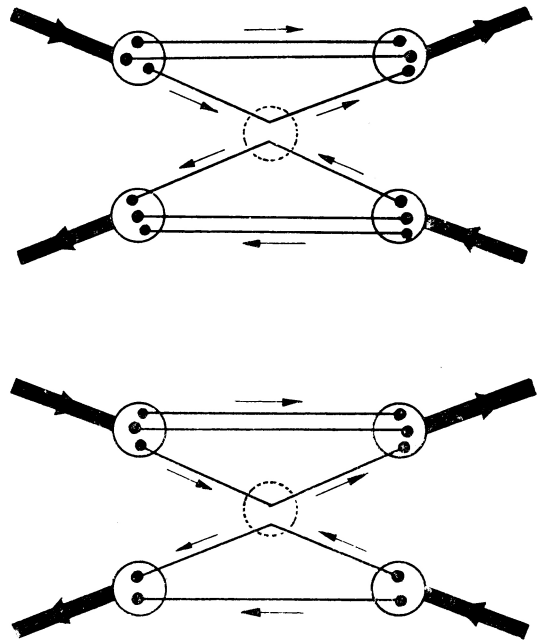


图3 上图:三个和三个相撞,有9种可能性
下图:三个和两个相撞,有6种可能性

关于“基本”粒子相互作用的实验

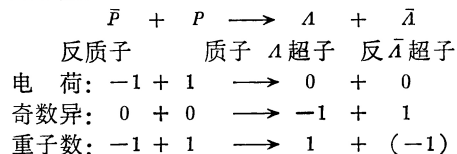
关于“基本”粒子相互作用、相互转化的高能物理实验,按照相互作用的强度大小,可以分为三类:

第一类: 强相互作用

原子核所以能结合得很紧密,就是因为核子间存在着强相互作用力,它比电磁力要强几百倍,但是作用范围很小,有效半径 $\sim 10^{-13}$ 厘米。前一节例5所说的高能 π 介子-核子散射和高能核子-核子散射都是强相互作用的现象,例3所说的二百多种强子,也都可以通过强相互作用产生。此外例2、例4也都属于强相互作用现象。由此可见,强相互作用的实验对于揭示强子的内部结构曾经起了很大的作用。

高能物理实验还揭露出来强相互作用服从一系列守恒定律,包括能量-动量守恒、角动量守恒、电荷守恒、同位旋守恒、奇异数守恒、宇称守恒、重子数守恒等。这里我们来看一幅根据泡室照片画的图(图4):

一个人射的反质子打中泡室中的一个质子(氢核),它们转化为一对超子 Λ (兰姆达)和 $\bar{\Lambda}$ (反兰姆达)。用如下的反应式来表达这个过程,并写出电荷、奇异数、重子数:



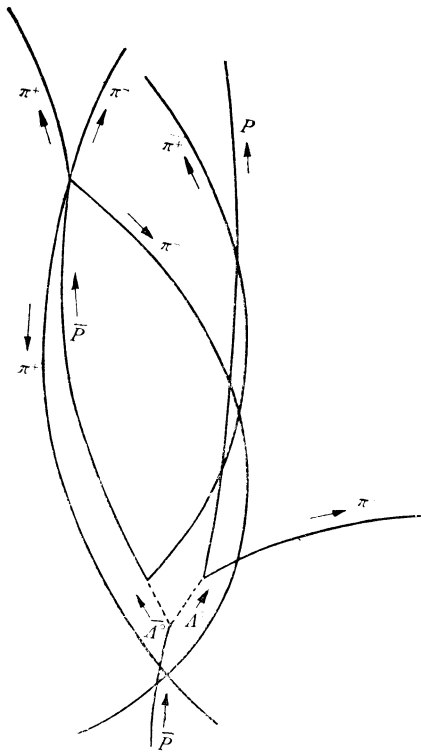


图4 反质子和泡室中的质子相撞发生的一个反应

可见电荷、奇异数、重子数都是守恒的。图中 Λ 和 $\bar{\Lambda}$ 的径迹画成虚线，因为它们是中性的，在泡室中看不见。但是根据它们的衰变产物 P 、 π^- (Λ 的衰变产物)和 \bar{P} 、 π^+ ($\bar{\Lambda}$ 的衰变产物)的径迹(因为泡室放在磁场中，所以带电粒子的径迹都是弯曲的，根据弯曲程度可以算出带电粒子的动量)，可以判断这两个中性的粒子就是 Λ 和 $\bar{\Lambda}$ 。其中衰变出来的一个 \bar{P} 又与泡室中的另一个质子相碰，转化为四个 π 。再用反应式来表达这个过程：

$$\bar{P} + P \longrightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^+ + \pi^-$$

电 荷	$-1 + 1 = 1 + (-1) + 1 + (-1)$
奇异数	$0 + 0 = 0 + 0 + 0 + 0$
重子数	$-1 + 1 = 0 + 0 + 0 + 0$

可见电荷、奇异数、重子数也都是守恒的。

强相互作用的高能实验虽然有了不少收获，但是强相互作用的机制目前仍然很不清楚，还需要进行深入的探索。

第二类：电磁相互作用

电磁力是我们比较熟悉的一种力，这种力是由光子(电磁场的量子)传递的。前一节例1和例6都属于电磁相互作用，说明电磁相互作用的高能物理实验对于揭示强子的内部结构也是很重要的。

电磁相互作用不满足同位旋守恒，但是除此之外，上述强相互作用所服从的其他的守恒定律，电磁相互

作用也都服从。

电磁相互作用的机制是清楚的，量子电动力学的理论计算和实验结果符合得非常好。但是量子电动力学有一个问题，就是它以电子的点模型为出发点，没有考虑电子的内部结构。因此，人们期望通过极高能量电子的电磁相互作用来发现量子电动力学理论与实验的不相符之处，并以此来探讨电子的内部结构。目前高能物理实验所用的电子能量已达210亿电子伏，此外，还用总能量达到70亿电子伏的正负电子做对撞实验，但正如上一节所说，仍还没有出现电子内部结构的迹象，看来能量还须大大提高才行。

