

近年来我国的宇宙线物理研究

Cosmic Ray Physics Research in China

况浩怀 吴枚

(中国科学院高能物理研究所, 副研究员)

宇宙线发现已经有80年了,它是来自地球之外的各种高能射线。宇宙线研究是粒子物理和天体物理的交叉学科,在没有加速器的时代,粒子物理实验就用宇宙线作为高能粒子源。有了加速器之后,在高于加速器达到能区的实验还得在宇宙线中进行。由于我国长期没有高能加速器,因而当时在国内只能进行宇宙线超高能物理实验。不过,这种超高能宇宙线粒子流强极弱,因而需要在高山上布置大了规模的实验才能得到有效的数据。我国有很好的高山条件,早在50年代就在海拔3 200米的云南落雪山建立了宇宙线观测站,70年代末又在海拔5 500米的西藏甘巴拉山建立了世界上最高的宇宙线观测站(见封二彩图1),在那儿由我国高能物理研究所、山东大学、郑州大学、重庆建工学院、云南大学和日本东京大学合作建造了大规模的高山乳胶室,研究 10^{15} eV以上能区的超高能作用。研究超高能宇宙线的另一种方法是观测它与大气作用产生的广延空气簇射(EAS),高能物理研究所在北京郊区怀柔建成观测 10^{15} eV以上EAS阵列,于1988年运行;云南大学和香港大学、香港城市理工学院、美国波士顿大学、密执安大学合作在昆明附近海拔2 800米的梁玉山建成一个观测 10^{14} eV以上的EAS阵列;由高能物理研究所、西藏大学、西南交大、云南大学和日本东京大学、甲南大学等合作在海拔4 300米的西藏羊八井建成一个观测 3×10^{13} eV以上的EAS阵列(见封二彩图3),于1991年开始运行;高能物理研究所和北京天文台合作在兴隆建造两个观测 10^{12} eV以上能区EAS产生契伦科夫光的望远镜(见封底),也于1991年底开始运行。近年来宇宙线研究的重点逐渐偏重于天体物理课题,从初级宇宙线的成分、能谱、元素丰度、反物质含量到宇宙线是怎样起源、怎样加速、怎样传播这些研究了多年而未能完全解决的问题,特别是在60年代初观测到有的天体是很强的X射线源,以后又发现

射线源,它使天文观测发展成从微波到 10^{18} eV的 γ 射线的全波段电磁辐射观测。由于X、 γ 射线不受宇宙空间磁场的偏转,因而便于直接寻找发射它的点源。一般keV~10GeV的X、 γ 射线都被大气吸收,故只能在大气顶端进行观测,高能物理研究所与大气物理研究所合作从70年代末发展了高空科学气球以及空间10~200keV的硬X射线探测技术,包括空间数据采集、传递、遥测、遥控及姿态控制等。在 10^{12} ~ 10^{16} eV能区的 γ 光子则用地面上的契伦科夫望远镜和EAS阵列加以观测。

对宇宙线中的中微子研究是很有意义的课题,它包括宇宙线在大气级联中产生的中微子、太阳发射的中微子、超新星爆发产生的中微子和宇宙空间弥散的中微子。由于中微子与物质作用的几率很小,探测非常困难,往往要大型探测器才能得到有效的记数。这种大型探测器目前由我国建造尚不可能,只有参加国际合作实验,如高能物理研究所等单位参加在意大利Gran-Sasso 4 000米水当量地下的LVD实验,设计用1 800吨液体闪烁体,估计每年可得约 10^3 个太阳中微子引起的记数。而大规模的空间观测往往需要更大量的投资,高能物理研究所引进了国外几家天文卫星的X、 γ 天文数据库,建立了相应的计算机数据分析系统,开展了天体物理数据分析方法和天体物理的研究。此外,1990、1991年中国与苏联合作进行两次跨国长距离高空气球飞行,也是很有意义的。

下面简单介绍近年来研究取得的一些成果。

在宇宙线超高能物理方面用甘巴拉山乳胶室138吨铅和300吨铁构成的乳胶室,经过约十年的实验,总曝光量为950平方米年,得到观察能量超1 000TeV的事例约30例,超过100TeV的事例数百例,事例数量和质量在世界上四家乳胶实验室中都属好的。对这些事例并参照世界其余三家乳胶室所得事例进行了综合分析。由于这些事例是初级宇宙线与大气核多次作用积累的结果,图象

