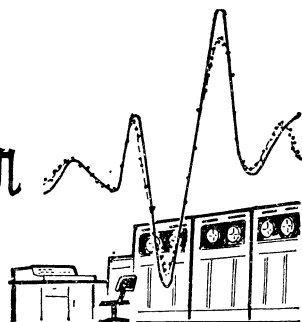


高能实验物理 与 电子计算机



胡家伟

在计算机技术发展的过程中,高能物理是使用计算机最早、最广泛的领域之一。在60年代以前,计算机主要用于各种科学与技术问题的数值计算;但在60年代以后,则逐步深入到实验室自动化方面,使计算机在实验数据的获取与处理和实验设备的监视与控制等方面的应用,远远超过了单纯的数值计算。随着高能加速器技术和探测技术的迅速发展,计算机在实验物理中的作用也就越来越大,在许多实验中,如果没有计算机作后盾,那就很难完成实验的任务。为什么计算机在实验物理中有这样大的作用呢?概括地说,其原因主要有以下几点: 1, 高能物理研究的“基本粒子”的作用范围,远远小于人们生活中自然现象的尺度,与“基本粒子”相关的每个事件所发生的时间、空间都是在很小很小的范围内,这种实验的原始数据一般是看不出其真实的物理意义,只有当人们把这些数据经过一番加工、处理后,才可能了解其真实含意; 2, 高能物理实验的反应复杂,一个人射粒子可能产生很多次级粒子,而一个次级粒子又可能衰变出新的粒子,这样使实验数据的分析更加复杂; 3, 由于微观现象的量子性质,使一两个单独的事例往往没有多大意义,它需要从大量事例的统计规律中找出物理解释,统计数越大,实验结果越精确;显然,这样大的计算任务是一般的人力难以承受的; 4, 高能加速器和探测设备(如多粒子谱仪等)都是非常贵重的,为了充分利用这些设备的潜力,往往要安排比较多的实验,连续不断地工作,这样产生的事例数远远超过任何一个现场观察与分析的能力。

总之,在现在的技术条件下,在实验物理中有大量的数据采集和处理任务,如果没有计算机就不能迅速地、高质量地得到实验的结果。

高能物理实验方法

高能物理是研究“基本粒子”的内部结构及其相互作用、相互转化规律的。研究的基本方法,就是用高能加速器产生的各种高速粒子去轰击另一些粒子(称为

靶),观察轰击的一瞬间所发生的现象。用高能探测器测出这一瞬间所发生的各种变化,然后通过复杂的记录系统把这些信息记录下来。在实验中记下来的这些信息,就是所谓的原始实验数据。对大量的原始数据进行加工、处理后,我们才能够逐步地了解“基本粒子”的结构、运动、变化的规律性。

目前,高能物理实验分为两大类:一类是用计数器、多丝正比室、漂移室和电子仪器做的实验,叫做计数器实验(或电子学实验);另一类是用气泡室、流光室、火花室等做的实验,叫做径迹室实验。但是,随着探测技术的进一步发展,近年来出现了所谓混合型实验,把径迹室和计数器同时用于一个实验中,以发挥各自的特点。

径迹室实验是用光学照相或录相的办法,把高能粒子在径迹室内形成的轨迹拍摄下来,然后对照片(或录相磁带)进行测量、分析与处理。计数器实验则是把各种探测器输出的电信号通过一定的变换后,立即记录到磁带上,然后由计算机进行在线的或脱机处理。在这两类实验中,尽管探测器的作用原理和实验的规模与安排有很大的不同,但是从数据采集与处理的角度来看,却没有本质的差别,只是使用计算机的方法和阶段有些差异。计数器实验一般采用在线工作方式,径迹室实验只在照片的测量与分析才是在线的。见图1。计算机方框内的圆圈表示数据处理的过程,对两种实验方法来说,原则上是相同的。

