

谈谈现代高能实验的特点

王 祝 翔

高能物理实验经过了三十多年的发展，目前已经可以说是进入了比较成熟的阶段，特别是最近十几年，进展非常迅速。在二十多年以前，世界上的大加速器只有美国的 30 亿电子伏和 62 亿电子伏质子加速器及苏联 100 亿电子伏质子加速器等三台。由于这些加速器的能量不够高，由相互作用而产生的次级粒子数比较少，次级粒子动量也比较低，所以不太大的探测器（例如 1 米左右）就能满足实验要求。另一方面，当时探测技术也不够完善，大型高灵敏探测器，例如大型氢气泡室，多丝正比室，大型契伦柯夫计数器等，都还没有出现；快速电子学和电子计算机技术也刚刚处在发展初期，应用得很少；自动化程度也不高，大部分测量都是依靠手工操作，故采集和处理的数据量不大，统计

数很小。因此，虽然在以上这些加速器上曾经得到大量奇异粒子的数据，也发现了反质子、反中子和反超子，但工作数量、范围和深度都有限。

然而，现代的高能实验情况与二十年前相比已有极大的不同。由于更高能量（300 亿—5000 亿电子伏）加速器的相继出现和探测器技术、自动化数据处理和电子计算机的飞速进步，使现代高能实验具有了许多新的特点。本文就扼要介绍现代高能物理实验的一些主要特点。

研究不同的高能物理问题所需的探测器常常差别极大

大家知道，高能实验所研究的物理问题是非常广

泛的,从强相互作用、电磁相互作用到弱相互作用,都是它研究的对象。然而由于粒子之间的强作用、电磁作用和弱作用所表现出来的现象很不一样,而探测强子、光子和轻子的方法又完全不同,所以对不同物理问题的研究,所用的探测器差别极大。例如,强作用的作用截面(即发生作用的几率)比较大,作用道(即作用中产生次级产物的各种不同形式)也比较多,因此研究这类问题,用1—2米直径的氢气泡室就比较合适。然而对截面很小的过程,则宜采用快电子学探测器的方法,例如计数器,多丝正比室,漂移室等等。至于中微子实验,由于是弱相互作用,中微子与物质几乎不起作用,这类实验就需要大得多的探测器,以增加探测器的接收度。

因此,一个高能实验中心,假如它不是仅仅局限于研究某一类题目的话,那么就需要有一些基本装置和通用的设备,例如:氢气泡室,多粒子谱仪,流光室以及通用磁铁,通用计数器,多丝正比室和漂移室等等,这些设备为大量的常规工作提供了物质条件。此外,为研究某个专门的物理问题,需要有特殊设计的计数器谱仪或径迹室谱仪,例如:探测高能 γ 射线,就要用簇射计数器;探测中子要用中子探测器;测定电子能量要用量能器;测定粒子速度要用飞行时间谱仪等等。表1列出了探测器与物理工作之间的大致关系。

由于探测技术种类多,面很广,要安排做高能实验,就需要掌握各种关键技术,研制出各种基本探测器,因为对于任一类相互作用的研究,都需测定作用前后各种不同粒子的性质,如飞行方向,出射角,动量,速度,电荷,能量等物理量。但是,测定不同粒子,如强子

K 、 π 和轻子 μ 、 e 等,就需要用不同的探测器。很显然,单靠一、二种探测器是不大可能全面地开展高能实验的,即使能进行,也只是少量的,不能长久地充分利用加速器。

探测器系统规模庞大、技术复杂

在高能加速器能量为500亿—5000亿电子伏的能区,进行高能实验的一个显著特点就是探测器系统必定是规模庞大和技术非常复杂。对于径迹室来说,例如氢气泡室和流光室,尺寸都是在2米以上,磁铁则往往重达500吨。对于计数器谱仪,所用的闪烁计数器、多丝正比室或漂移室尺寸长达4—5米,磁铁也为几百吨,甚至达到一千多吨。

欧洲核子研究中心配备有280亿电子伏及4000亿电子伏的质子加速器,相应的实验设备规模非常庞大,有:

大型欧洲氢气泡室(内径3.7米,高3米)

大型重液气泡室(长4.8米,内径1.8米)

流光室(长1.4米的和长3米的)

底片自动扫描测量仪(20多台)