十分复杂,只能采取蒙特-卡罗“Monte-Carlo”模拟分析,即把超高能作用模型,初级宇宙线能谱成分等参数输入计算机进行模拟,形成的人工事例与实验数据进行统计分析比较。结果给出了 $10^{15} \sim 10^{17}$ eV能区的强作用和宇宙线初级成分的主要性质,在此能区非弹性作用截面继续缓慢上升,次粒子的平均横动量缓慢上升,作用中有较多的大横动量喷注产生的特征。这些都与量子色动力学QCD的图象大体一致。但这中间有几个因素互相交织在一块,在实验中发现宇宙线高能成分在大气中吸收较快,如果宇宙线中的重核成分在超高能区增加,或者强子作用的非弹性程度增大,或者强子作用碎裂区标度行为破坏增强,都能引起这种现象,所以还有待进一步研究。更有趣的是少数稀有事例,有的表现出比QCD预期更大的次粒子横动量分布,有的显示呈现夸克-胶子等离子体相变的迹象,这些有待更仔细的分析,更有待加速器到达此能区后的精确实验检验。

用EAS阵列研究超高能作用特征已进行多年。由于这种方法较粗,一直没有得到突出的结果。我国建立的几个阵列规模不大,主要用于寻找天体的超高能 γ 源和研究其它空间问题,其中以羊八井阵列特点最为突出。它海拔4 300米,是世界上正在运行的14个阵列中最高的一個,因而探测阈能低,为30TeV。虽然阵列规模不大,记数频率却高达20赫兹,这样对那些短期发射高能 γ 射线的点源观测是最有利的。此外,阵列角分辨优于 1° ,仪器自动化程度高,所处位置交通方便,气候良好,又有地热电站供电,这一切都使它成为一个便于长期运行的阵列。现在已得到的数据初步分析表明,蟹状星云方向在1991年有两次短期发射 10^{13} eV的 γ 射线活动。另外,还有一个有趣的课题是,分析1972年云室事例率时发现一个事例率增加与太阳质子事件相关的迹象,表明太阳的剧烈活动可能使 10^{13} eV量级的宇宙线强度增加。这几年正是太阳活动高峰期,太阳质子事件较多,用羊八井阵列研究这个课题是合适的。在约 10^{12} eV能区,在兴隆有两台契伦科夫望远镜,每台有三个直径为1.5米的抛物面反射镜聚光,一台用于漂移扫描,另一台则对点源自动跟踪。长期以来有很多大于 10^{12} eV能区点源的报道,但不少都不可靠。我们这些仪器的长期运行将对解决这个疑难问题作出自己的贡献。

从1979年以来,我们开展了高能天体物理的研究工作。经过十几年的努力,在气球的研制、观测仪器的制造、观测数据(包括国外引进的数据)的分析、计算机及数据库的建设等方面都取得很大进展,并取得一系列重要的物理成果。

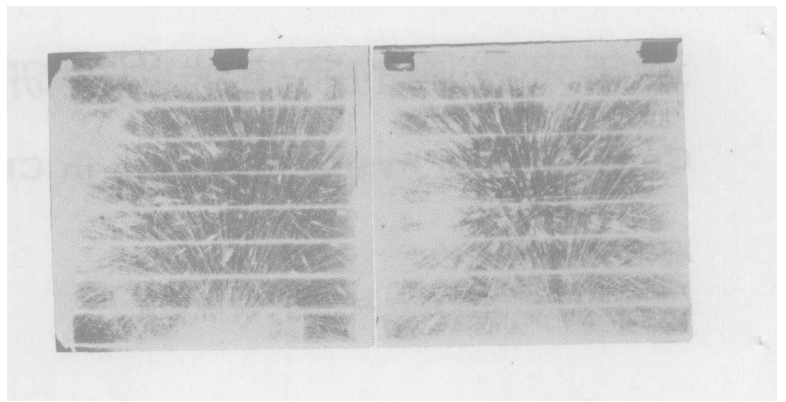


图 早期用云室记录的宇宙线事例的径迹照片

气球是高能天体实验观测仪器的运载工具。从1979年到1984年,我们建成了万立方米量级的气球制造系统,以及相应的气球发放场。同时建成了气球发放地面站,包括:遥测遥控,姿态控制、吊舱制做和吊舱回收系统。1984年之后,开展了超大型气球的研制,到1989年,我们已经建成了147米长的超大型气球生产线及加强带生产线,并成功地制造了40万立方米的气球。与此同时,开展了气球形状的理论研究,通过计算,找到了优于传统的“自然型”气球的另一种球型,取名为“混合型”气球。还对超压气球和系留气球进行了理论探讨,于1990年制成300立方米的艇形系留气球。为适应大型气球的发放要求,研制了两阶段静态和动态发放设备,对大气球飞行所需的工程配套设备,如放气阀,压舱阀,温度和气压传感器,工程监测数据的采集系统,球载微机等也进行了研究,改进和制做。

