

# 加速器与我

邓昌黎 著 秦庆 林克莹 译



邓昌黎先生

为了维持生计,并且吸收到更多的知识,我在物理系承担各种短期工作。

记忆最深的工作首先是在费米教授为期一学年的量子力学课程中担任助教,其后我获得那时正在核研究所(后来改名为费米核研究所)建造的450MeV质子同步回旋加速器(Synchrotron)项目的助理奖学金。项目主管安德森(H. Anderson)教授要我研究加速后质子束流引出的办法。当时束流引出没有任何好办法,唯一的方法是在束流引出的轨道上插入一个散射靶,将部分束流以弹性散射的方法射出。当然,这种做法效率非常之低。安德森教授教我和塔克(J. Tuck)博士一同研究这个问题。塔克博士来自英国,路过这里前往洛斯阿拉莫斯实验室就职核能研究工作。在做机密工作前必要的安全审核期间,他在芝加哥大学作临时研究助理。那时,我毫无加速器和束流动力学知识,所幸塔克曾从事过感应加速器(Betatron)的运行,知道那里束流的引出是用“切割器”(peeler)来引发的,即用一块铁楔(iron shim)放在引出轨道上,来降低磁场强度。这局部的磁场缺陷使束流在切割器处沿径向向外移动,这样就可以用一个高电压切割板将束流引出。我试着描绘了带有同样切割器的同步回旋加速器轨道,发现束流在切割器处并不沿径外移。然而,在描轨道时我发现,如果在切割器下游 $90^\circ$ 处多加一块增强磁场的铁楔,束流就有可能向外径向引出。我把这第二个产生磁场凸起的铁楔叫做“再生器”,并且把整个系统称为“再生型引出”。时至今日,这仍然是回旋加速器最好的也是唯一的束流引出系统,其引出效率高达近50%。

在那些日子里,做轨道的跟踪计算,只有用齿轮

一、芝加哥,  
回旋加速器  
我与加速器结缘,  
始于1947年。那年,  
我来到美国,进入芝加  
哥大学物理系研究所。

和杠杆的机械型“计算器”,如“Marchant”和“Freden”计算器。这类计算器,只可以作四则运算(后来的“Freden”提供了一个可以开平方的机器)。这些计算器,与滑动计算尺、带刻度的直尺、圆尺以及两脚圆规,就是仅有的轨道跟踪计算设备,因而如何保持足够的精度成为主要问题。我发明了各种各样巧妙的程序和算法,甚至有一段时间,我雇了3个研究生来帮我做束流轨道的跟踪。这种“再生型引出”系统在现代专业术语中,被称作“共振引出”。我那时所用的 $\nu_x = 1$ 整数共振是以一个 $\sin 2\theta$ 的四极项激励起来的。感应加速器通常有 $\nu_x > 1/2$ ,而同步回旋加速器则有 $\nu_x < 1/2$ (实际上,在最终的能量时, $\nu_x \cong 0$ ),这也就是两者不同的原因。

那时,我用“边测边裁”的办法来决定铁楔的设计,包括它的尺寸和形状。我钻在加速器的磁极间,用手移动测试线圈来测量磁场的增减。由于没有体会到磁场精度的要求,我的第一对“切割器-再生器”完全不合格。试机时束流在引出半径附近消失,我的铁楔也就立刻被拆掉。再生引出系统最后由英国的克鲁(Albert Crewe)博士于1953年,在利物浦的回旋加速器上试制成功。后来,他就被邀请来芝加哥大学将束流从费米回旋加速器中引出。

费米实验组发现质子-质子散射中 $3-3$ 共振(即“ $\Delta$ ”粒子)的实验是用一个内置靶做的。

除了同步回旋加速器,芝加哥大学的核研究所还运行着一台从通用电气公司买来的100MeV电子感应加速器和一台化学系用的老的30英寸Lawrence式回旋加速器。在奖学金期满后,我学会了操作所有这些机器,因而在1951年的夏季中我能继续有薪水来源。1951年春,我在温泽尔(G. Wentzel)教授的指导下获得了博士学位,论文是关于在质子-质子对撞中产生向量介子极化度的理论。获得学位后,我加入了明尼苏达大学的教授队伍。

## 二、明尼苏达,直线加速器

在明尼苏达大学,我开设了核物理和量子场论两门课程。同时,又一项加速器工作来到我的面前。

1951年,明尼苏达大学物理系正在建造一台68MeV的质子直线加速器。那时候所有的 Alvarez 式直线加速器都在钢质真空筒内加装铜质衬里的高频腔。为了获得束流的径向聚焦,在每个漂移管的上游端部都焊有一个钨质栅格,这就使得在漂移管间的电场汇聚,但每个栅格都截取了部分束流,以至于输出束流的强度一般都很低。1952年, Courant、Livingston、Snyder 和 Blewett 发明了交变梯度聚焦和四极磁铁,由于这在直线加速器上的应用是很自然、很直接的,于是我用做“再生型引出”时学到的矩阵计算方法设计了一个直线加速器的四极铁聚焦系统。我相信这是矩阵方法第一次被用在交变梯度聚焦系统中。但明尼苏达直线加速器中的栅格最终也没有换为四极铁,因为这样做就需要建造一套全新且昂贵的漂移管装置。