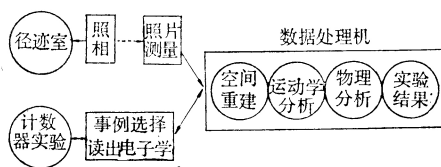


图1 两种实验方法的数据采集与处理。

近年来,随着高能探测器、计算机和集成电路技术的发展,已使计数器实验变成了主要的实验方法。这种方法的优点是分辨时间短,每个束流脉冲时能采集

的数据率高,可以对事例进行选择,可以根据需要增添或改装探测器等,因之可以适应相当多实验的要求。

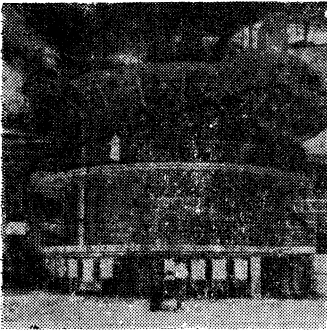


图2 欧洲大型氢泡室

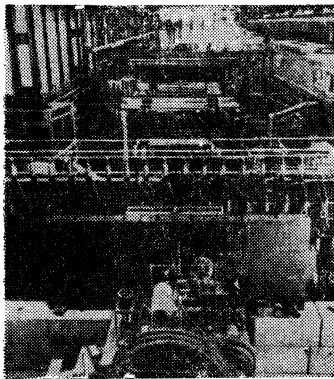


图3 欧洲μ子实验仪器

图2、3是欧洲大型氢泡室和计数器实验设备的照片,从图中可以看出其规模和复杂程度。

高能实验物理对数据采集和处理系统的要求

现代高能物理实验设备是相当庞大、相当复杂的,因此从这些设备采集数据和分析数据的任务也是相当艰巨的。由于计数器实验已是一个主要的实验方法,所以我们从这个角度来讨论一下高能实验物理对数据采集和处理系统的要求。

1. 数据采集与记录 在考虑实验数据的采集与处理时,最基本的一条依据就是数据量的多少。计数器实验设备又叫做谱仪,主要是由分析磁铁和各种探测器组成。在现今建造的各种带有多丝正比室和漂移室的谱仪中,一个事例往往用 10^4 个二进制的位来描述,如在下面将要提到的欧米伽 (Ω) 谱仪中,就需要 1.6×10^4 位。假设每个加速器的束流脉冲可产生 100 个事例,那末在束流脉冲存在的时间内产生的数据量将为 $10^6 \sim 10^7$ 位。因此,为了充分发挥探测器与加速器的效率,就应该在束流脉冲期间内,把 $10^6 \sim 10^7$ 位的数据都取下来,然后在束流脉冲间隙中记录或分析完毕。见图4。为了满足这样的要求,就需要一个时间响应快的,存储容量为 $10^6 \sim 10^7$ 位的缓冲存储器,还需要高速的记录设备(如磁带机)和计算机。如果这样的要求不能达到,就会丢失部分数据,使实验的效率降低。

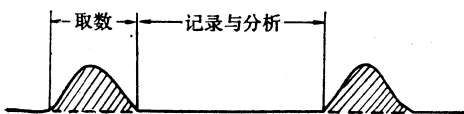


图4 束流脉冲

2. 数据分析与处理 上面已经说明,高能物理实验的一个特点是实验中采集的原始数据是看不出其真实的物理意义的,必须对一个事例的全部数据进行复杂的分析。分析的过程分为找点、找径迹、空间重建、运动学分析和物理分析等步骤。找点的意思是把位置灵敏探测器(如多丝室)给出的原始数据进行选择配对,找出粒子通过的坐标点。找径迹是将上述找出的所有坐标点拟合成线,根据某一已知条件找出真正的粒子运动的迹轨。空间重建就是把各径迹连接起来,恢复粒子运动的空间图象,然后在此基础上进行运动学分析和物理分析,得出实验结果。为了完成这样的分析,就必须对数据处理系统的主机提出两个要求:一是数据分析的程序很长,约需几万字到几十万字的内存空间;二是分析一个事例所需要的时间很多,约需几十毫秒到几秒钟(依计算机的操作速度和事例的复杂程度而定)。所以,为了满足这两点要求,需要用超高速、大容量的计算机。如国外某些高能物理实验中心使用的计算机机型有 2BM 360/195, 2BM 370/168, 3032, CDC 6600, CDC 7600, Cyber 175, H 8800 等。

3. 系统的灵活性与通用性 我们知道,建设一台高能加速器的费用是非常高的,而加速器的运行费用也非常可观,所以为了发挥加速器的使用效率,往往同时安排几个实验。另一方面,在加速器上进行的实验经常不断地更换,实验设备也应根据实验的不同要求而不断地改变。所以为了提高工作效率、缩短实验周期,整个数据采集和处理系统应该具有较大的灵活性与通用性,操作过程应该力求简便。