第三类：弱相互作用

弱相互作用比电磁相互作用弱得多， β 衰变就是一种弱相互作用现象。前一节虽然没有弱相互作用的例子，但弱相互作用的高能实验对于探索强子内部结构同样是很必要的。举一个例子，层子模型的计算在电磁相互作用和弱相互作用的领域里和实验符合较好，在强子结构的探索中这是一个重要的进展。此外，用很高能量的中微子打质子(高能弱相互作用实验，目前中微子能量最高达到2000亿电子伏)，在深度非弹性散射中也发现质子内部似有很小的散射中心。这和高能电子与核子的深度非弹性散射结果是相似的。

弱相互作用所服从的守恒定律最少，同位旋不守恒、宇称不守恒、奇异数不守恒、CP不守恒……等等。图4中的 $\Lambda \rightarrow P + \pi^-$ 和 $\bar{\Lambda} \rightarrow \bar{P} + \pi^+$ 是弱作用衰变(正因为是弱作用，所以 Λ 和 $\bar{\Lambda}$ 没有立刻衰变，而是走了一段路之后才衰变)，可以看出这两个过程中奇异数是不守恒的，

$\Lambda^0 \longrightarrow P + \pi^-$	$\Lambda^0 \longrightarrow \bar{P} + \pi^+$
电 荷 $0 = 1 + (-1)$	电 荷 $0 = -1 + 1$
奇异数 $-1 \neq 0 + 0$	奇异数 $1 \neq 0 + 0$
重子数 $1 = 1 + 0$	重子数 $-1 = -1 + 0$

弱相互作用的机制还远不如电磁相互作用的机制那样为人们所了解。不少人猜想弱相互作用是由一种很重的中间玻色子传递的，还猜想这种中间玻色子和光子属于同一个族，所以弱相互作用可能与电磁相互

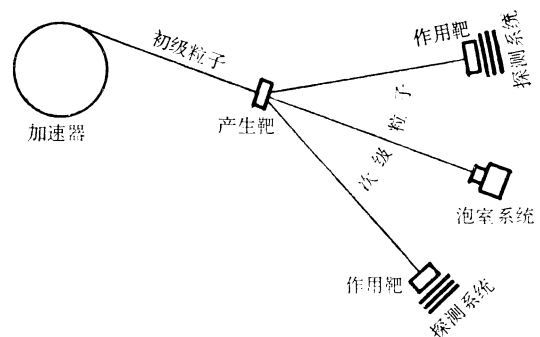


图5 高能实验安排

作用统一起来。但是实验上至今没有发现中间玻色子(预言中的中间玻色子质量太大,目前高能加速器还没有达到足够高的能量)。另一方面,在弱相互作用的高能实验中除带电流之外,还发现了“中性流”(具体来说,有一种反应过程,高能中微子打质子后,不管质子转化成别的什么强子,高能中微子仍旧是中微子。这表明高能中微子与质子之间发生相互作用时,它们之间传递的,可以是不带电的东西),这间接地支持了弱相互作用和电磁相互作用可能统一的猜想(因为这种理论预言了“中性流”的存在,即存在中性的中间玻色子)。但是仅仅根据这一点是不能下结论的,还需要高能物理实验在高能弱相互作用方面作更深入的研究。

高能物理实验需要的手段

首先,需要有高能量、数目多的人射粒子,因此需要有高能加速器,还要有专门的束流引出设备,把粒子从高能加速器中引出来。

引出来的粒子打到“产生靶”(例如铍块或钨块)上,产生各种次级粒子,包括 π 介子、 K 介子、反质子……等。再用束流运输系统(由偏转磁铁、聚焦磁铁、粒子准直器组成)把各种次级粒子引向各个特殊设计的实验探测装置中去,以便同时进行各种不同的物理实验。在对撞机实验中不需要产生靶,因为是粒子与粒子对撞。

每套实验探测装置都由一个“作用靶”(液氢靶、液氘靶、以及铍靶等等)和一整套探测设备组成。泡室、火花室等径迹探测器本身,既包括作用靶,也包括了探测器。但在被称为计数器系统的探测装置中,作用靶和探测器则是互相分开的。

实验探测装置中还常常需要很大的磁铁,以便使带电粒子的径迹弯曲,从而测出它们的动量和带电的正负。

为了取得大量的探测数据和及时给出实验的结论,高速自动扫描测量仪和快速电子计算机也是不可缺少的工具。目前高能实验的工作量是很大的,例如泡室实验,通常研究一个问题需要处理十几万、几十万甚至上百万张照片,没有自动扫描测量仪和电子计算机,就无法及时得到实验的结论。

由于技术的不断改进,现代高能实验的精度提高了很多。例如寿命只有 $\sim 2 \times 10^{-6}$ 秒的 μ 子的质量,已测准到 $m_\mu = 105.6595 \pm 0.0003 \text{ Mev}$;寿命只有 $\sim 10^{-10}$ 秒的 K_S^0 和寿命只有 $\sim 5 \times 10^{-8}$ 秒的 K_L^0 的质量差,已测准到 $m_{K_L} - m_{K_S} = 3.56 \times 10^{-12} \text{ Mev}$ 。……

但是,随着能量的提高,已有的一些探测器已经不能很好地发挥作用,因为它们不能区别几百亿电子伏以上的质子和介子。这说明高能物理实验的发展也给高能探测器提出了新的课题。