一天,我在与直线加速器项目的总管威廉斯(J. Williams)教授(一个杰出的实验物理学家)讨论交变梯度效应时提议,如果他确实想验证并测量一个“聚焦-散焦”串行的综合聚焦作用,为什么不串行一些光学透镜,再用一束光穿过这个透镜串行,直接测量光束的宽度呢?这个建议使他很兴奋。于是第二天他就买了一堆教室里用来做演示的透镜,大玩了一阵。从那时起,他见人就讲,“还是要一个理论家来提醒实验家,证实一个物理现象需要做实验”。威廉斯教授向阿冈国家实验室的利文古德(J. Livingood)教授推荐我参加阿冈的加速器项目。当明尼苏达大学的任职期满后,我接受了卫奇塔(Wichita)州立大学的副教授职位,以等待阿冈的任命。由于我是阿冈雇用的第一个非美国公民,这份任职在经历很长时间后,最终在1955年得到政府批准。

### 三、阿冈、ZGS和中西部大学研究协会

1953年,两台弱聚焦同步加速器在美国东西两岸投入运行:伯克利实验室6GeV的 Bevatron 和布鲁克海文实验室3GeV的 Cosmotron。在布鲁克海文,30GeV的交变梯度(强)聚焦同步加速器AGS也正开始建造。那时,每个人都认为下一台高能加速器应该建在美国的中西部地区。最合理的建造加速器地址显然是阿冈国家实验室,但因为某些莫名的原因,中西部大学的高能物理学家们强烈反对由阿冈来建造和管理这样一个装置。他们成立了一个名为中西部大学研究协会(MURA)的组织,希望由一个独立的实验室来设计、建造和运行加速器。MURA

的成员都是大学教授中才华横溢的物理学家,他们很快就发明了固定磁场的交变梯度(FFAG)环形加速器,同时把加速器中粒子束流动力学的理解提高到一个新的高度。MURA 始终坚持用它自己的发明,即FFAG加速器。在两年的时间里,MURA 向美国原子能委员会(AEC)提交了三个不同的加速器计划,都是以FFAG原理为基础的。FFAG的困难在于因有固定磁场,虽然束流强度可以很高,但达不到很高的能量。他们提交的几个加速器没有一个能量高于正在建造的30GeV的AGS。因而他们所提的加速器计划都被否决了。

所幸MURA和阿冈之间的不和,只在行政管理的高层中。包括我在内的阿冈加速器物理学家,都定期地参加在威斯康星州麦迪逊市召开的MURA技术会议。我被FFAG技术深深地迷住了,并且为它贡献了自己的一份力量。在我的建议下,第一个阿冈提交的加速器计划也是基于FFAG的。为了达到高能量,我把两个FFAG加速器串连到一起,先是2GeV,然后是25GeV。利用我的再生型引出方案和它的反过程(“再生型注入”)结合形成一个本质上是连续波的束流传输系统。这个计划于1955年提交,但最终也被否决了。

接着,AEC的总顾问委员会想出了一个办法来解决MURA和阿冈实验室间的僵局。1956年1月的一天,一个命令传达下来,阿冈实验室只许在成熟技术(所有基于交变梯度原理的技术都排除在外)基础上设计和建造加速器,能量在10G~15GeV间,并且要抢在苏联杜布纳研究所将要完成的10GeV同步稳相加速器(Synchrophasotron)前完成。而MURA则继续为建造一个未来高技术的机器进行科研工作。这对阿冈实验室中刚刚聚集起来的加速器物理学家小组是一个可怕的打击(事实上,是一个接近毁灭性的打击)。我们每人单独回到办公室,去缓解自己的伤痛、寻找自己的心思。但是一旦最初的震惊和痛苦平静下来后,我们都承受了命运的安排,决定尽力而为。

上述加速器仅12页长的项目提案书在两周后便提交给美国政府,并立即得到批准。这台机器叫做零梯度同步加速器(zero gradient synchrotron, ZGS)。同年4月份,阿冈实验室成立了粒子加速器系来管理这个项目。利文古德博士被任命为系主任,而我则担任加速器理论组组长。同年秋季,利文

古德带领我们到伯克利, 向他的导师——加速器界的鼻祖和杰出学者劳伦斯(Ernest Lawrence)教授致意。我想利文古德是要从老师那里听到他对 ZGS 设计的赞许, 但实际上劳伦斯深知内幕, 不肯加以评价。后来, 我有过几次机会与劳伦斯一对一地会面和谈话。他很随和, 似乎并不像一般传闻的那么可怕, 但是我从来没有在他的手下工作过。