Ω 谱仪——大孔径超导线圈磁铁的多粒子谱仪(宽8.5米,高2.5米,内径3米,磁铁总重1400吨)

各种计数器——契仑柯夫计数器有10几个,最长可达10米;闪烁计数器数量很多,一个描述仪就由600个闪烁计数器组成。

大型探测设备的建造周期肯定要很长,如大型欧洲氢气泡室是用八年时间建成, Ω 谱仪用了四年,而一些小型探测器,由于技术复杂,种类繁多,数量很大,因

表1: 探测器适用的物理工作范围

探测器类型	测定次级粒子的物理量	高能物理工作范围
氢气泡室	动量,飞行方向,电荷符号,速度	截面较大的 $X+p$ 遍举过程
氦气泡室	动量,飞行方向,电荷符号,速度	截面较大的 $X+n$ 遍举过程
重液气泡室	动量,飞行方向,电荷符号,速度	截面较大的 $X+N$ 遍举过程, π^0
火花室	动量,飞行方向,电荷符号	截面较小的 $X+N \rightarrow$ 遍举过程
流光室	动量,飞行方向,电荷符号,速度	截面较小的 $X+N \rightarrow$ 遍举过程
多粒子谱仪	动量,飞行方向,电荷符号	截面较小的 $X+N \rightarrow$ 遍举过程
单臂谱仪	动量,飞行方向,质量,电荷符号	小截面 $X+N \rightarrow X'$ + 其他单举过程
双臂谱仪	动量,飞行方向,质量,电荷符号,夹角	小截面 $X+N \rightarrow X'+X''$ + 其他单举过程
多丝正比室	空间位置	各种谱仪中的主要设备
漂移室	空间位置	各种谱仪中的主要设备
契仑柯夫计数器	粒子速度	各种谱仪中分辨粒子的设备
计数器描述仪	空间位置	个别谱仪中的设备
簇射计数器	能量	个别谱仪中探测 γ 粒子
中子探测器	位置,能量	个别谱仪中探测中子
电子量能器	总能量	个别谱仪中探测高能电子
飞行时间谱仪	速度	个别谱仪中测定粒子能量

注: 测定相互作用产生的所有次级粒子性质的过程,叫遍举过程,只测定相互作用产生的一个或二个粒子性质的过程,叫单举过程。

此总起来组成一个完整的实验区，其建造周期也不比建造加速器来得短。

这里附带指出，从加速器到探测器，中间还有一段束流输运、纯化系统，这也是相当庞大的设备。

现代高能实验是一项有较多的人参加的集体工作

现代的高能实验，由于加速器能量的增高以及探测设备规模庞大，技术环节分得很细，数据采集量及处理量都很大，靠少数几个人已不大可能进行。特别是较大型的实验，必须要有很多人参加，并在能干的实验物理学家的组织和领导下密切配合，才能做出出色的成果。因此，现代高能实验都是集体的成果。这情况与理论工作是很不相同的。当然，在这个集体中有主要起作用者，但也决不能忽略这集体中其他人所起的作用。譬如说，利用双臂谱仪寻找共振态的工作，除了需要实验物理工作者制定方案，做出设计，估计各种可能出现的误差，对预期结果作出模拟试验及判断等以外，还需要有精密探测器的制造、运行和维修的人。谱仪中的每一件仪器，如多丝正比室，闪烁计数器，契仑柯夫计数器，磁铁系统，电子学系统，在线电子计算机等都需要专门人员制造和维护，这是一支很大的科学实验队伍。显然，缺少其中任何方面的人材，整个实验就不能进行。

大数据量、高统计和高精度

为了减少统计误差，提高实验精度，一般的事例统计数都是很大的。例如气泡室实验，通常每个工作要处理十几万、几十万甚至上百万张照片，扫描、测量、分析、计算和处理几个甚至十几万个事例。对于流光室实验，由于是选择触发，速度快，统计事例数更高。至于计数器谱仪实验，由于充分利用加速器的束流，统计量就更大。事例数可达 10 几万到上百万。因此，要想对已有数据在精度上有所提高，就必须有更高统计量的数据，为此要求使加速器及探测器能稳定可靠地运行，同时提高获取数据和数据处理的速度。