在线计算机与计算机网

综合上述三点,我们可以看出,高能实验物理对数据采集和处理系统的要求很高,它不仅要求计算机的操作速度快、存储器的容量大、数据传输率高,而且还要求计算机的中断响应性能好、反应速度快、灵活易变、使用方便,此外还应该经济、可靠。从目前情况看来,任何一个计算机都难于全面满足这些要求,但是如果把大型计算机和小型计算机组合在一起,形成一个在线计算机网,那末就可充分地发挥各种计算机的特长,较好地地完成数据采集与分析任务。

表1列出了大型计算机和小型计算机的某些优点

表1 两种计算机的优点比较

大型计算机	小型计算机
1. 存储容量大	1. 中断响应好
2. 有高质量高速磁带机	2. 任务转接快
3. 有高速浮点运算能力	3. 有整数运算
4. 有高级语言系统	4. 有直存通道
5. 有通用操作系统	DMA 传输

点。从表中看出,大型计算机的存贮容量大、运算速度快、软件齐全,适合于数据处理与分析;小型计算机具有中断响应快和直接存取的特性,适用于数据采集与监视、控制。这样,如果把数据采集与处理任务,按计算机的特点进行分工,就可得到表 2 所示的状况。

表 2 两种计算机任务分配表

任 务	大型机	小型机
1. 数据采集		✓
2. 数据存贮	✓	✓
3. 简单数据质量鉴定		✓
4. 复杂的数据质量鉴定	✓	
5. 数据分析	✓	
6. 文件库	✓	
7. 仪器设备监视		✓
8. 仪器设备控制	✓	✓

按照表 2 的安排,我们可以得出图 5 所示的计算机在线实验系统的简图。整个系统分为三个部分:探测设备、电子学与小型在线计算机和数据处理中心。

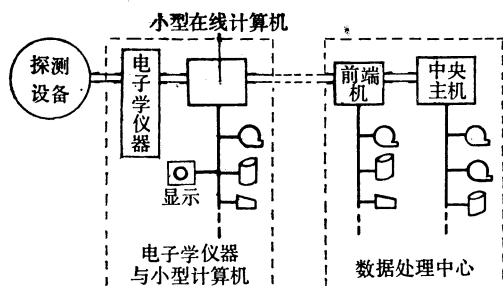


图 5 计算机在线实验系统简图

其中探测设备在实验现场,电子学与小型计算机在实验现场附近,数据处理中心则可能远离实验区。当高能加速器的束流穿过探测设备时,各种探测器(包括多丝室、漂移室等)就会给出相应的信息,这些信息先经过电子学仪器的选择和变换,变成描述一个事例的原始数据,然后再送至小型在线计算机。在束流脉冲存在的时间内,小型计算机主要起着收集数据的作用,实际上变成了缓冲存贮器。按照前面给出的数据量(即 10^6-10^7 位),小型计算机的内容量应该大于 10 万字,否则就不能接受全部数据。当然,为解决这问题,可用几台同型号计算机进行并行操作。在束流脉冲过去之后,计算机立即转向数据记录和分析,并且必须在下一个束流脉冲来到之前把存贮器内的数据全部处理完毕,以等待接受新数据。在这时,数据记录和分析有两个通道,一是就地记录到本机的磁带上,供以后脱机分析;另一个比较理想的通道是通过高速通讯线路送到数据处理中心,由大型计算机直接进行分析,这样可以迅速得到实验结果。数据处理中心的前端机主要起

协调、管理作用,如当前端机收集到一定批量数据后,才送给主机处理,这样可提高主机的工作效率;主机分析的结果也可通过前端机送给显示设备,以供实验人员了解实验情况。实际上,在现在的技术条件下,由于高能物理实验的反应比较复杂,探测器允许的数据率很高,即使用一个目前最快的计算机也无法立即全部分析完,只能抽出一部分进行所谓“采样分析”。采样的目的主要是为了提供数据的质量情况,使实验人员在实验过程中,清楚地知道实验的进展,减少实验的盲目性。在线系统软件管理着整个数据采集与处理过程。