1958 年, 在研发以及样机工作完成后, 利文古德退休了。接替他领导位置的是从芝加哥大学来的克鲁教授。1961 年, 我又接替克鲁担任粒子加速器系的主任。1962 年 8 月 ZGS 建造完工, 两个月后全能量出束。虽然我们系名为粒子加速器系, 但除了 ZGS 外, 我们系还负责运行一台 MURA 建造的 30 英寸的氢泡室和一台由密歇根大学建造的 40 英寸的丙烷/氟里昂泡室。我们系还设计、建造和运行所有的一级和二级束流输运线, 外加一条为中微子束线而做的介子聚焦“喇叭筒”。当我同意接受粒子加速器系主任职务时, 就意识到我要由一个自由自在的理论学家积极转变成一个行政长官。我认真地履行我的新职责, 并且把所有时间都用来执行系里的各个项目 and 设计, 并与政府和高能物理学界密切联系。在任时我得益匪浅, 但我没能做任何物理研究。

在 ZGS 的设计和改进中, 我们做了许多新颖的设施: ①在二极铁端部应用边缘聚焦, 这样我们只需要平直的磁场, 就可以利用最有效的二极铁窗框设计, 从而被称为零梯度同步加速器。我们能在不太大的磁铁尺寸和功率损耗下, 在 21.5T 的磁场强度时达到 12.5GeV 的能量。②为减小真空室厚度, 我们试用了有低真空间隔的双层真空室。③束流引出是采用当时普遍应用的 Piccioni 系统, 为简化它的运转, 我们研制了将束流的低能和高能轨道自动分开的方法。后来, 我们改用了共振(再生)引出系统。④我们利用负氢离子电荷交换注入法, 提高了束流强度, 所获得的最高流强为  $0.73 \times 10^{13}$  粒子/脉冲, 这在强聚焦加速器中都是个可观的流强。⑤ZGS 是第一台加速了极化质子束流的高能加速器。

此外, 在新技术前沿, 我们系的成就有: ①在静电电压粒子分离器中应用热玻璃电极, 从而获得了在 2cm 电极间隔中 200kV 的高电压纪录。②我们发展了以铜矩阵来稳定的铌钛丝组成的超导电缆, 并将它应用在一个小型氢泡室的磁铁中。

ZGS 在高能物理实验方面的丰富多产, 要归功于

于中西部地区的高能实验学家。此外, ZGS 也可能是恒久保持最高能量纪录的弱聚焦同步加速器。

在 ZGS 最初难产的阶段过后, 我能分出些时间来为其他加速器同仁做一些社会服务工作。其中工作之一, 成为一件很有价值的事情。1965 年, 我与橡树岭国家实验室的利文斯顿(Bob Livingston)、马丁(John Martin)以及国家标准局的科斯卓尔(Lou Costrell)一起, 创立了粒子加速器大会(PAC)。一开始, 我们就决定这个大会是为科学家、工程师和技术人员等设立的。第一届 PAC 于 1965 年 3 月在华盛顿的 Shoreham 饭店召开, 约有 750 人参加了会议。PAC 系列会议每两年召开一次, 至今没有间断, 会议主要形式也一直没有大的变化。

ZGS 开始运行时, 中西部地区的高能实验学家非常高兴能在附近有个做实验的设备, 不管是什么类型的加速器。但是, 他们与阿冈实验室及其管理单位芝加哥大学的宿怨依然存在, MURA 的大学向美国原子能委员会要求接管阿冈实验室的 ZGS 设备。然而, MURA 并不想与阿冈实验室的其他部门有所干系, 于是他们发明了一个三元的合同。阿冈大学协会(AUA)成立于 1968 年, 对 ZGS 一切设备的运行进行管理, 而芝加哥大学则继续管理阿冈其他的部门。他们同时设计了一个三角形的标识, 顶尖标为“ANL”, 而两个底角则标有“AUA”以及“U of C”。

实际上, 这个特殊的三元合同没有必要。所有在 ZGS 工作的人, 都深知高能加速器设备存在的原因是为了做高能物理实验, 而大多数高能实验学家来自大学。另一方面, 我相信 AUA 也知道我们在 ZGS 的感受, 因为他们从没有提出任何过分的要求, 或是给我们强加无理的约束。

在 ZGS 全天候运行后, MURA 运动失去了它大部分的热诚和动力。1965 年, 美国总统约翰逊(Lyndon Johnson)解散了 MURA。之后, 当一台能量为 400GeV 的加速器在仅 20 英里远的费米实验室开始运行后, 这台 12GeV 的加速器成为了多余。ZGS 在运转了 16 年后, 于 1979 年退役。AUA 既然失去了它的职责, 因而也于 1982 年解散。阿冈实验室的三角标识并没有被舍弃, 但在原来标注 AUA 的一角, 改为标注能源部(DOE)。原子能委员会于 1975 年蜕变为能源研究开发署(ERDA), 又于 1977 年蜕变为能源部。