几年前，由于中微子作用截面太小，一般的中微子实验并不能获得很多数据，最近由于中微子束流和大型计数器谱仪实验技术的发展，中微子实验也同样能得到大量数据。

数据分析处理自动化和电子计算机大量运用

二十年前，对于气泡室底片的分析，大都是采用手工操作，电子计算机应用得很少，平均每个人每年只能处理 1000 对底片。现在由于出现了高效率的扫描和自动测量仪以及快速电子计算机，每人每年平均可处理 120000 对底片，速度快了 100 多倍。不仅如此，目前对于气泡室或流光室的某些物理工作的底片处理，从利用自动化测量仪进行事例扫描、测量、直到计算、分

析、处理、得出最终实验结果都已由电子计算机控制运行，使整个处理过程连成一条线。大大提高了数据处理的效率。

对于利用计数器系统的实验，目前都已使数据读出系统和计算机连成一线，计算机可立即给出实验结果的数据。对于大数据量实验，则可把数据记到磁带上，然后再送到大型电子计算机中心处理。由于实验数量多，数据量极大，必须要有高速大容量电子计算机，才能满足数据处理要求。

电子学仪器数量多，要求稳定可靠

在现代高能实验中，计数器谱仪的实验工作已经超过气泡室的工作而占居首位。在计数器探测器实验中，电子学设备是主要的键。高能实验所用的电子学包括放大器、甄别器、符合电路、电平转换器、积分器、延迟电路、定标器、电源等(称作 NIM 系列)，探测器和电子计算机之间的接口系统(如 CAMAC 系列)及多丝正比室和漂移室的读出系统分三个方面。一个典型的计数器谱仪实验，大约需要 1000 多个 NIM 插件和 1000 多个 CAMAC 插件。假如同时做多个实验，则就需要几千件插件，而每个插件包含多个独立的线路。

计数器实验的数据采集是一个快速过程，故要求电子学的速度是毫微秒量级。由于整个设备包含几千个插件，而任何一个插件出了毛病，就会影响整体工作。所以要求元件及插件稳定可靠。例如，一个插件在一星期内稳定工作(即不出故障)的概率为 (0.99) ，则 1000 台插件总的不出故障的概率为 $(0.99)^{1000} = 0.000043$ 这表示 1000 个插件在一星期内出故障概率为 ≈ 1 ，这说明整机完全不能工作。假如要求 1000 个插件总的稳定工作概率为 0.99，则要求每个插件稳定工作概率为 0.99999，可见对插件的要求是极为严格的。

探测技术发展已可实现过去无法进行的实验

目前，随着高能探测技术的日趋完善和实验方法的改进，有一些过去认为非常困难而无法进行的实验，现在已经可以实现，突出的一个例子就是高能中微子实验。

中微子是不带电的弱作用粒子，它与物质的相互作用极弱，作用截面非常之小。一个自由中微子可以自由地穿过 1000 个地球的厚度，而不与地球物质起作用，所以过去一直认为这类实验是最难实现的，即使可以实现，产生的作用事例数也一定很少。例如在欧洲核子研究中心的 280 亿电子伏质子加速器上用 4.8 米长的大型重液泡室做中微子实验，在 25 万张照片中，总共才得到一千多个事例。

但是，中微子 ν 的作用截面是与 ν 的能量成正比。假如一方面提高 ν 的能量，另一方面提高加速器流强

及提高收集 ν 束的效率，同时改进探测器的接收率，那么就有可能大大提高中微子的事例数。现在欧洲核子研究中心的斯坦伯格组，利用大型中微子探测器已收集到500万个事例，这个数目已与一般强作用事例数相当。这是一个很大的进展。此外，象中微子和电子的作用，过去也认为是更加困难的，然而现在美国费米实验室的莫玮组在开始收集数据了。可以预料，随着已有技术的发展和新型探测器的研究，必将能实现做更困难的实验。

从以上所谈的高能实验的这些特点，可以归纳出一句话，就是高能物理实验设备种类多，规模大，技术尖，速度快，高度自动化，而要开动这样复杂的实验机器，更需要胜任的物理学工作者和配套的技术队伍。所有这一切，在我国目前都还是薄弱环节，必须引起注意，否则，即使加速器造得很先进，实验工作跟不上，也就不可能发挥加速器的作用。