在许多情况下,数据质量的鉴定,可用简单的方法由小型计算机实现,如作直方图等。这样在线实验系统就不一定要直接连到大型计算机上,可用一台小型多功能计算机来完成质量监测和控制任务。这样作的结果,并不是说不要数据处理中心,恰恰相反,它说明了数据处理中心的重要性。正是由于数据处理中心的能力还不能“实时”处理所有数据,所以大多数实验的数据处理都是用脱机分析。目前,国外著名的许多实验中心都有庞大的计算中心,但仍不能满足需要,还在不断的改建与更新。如在美国费米实验室新安装三台计算机,二台为 Cyber 175—200,一台为 Cyber-300,磁盘的容量为 60 亿字节,24 个磁带机,此外还用了高密度磁带(6250 位/时)。西欧核子研究中心的计算中心主要有 CDC 7600—6500—6400 和 IBM 370/168 两个系统,还建立了计算机网叫 CERNET,通过 CERNET 可把某些大型谱仪和 CDC 7600 系统与 IBM 370/168 系统相连。此外,通过通讯卫星还把西欧中心、英国卢瑟福实验室、西德的 DESY、意大利的比萨和爱尔兰的都柏林的计算中心连接起来,充分利用各种资源(西欧中心、英国、德国之间已连通)。图 6 是西欧中心 IBM 370/168 系统。

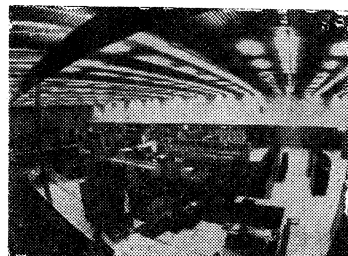


图 6 西欧中心 IBM 370/168 计算机系统

一个典型的谱仪—— Ω 谱仪

作为一个例子,我们简单地介绍欧洲核子研究中心建造的一台多粒子谱仪——欧米伽(Ω)谱仪,见图 7。

Ω 谱仪是由分析磁铁和各种探测器组成。 Ω 谱仪的主体是一个大型超导磁铁,宽 8.5 米,高 2.5 米,内径 3 米,磁铁重 1400 吨。在磁铁的内部和周围放有闪烁计数器、描述仪、契伦柯夫计数器、多丝正比室、漂移

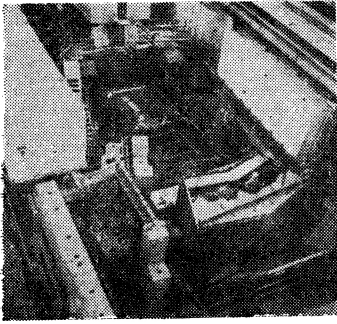


图7 欧米伽(Ω)谱仪。

室或火花室等探测器。作用靶放在磁铁内部,光火花室放在靶的周围。当质子束打到氢靶后,产生许多 π^+ 、 k^+ 、 p^+ 等次级粒子,分析这些粒子通过探

测器等发出的信息,就可确定质子与质子(氢靶)碰撞时所发生的反应。

Ω 谱仪是一种通用设备,适当改变靶区探测器及选择触发系统后,就可以做各种不同类型的实验。探测器与电子学系统分为两部分,一是专用的,一是公用的。专用部分主要有事例选择计数器与电子学触发系统,数据采集与记录、分析部分则是公用的。 Ω 谱仪的特点,除了能够分辨多粒子外,就是允许三个用户独立地进行工作,当一个用户在采集数据时,其他用户可以调试自己的触发系统和仪器。图8是一个实验的安排,图9为电子学与在线系统。

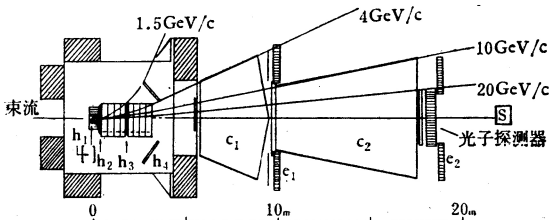


图8 在 Ω 谱仪上的强子光生实验的设计

当主要用户的触发条件得到满足时,探测器上的数据即通过CAMAC送到计算机。一个事例的数据量约为1000字(16位字长),或 1.6×10^4 位,需要20毫秒时间才能读出。每个束流脉冲时允许采集20个事例,平均的事例率为每秒钟10个。(束流宽度 ~ 0.4 秒,周期 ~ 2 秒)。在束流脉冲间隙期间,全部数据都记录在磁带上,供以后脱机分析。在整个系统中,还包括中型计算机C11-10070,可以选取一部分数据(约5%)进行在线分析。图形显示器可观察实验情况。

Ω 谱仪是1968年提出的方案,1972年建成运转,花了四年时间。此谱仪原用于质子同步加速器上,经改进后,现已用于SPS加速器中。原火花室全改成间距为0.5—1.0毫米的多丝室,在磁铁内还放了两个面积为 3.2×1.6 米²的四平面漂移室,对其他计数器也有了改进。由于全部采用多丝室和漂移室后,数据量大为增加,因之对在线计算机系统作了很大改进,如将小型机全改为内存容量达128k的POP11/45,每个