#### 四、费米实验室

早在1960年,一些关于几百 GeV 能量的加速器的非正式讨论就在加速器界展开。我从一开始就参加了这些讨论。大家意识到,对于这样一个高能量同步加速器,注入能量应为 5GeV ~ 10GeV 才合适,如同低能量的同步加速器,用直线加速器作注入器花费就太大了。因此,需要一个作为增强器的同步加速器来把束流能量从直线加速器提高到主同步加速器的注入能量。

1963年,为设计一台 200GeV 的加速器,在伯克利组织了一个集全才俊的研究小组。我在其中领导增强器的设计。我们在伯克利的研究结果,作为一个提案于1965年提交给美国原子能委员会。到了1967年初,芝加哥西郊 Batavia 附近的一块田地选中作为加速器建造场址,康奈尔大学的威尔森(Robert Wilson)教授接受任命成为实验室主任,并于1967年11月签署了正式的授权批准。但这大概是有史以来第一次批准数额小于申请预算的3.5亿美元,批准总数被随意削减为2.4亿美元,并附带指示“用这笔钱尽可能做吧”!

到了1967年,阿冈的 PAD 已运行得相当顺利,于是我在费米实验室成立的那天,即1967年6月1日,出现在费米实验室。那时费米实验室的名称尚为国家加速器实验室,威尔森在 Oak Brook 购物中心的一幢办公楼里租用了整个的第十层楼作为实验室。我向阿冈请假,全职无偿地在费米国家实验室工作了3个月。1967年9月,在我们彼此有足够多时间进行“相互试探”后,威尔森给了我一份工作邀请,我立即接受了。所以我的费米实验室工作证号是22而不是2或3。我离开阿冈后, PAD 由于太过庞大难于指挥(总数约500人)而被分成两个系,即加速器系和高能实验设备系。

威尔森相信一个有活力的机构应该是动作快而又能伸缩的。所以尽管我担任的是加速器理论部的主任,我仍然能够深入各个部门和系统的层面中,并且能够影响他们的设计。由于在此时期,费米国家实验室的项目是世界唯一的,因此总是不缺乏既有能力又极热心的加速器人才加入进来,甚至有志愿者从欧洲来往飞航参加这个项目。威尔森能够从这些大量人才中挑选出那些和他“横冲直撞”工作方式的作者。再加上他自己的高速领导方式,导致了难以置信的建设速度。里程碑如下:1967年6月1

日实验室成立,1968年1月呈交设计计划书,同年12月1日破土动工,1972年3月1日200GeV束流首次出束,同年束流能量提高到400GeV。

费米实验室的400GeV同步加速器的许多设计特点都与那时的常规设计有分歧,有些甚至被认为很冒险。但是后来已经被应用在世界各地的高能加速器设计中,并逐渐被认为是常规的了。这些新的设计特点包括:①二极铁和四极铁分离的磁格(magnet lattice);②将加速器和束流运输线都放在地下隧道中,以增强放射性屏蔽;③特长的二级磁铁装有整体的真空盒并有预加应力而能承受自身重量;④为提高慢引出效率而采用的静电“线栅”切割板;⑤壳型绕线的超导线圈,以及流动型液氦冷却系统等,以及许多其他小的革新。

我领导的加速器理论组因为科润特(Ernest Courant)、史密斯(Lloyd Smith)、欧努马(Sho Ohnuma)等人的参与而非非常强大,但威尔森活动的工作方式使我仍然能够做其他各种技术和非技术的工作。这里我只提一点来说明那时费米实验室极有活力的学术气氛。工程开始不久,我被任命为未来对撞机方案设计的协调人。我们设计了一台使用常规磁铁的100GeV-100GeV的质子-质子对撞机,一台用超导磁铁的200GeV-200GeV的对撞机,但都中途放弃了。后来,与阿冈国家实验室合作,又设计了一台400GeV-400GeV的对撞机 POPAE,后来也搁置起来。这可能是威尔森不让我们游手好闲的办法。

威尔森同时也兼任着加速器部的主任;然而,所长的工作经常使他无暇管理加速器部门。于是我不得不经常替他管理加速器部门,有时甚至于一口气代替几周之多。

一次,我告诉威尔森不管什么任务只要为期仅1年我都肯做,他居然照诺行事,任命我担任了1年的计算机委员会主席。在那一年中,我们实验室正要选购一台新的大型计算机系统,这项工作涉及选择、规划、议价,以及最终递交等各种步骤。因而我得以做出一些实际的贡献。在这一年中,我也学到了许多有关硬件设备和计算机系统的知识。

在进行超导磁铁的科研工作时,我们需要一小组的高技术人员专门来做超导磁铁的测量工作。威尔森不知道该把这个小组放在哪个部门,于是就把他们塞到了我的加速器理论组。这样一来,我又不

得不很快学会所有关于螺旋压气机、液化箱、汤普森阀门等知识。

1976年,威尔森启动了一个重大的科研项目来研制超导加速器磁铁。自然,我满腔热情地参加了这项工作。为了研究不同的设计,每个设计都要制造一个1米长的样品用来测试。不久这项工作就做成高速流线化。作为1个周期,由新设计的校对、画图制造到性能测量的结果,只不过1个星期。这样才能检验很多的设计概念。到了1978年我们已经研制出足够好且足够可靠并可用在整体加速器中的超导加速器磁铁,但能源部不愿资助一个整体超导加速器的方案,甚至要禁止我们从事设计“能量倍加器”(后来被命名为Tevatron)。有些加速器物理学家甚至要转入地下工作,秘密地继续设计研究。威尔森因抗议实验室经费短缺而于1978年辞职,雷德曼(Leon Lederman)博士被任命为费米实验室的第二任主任。能源部最终批准了“倍加器”的方案。1984年2月,在世界上第一台超导加速器中,质子束流被加速到创世界纪录的800GeV。

在这期间,欧洲核子研究中心(CERN)正在建设一部利用Simon Van der Meer发明的随机冷却的反质子源。他们把SPS作为一个恒磁场储存环运行在270GeV的较低能量,获得了540GeV的质心能量,因而就能够发现在弱相互作用下的W和Z玻色子。于是,费米实验室就与这项重要的发现擦肩而过。

超导磁铁最适于恒磁场的运行,并在800GeV固定靶运行的质心能量已被相对论转换而大幅降低。我们建造了一台改进型的CERN式反质子源,并采用恒磁场运转的Tevatron产生900GeV-900GeV的质子-反质子对撞。这台Tevatron对撞机系统经过许多改进和亮度提高的调整,现今正进行为时数年的“二次运行”。在Tevatron的“一次运行”过程中,我还因为Tevatron的亮度比我预期的高许多,打赌输给过雷德曼一瓶葡萄酒。

与此同时,我还参加了很多与其他实验室的科技合作项目。现在能想起来的有:①劳伦斯·伯克利国家实验室(LBNL)的按Orlov方式设计的六极磁铁聚焦结构,按Sarantsev方式设计的电子烟圈电浆加速器,以及以重离子束激发的融合反应;②布鲁克海文国家实验室(BNL)的600GeV~1000GeV的加速器设计;③特拉拉莫夫(TRIUMF)和洛斯阿拉莫

斯国家实验室(LANL)的K介子工厂的研究和设计;④欧洲核子研究中心的对撞机研究和设计。

此外还有很多参予评审或顾问委员会等工作。

我应该也谈一些其他我所做过更吃力的工作(一笑)。有一阵子,威尔森对费米实验室的食堂十分不满,于是他组织了一个食堂委员会来改进,并且任命我为委员会主席。我对一个食堂委员会该做些什么毫无概念,于是我把它当作一个物理方案来做。我说服欧洲核子研究中心的意大利美食食堂和我们的食堂结成姐妹食堂,并邀请他们的主厨访问我们食堂。又聘请他为顾问,对我们的主厨进行了为期两周的评审、指导,并在离美前给了我一个很详尽的报告和建议书。这个食堂委员会运行了好几年。食堂是否有改进?我不知道,但威尔森好像高兴了。

另一件事情是,“四人帮”刚粉碎不久,威尔森邀请了10位来自中华人民共和国的加速器物理学家到费米实验室参观。由于中国当时正在计划建造一台50GeV的质子同步加速器,因此很高兴派人来参观学习。而我被指定为主要的接待人。我将他们安置在费米实验室的校园宿舍,并且给他们在威尔森的办公楼安排办公室。然而,居住在费米实验室校区内而不能驾车却带来了一些生活上的困难。因此,我又动员我的夫人开车带他们购买食物及其他一切生活用品。而我则为他们讲授加速器硬件、技术以及设计原则和概念(他们在加速器理论方面则相当精通)。同时,还带着他们在实验室里拜访其他工作人员,参观他们的仪器设备。3个月修道院般的生活他们也够受了,但是从这趟访问中,他们带回了大量的数据、知识,以及对这次访问的美好回忆。

在这一段时间里,我一有空就做些基本性的加速器物理研究。一件或许值得在这里提到的是临界能量的穿越。当交变梯度磁格刚提出时,苏联学者很怀疑当时想采用的以跳移高频相位的方法来穿越临界能量。他们建议如果磁格中加反向弯转,就可将临界能量移到无穷大,甚至可使它变为虚数(动量压缩因子为负值)。同时带来的困难则是带有反向弯转的环周长(以及经费)将增加许多。苏联萨波可哈夫加速器是第一部设计为带有反向弯转的50GeV交变梯度同步加速器。之后在CERN的PS和BNL的AGS上,以相移穿越临界能量成功后,他们撤除反向弯转,并修改了设计使能量达到70GeV。我研究了这个问题。首先详细理解弯转、