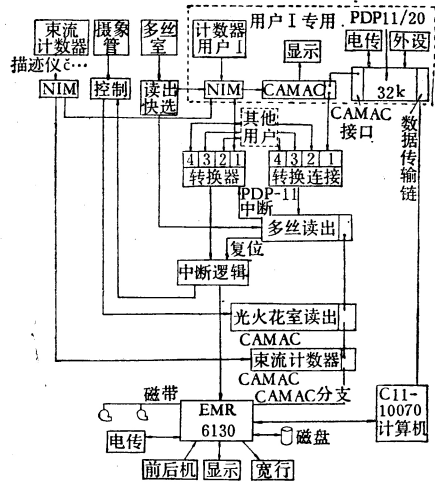


图9 电子学与在线计算机系统

POP 11/45 配备了磁盘。

微处理机与专用硬件处理机

计算机技术是20世纪的伟大成就之一。计算机技术的发展促进了高能物理的发展,而高能物理实验技术的发展对计算机技术又提出了新的要求。自从1968年出现了多丝正比室以来,高能物理实验方法发生了很大变化,使计数器实验变成了主要方法。特别是由于多丝正比室具有空间分辨好、时间分辨率小的优点,结果使实验中获得的数据率(或事例率)大大增加。表3列出了几种探测器的分辨率,从表3中看出,多丝室的最高计数率比其他探测器大好几个数量级。于是,在含有多丝正比室的谱仪中,数据率将会大量增加,使记录设备和大型计算机更加不能满足需要。为了解决这个矛盾,除了进一步加强数据处理中心的能力,增加大型计算机外,还可用专用硬件处理机来缓和一下。

表3 几种高能探测器的分辨率

名称	空间分辨率 (毫米)	时间分辨率 (微秒)	最高计数率 (次/秒)
气泡室	0.01	1000	1—10
火花室	0.3—2	1	10—300
流光室	0.5	1	5(拍照速率)
多丝室	0.5—2*	0.030	10^6
漂移室	0.1	0.002	$>10^6$

* 用重心法读出,目前达到0.15毫米。

我们知道,谱仪系统的一个优点是能够对入射粒子产生的事例进行选择,触发计数器就用于这种目的。但是由于选择系统不够精细,仍然使许多不需要的被选入,结果大大浪费了计算机的时间。为此发展了一些事例判选逻辑,用高速微处理机对事例进行细致的选择,使有效事例的比率增加,从而减轻了记录系统与

数据处理中心的负担。实际上，这个判选逻辑就是一种专用处理机。

在高能实验物理中，由于多重粒子的产生，使图象识别和空间重建的计算机程序非常复杂，因此花费了很多计算机时间。如在前面介绍的 α 谱仪中，记录一个事例的时间为 20 毫秒，但分析一个事例却要几百毫秒到几秒（用 CDC 7600 机）。用 IBM 360/40 计算机分析一个大型氢气泡室的照片要 5 分钟。但是，进一步分析计算机程序表明，处理一个事例的时间大都花费在找点、找径迹和空间重建的程序上，而这些操作一般都是极简单的逻辑运算，没有利用大型计算机的巨大功能，因此，如果用一个专用硬件处理机执行找点、找径迹的任务，则可以大量节省计算机时间了。例如，用 CDC 7600 计算机寻找 5 套多丝正比室的径迹（设有 8 个粒子穿过（需要花费 480 毫秒，若用专用硬件处理器寻找只需 4 毫秒，速变提高了 120 倍，见表 4。这种处

理器的意义不仅在于找径迹的速度比大计算机还快，更重要的是减少了计算机消耗的时间，使它完成更多更复杂的任务。

表 4 专用硬件处理器与计算机比较

处理任务	专用硬件	CDC 7600	速度比
找点 (4 个丝平面, 8 个粒子)	32 微秒	1.6 毫秒	50 倍
找径迹 (5 套多丝室, 8 个粒子)	4 毫秒	480 毫秒	120 倍

近年来，由于集成电路技术进一步发展，微处理机的使用越来越广泛，可以预料，微处理机一定会在高能物理实验中发挥很好的作用，使数据采集与处理系统的面貌和状况发生很大变化。

(题头：陆柱国)