聚焦,以及有色散的直线段的作用,之后就明显看出要是把弯转磁铁、聚焦磁铁,及直线段有条理地安排好,就能不用反向弯转并可动量压缩因子减小至0甚至负数。这项工作由当时任主编的布雷威特(John Blewett)博士邀请,发表在现已停止出版的期刊《粒子加速器》(*Particle Accelerators*)上。一般而言,我的文章多数是阐明概念和原理,而把细节留给读者,来解决他们特殊的应用。我很高兴大多数我的文章都被实际应用,而且常有读者把应用的细节也发表。用高频移相穿越临界能量的方法在低流强下工作得很好。在高流强下,由于纵向的空间电荷力不能像高频电场力一样正负交换,因而会在穿越前后导致一个失配。这个失配随着流强的增加越来越大。解决这个问题最好的办法,当然是采用没有临界能量问题的磁格。对于已建好正在运转的加速器,欧洲核子研究中心提出了一个巧妙的三级高频相移的方法来匹配束流。后来我把这个方法加以改进,又发现在穿越临界能量时,束流总不可避免发生微波不稳定性现象而膨胀起来。

从上世纪80年代初期起,Tevatron的建造正在顺利进行时,费米实验室以外的一些其他工作渐渐增多并占据了 my 时间。我一直在寻找一些建造周期较短,并且在短期内有报偿的项目,而不是像1989年开始建造的SSC那样的高能机器。这直接导致了我和台湾光源项目、Loma Linda质子治疗项目,以及阿冈的先进光子源项目的合作。

## 五、台湾光源

和台湾合作始于1956年我首次访台。当时受台湾教育部的邀请做学术讲座,并且得以从我1947年离开中国后首次看望我的父母。当毛泽东在大陆建立了中国政权时,我父母移居台湾,自那时起,我就把台湾看作我的“流浪在外的根源地”,并尽所能来帮助台湾。我随梅贻琦校长在新竹重建了一个清华大学,并且为那里的研究生首次讲授了电动力学、经典力学、量子力学和量子场论等课程。还安排把阿冈实验室一些剩余的仪器设备送给清华大学,以及我的母校——在台湾重建的辅仁大学。

1982年,当两位中央研究院院士袁家骝博士和吴健雄博士向中央研究院院长提议在台湾建造一台同步辐射光源时,我开始和台湾光源有了密切合作。1983年,台湾政府同意了他们的提议。同年,成立了一个指导委员会。由于我是指导委员中唯一有加

速器经验的院士,因而被指派为第一任主任来启动“同步辐射研究中心”(SRRC)。在将近两年的时间里,我向费米实验室请半假,到台湾工作。在一些美国同行朋友的帮助下,我们设计完成了一台1.5GeV的第三代光源的储存环,以及用作注入的100MeV的直线加速器。研究中心最初10多位的枢机成员,都由台湾各大学和实验室招聘。我除了按时给他们讲授一般性的加速器技术,以及1.5GeV方案的特殊问题,还成立了一个评审委员会,主要由欧洲和美国的专家组成。第一次评审会在美国布鲁克海文国家实验室召开。研究中心最初租来的办公室设在台北的一座办公楼,而中心场址则选在台北以南40多英里处的新竹科学工业园区。后来,由于在费米实验室和台湾间的往返奔波实在太累,我不得已辞去了主任的职务,仅留任指导委员的职位。这个方案后来改加了一个1.5GeV的增强器作为全能量注入,并在各届主任和同仁的同心努力下,台湾光源终于1993年建成。现在,台湾光源每年运行约7000小时,用光率大于95%。整个设施拥有20条光束线,并拥有一个约1500名科学家和学生的用户群体。

最近,SRRC开始研究一个新的方案,即建造第二台设施——3GeV的同步辐射光源。在最近改组后,同步辐射研究中心由政府直辖改为一个由政府以基金方式投资,而由董事会主管的私人组织(财团法人),我则是董事之一,继续与台湾光源合作。

我和中国大陆的合作则开始较晚。1977年邓小平先生重新执掌政权后,我和中国的几所大学以及中国科学院的一些研究所重新建立了联系。现在,我至少平均每年去一次中国,参与项目评审或顾问委员会,或在一些学术会议上进行学术交流。

## 六、Loma Linda质子治疗设备

1976年中子治疗设施在费米实验室建成,该设施利用直线加速器产生的66MeV的质子束流轰击靶,引发中子进行医疗程序。由于最初质子治疗的特点是由费米实验室主任威尔森在1946年提出的,因此实验室对质子治疗一直抱有极大兴趣。为此,费米实验室召开了一系列的研讨会并成立了“质子治疗协调组”(PTCOG)。PTCOG举办了多次研讨会,吸引了全美国各实验室和医院的物理学家及放射治疗专家前来参加。在1986年举办的一次会议中,加州林达(Loma Linda)医院放射科主任James

Slater 医学博士请求费米实验室主导建造一部质子加速器以及束流输运线等作为临床医疗设备, 资金由医院提供。当时费米实验室副主任李德维 (Phillip Livdahl) 博士有兴趣接掌这个计划并邀请我加入此团队。

以光栅型扫描 (raster scan) 的方式照射肿瘤所用的加速器, 必须能迅速由 70 MeV 到 250 MeV 间调整能量并能均匀地慢引出束流。但是, 束流强度的需求并不很高。基于这些考虑, 我认定要达到这些设计目标最好又最价廉的是弱聚焦同步加速器。此机器需有每秒 2 个脉冲的频率和慢共振引出。注射器的选择很多, 最后决定采用一台简洁的 2 MeV 射频四极聚焦加速结构 (RFQ)。在这个方案于 1987 年开始时, 全时工作的成员只有我、李德维和一位机械工程师。但有费米实验室为后盾, 任何时候我们都可以得到临时助手及一切所需数据。

我们花了 1 年时间在费米实验室从事这个加速器的安装和调机工作, 然后拆卸运送到 Loma Linda。虽然费米实验室不负责建造治疗室、输运线旋转架、提供束流的治疗头等辅助单元, 我们仍需尽力参与整体方案的讨论和设计。在经历了这个项目的建造后, 我在辐射生物学、剂量学等方面都吸收了很多新知识, 而且对辐射医疗专业人员的性格有了更深认识。多年来, Loma Linda 质子治疗设施一直在可靠、准确、顺利, 且十分繁忙地运转着, 使 Loma Linda 医院成为全国首创临床质子治疗的医院。

### 七、阿冈, 先进光子源

在 ZGS 退役后, 阿冈国家实验室的加速器人员开始研究下一步要做的加速器计划。其中, 一个成功的小型项目是一个以 500 MeV 快循环质子同步加速器为主的脉冲中子源来做中子散射实验。除此之外, 其他几个呈交能源部的计划均未获得批准。自 1984 年起, 阿冈开始研究一台 6 GeV 的同步辐射光源 (后来能量提升至 7 GeV), 意在申请能源部的经费, 进行建造。

1985~1986 年间, 我获得“阿冈荣誉研究员”的兼职, 负责协助和审核此同步辐射光源的设计。7 GeV 先进光子源 (APS) 的概念设计方案书于 1987 年完成。次年 5 月美国能源部批准此方案, 并任命蒙顿 (David Moncton) 博士为项目总体主任。

1989 年, 我被邀请领导加速器物理组, 这个项目的大小和职务的性质正合我的口味, 于是我欣然

接受了这项工作, 再度回到阿冈。

APS 的设计是相当保守的, 因而整个建造和调机的过程相当顺利。虽然我们在此过程中有时必须做些小的调整和修补, 可是这些都在意料之内, 没有引起过大的困难。和质子相比, 电子束流因有辐射阻尼的作用能容忍较大的磁场误差, 但是其他方面与用作高能物理的对撞机相比, 同步辐射光源中电子束流沿环各处都可用来做同步辐射源, 所以束流在全环各处的详细特性都很重要。相对而言, 在高能对撞机中束流只有在对撞点处的特性才重要。这使同步辐射储存环在设计和工艺等各方面的要求都较高, 因此储存环磁格的详细特性要在设计时特别考虑, 并且须在运行时严格地加以控制。同步辐射光源的另一个特殊要求, 是因为真空室的外壁常被同步辐射光照射而放气。要达到所需要的高真空, 真空室壁的放气指数要特别低, 真空泵的抽气率要极高。最初建造的几台同步辐射光源就是因为对这些特殊需求的了解不够, 在调机时遇到了困难。

同步辐射设施“有用的寿命”要比高能对撞机长得多, 虽然高能实验获得的新发现从理性上令人非常兴奋, 相比之下, 同步辐射研究实验的成果则对人类的进步非常“有用”。有时, 同步辐射光源几乎可以直接用作生产线中的工具。高能加速器在有新发现的实验都做完后, 其后的实验只能对已明确的物理量做更精确的测量。但是, 除非这些物理量的精确数值在物理原理上有进一步的意义, 否则耗费时力去测量小数点再后面一位数值的热诚, 就会大减。

### 八、后记——随笔自白

我在芝加哥大学物理系被训练为一个量子场理论学家, 同时为了生计我又在费米回旋加速器的工作中开始与加速器结缘。从那时起, 需要我参与的加速器项目就一个一个地接踵而来。回顾过去, 我从来没有时间去考虑, 从粒子物理转到加速器物理是否是明智的抉择, 但是我偶尔会遐想, 假如当时继续研究粒子物理我能有什么样的贡献?

写作对我来说并不是很容易。我有很多很厚的笔记簿, 里面纪录了曾想过的问题和解决的成果, 可是我总没有时间和精力把这些成果好好写出来发表。用笔记簿纪录的缺陷, 是不管我用再多的精力去整理索引或目录, 当需要数据到笔记簿中去寻找时, 常常明知有, 却总也找不到。

我非常欣赏教学之乐, 当学生眼中闪烁着那种

“我了解了”的表情与光芒时,那种乐趣本身就是最好的报酬。再者,所谓“教学是教你自己真正理解知识的最好办法”,是完全正确的。在我的年纪我觉得可以做的最可贵而且最有意义的事情,就是把我所学的一切传授给年轻的一代。所以一有机会我就做学术演讲或开课讲授。

年轻时,我认为值得追求的科学只是有关探索“极端基本的问题”,好比基本粒子和宇宙起源等。而有关实际物质的形成和转变、甚至生命和智慧的起源等种种问题,都是琐碎的细节。随着年纪渐长,我逐渐承认了人类与实际物质的世界是有它的相关

性和重要性的,所以开始把重心转移到“实用的事物方面”,如同步辐射光源及辐射医疗设备。可是我仍然认为一些 21 世纪广阔的基本科学问题,一如粒子引力的统一和暗物质及暗能量的本质的研究,是极具魅力的。

我于 2004 年 9 月 30 日从美国阿冈国家实验室退休。

(邓昌黎,美国阿冈国家实验室 60439;秦庆,北京中国科学院高能物理研究所 100049;林克莹,新竹市台湾国家同步辐射研究中心 30076)

## 科苑快讯

### 海王星上

#### 甲烷气体的逃逸通道

新一轮的探测显示,正如所预料的那样,海王星的南极比该行星其余地方的温度更高,但仍然是寒冷的(图 1)。据参与研究的科学家们称,温度相对较高的南极区域为甲烷气体从大气深处逃逸提供了通道,这为所报道的神秘“热区”提供了解释。

《天文学与天体物理学》杂志详细记录了这颗蓝色行星上首批低空大气气温分布图的情况。这些分布图表明,海王星南极的温度比该行星的其他区域高出  $18^{\circ}\text{F}$  ( $10^{\circ}\text{C}$ ),其他区域的平均温度是  $-328^{\circ}\text{F}$  ( $-200^{\circ}\text{C}$ )。

该研究的首要发起人、加利福尼亚州空气动力实验室的格伦·奥顿指出:“甲烷气体本应该冻结于海王星大气的上层,可是那里温度较高,甲烷气体可以通过上层而泄露出去。这样就解决了一个长期存在的问题:找到了海王星大气最上层中富含甲烷的原因。”奥顿及其同事们利用欧洲南方天文台的超大望远镜绘制出海王星的温度变化分布图。

海王星比地球距太阳远 30 倍,接受的太阳光线约是地球的 0.1%。然而随着时间的推移,这点点阳光竟然对海王星的大气造成了重大影响。

这份新的研究报告详细记录的相对高温气候跟海王星南半球的实际情况一致。由于海王星的倾斜及其轨道的缘故,

该行星的南半球已在稀少的阳光中沐浴了约 40 年。阳光稀少是因为海王星在太阳系中的行星距太阳最远。

海王星上的一年约相当于地球上的 165 年,使那里的夏季持续 40 年,而不是数月。现在海王星南半球的夏季就要结束了,奥顿及其同事们预计,随着其北极开始朝向太阳,在约 80 年后,一旦那里变得较为温暖,大量的甲烷也将从北极泄露出去。

奥顿说:“目前,海王星的南极朝着太阳倾斜,正像地球南半球在夏季期间南极向太阳倾斜一样。但是在海王星上,南极夏季持续 40 年,而不是几个月。在这期间,大量的太阳能吸收可以造成温度上的巨大变化,使连续接受太阳照射的区域跟具有日夜变化的区域大不相同。”

尽管甲烷不是海王星大气的主要组成成分,但该行星的蓝色色彩(图 2)是由甲烷造成的。甲烷气体在大气上层吸收太阳红色光线的同时,却把太阳的蓝色光线反射到太空中。

(胡德良译自 2007 年 9 月 18 日《太空网》)

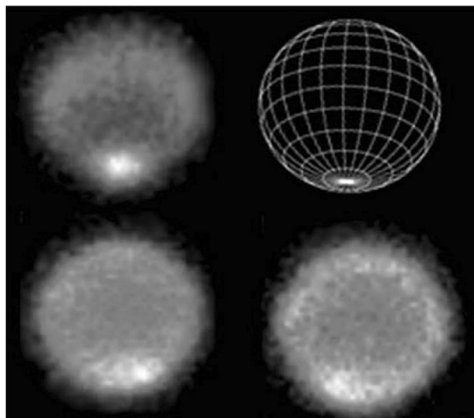


图 1

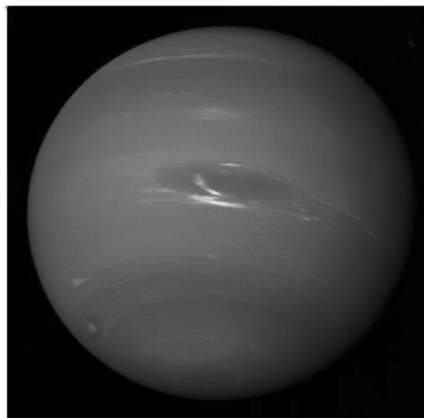


图 2