在天体物理的实验观测仪器方面,以观测X、 γ 射线为目的,先后制做了HAPI-1、HAPI-2、HAPI-3等3个复合晶体探测器,灵敏面积和能量分辨率不断提高。利用HAPI-1,于1984年夏天,成功地观测了蟹状星云脉冲星,并获得其周期相位图。利用HAPI-2于1985年观测了X射线源Cyg X-1、Cyg X-3,并在Cyg X-1的能谱中发现于160 keV附近计数明显涨高,有发射谱存在的迹象。1985年制成STAR-1充氙多丝正比室、灵敏面积达500厘米²。从1988年到1990年利用这台仪器观测了大气中子感生本底和Cyg X-1、Cyg X-3的X射线谱。

1989年开始研制更大型的两组球载X射线望远镜HAPI-4和STAR-2(见封二彩图4)。HAPI-4的灵敏面积为1 600厘米²,由多丝正比室和复合闪烁晶体叠加而成,可扩展硬X射线的探测能区至400keV,提供更好的时间分辨和更高的探测灵敏

度。STAR-2的灵敏面积为2 775厘米², 能量分辨可达到10%(60keV), 指向精度为0.1°。这两组望远镜将于1992年完成, 使我国拥有较大型的、高水平的空间高能天文观测装置。还研制了与HAPI-4、STAR-2相配套的空间探测用微型计算机、电子学和姿态控制系统, 包括核电子学信号获取和数据采集系统、状态数据采集系统、姿态控制和指向系统、编码发送和微机遥控、地面数据记录与监视系统, 以及描迹跟踪。

在空间高能天文数据处理和物理分析方面, “高能天体物理实验室”已装备由VAX3800、VAX11/750和VAX3100 station组成的群机系统, 该系统上已建立了欧洲 γ 天文卫星COS-B的全部数据库及其分析软件系统, 已建立欧洲X天文卫星EXOSAT和美国X天文卫星爱因斯坦天文台HEAO-B的部分数据库, 以及以我国气球观测数据建立的X天文数据库和分析软件系统LDAS。该系统还即将建立哈勃望远镜HST的分析软件系统和引进有关数据。该计算机系统配备有较完善的科学计算软件环境, 包括STARLINK、CERNLIB、NAG等软件库, 为空间探测器研制、空间数据分析和理论计算工作提供有力的计算分析手段。该计算机系统即将实现同国际计算机系统的卫星通讯连接。

对于高能天文观测数据分析方法的研究, 在时间分析方法、解谱方法和成像分析方法三个方面都取得了重大进展。采用“粗化”频率分辨的办法改进传统的傅里叶分析, 使需要计算的频率点数减少到原来的1/10~1/100; 引入对时间系列的“点扩展函数”概念, 显著提高了周期搜索效率; 与成像分析相结合, 提高了微弱周期信号的检测能力; 提出一种直接解谱方法, 显著提高了能量分辨能力和灵敏度; 将相关分析方法引入最大熵方法, 并建立一套直接成像迭代算法, 大大提高了成像的灵敏度。

1987年以来, 高能物理研究所和中国科技大学、南京大学等单位合作, 通过处理X、 γ 天文观测数据和建立物理模型, 在高能天体物理前沿取得了一批重要成果。例如: 首次获得Cyg X-3的GeV能区 γ 射线像; 发现了Cyg X-3双星X辐射与 γ 辐射强度相关(50MeV以下正相关, 以上能区负相关), 并建立了物理模型进行解释; 首次获得40~50MeV能区银河系 γ 射线全天区天图; 发现射电脉冲双星PSR1951+22的高能区脉冲辐

射; 发现脉冲双星PSR1820-11的高能 γ 辐射; 分析了活动星系PG1211+143的X射线谱, 对AGN软X超的存在及其产生机制提供新的依据; 获得PG112W2的X射线在约13keV存在峰结构的迹象; 首次获得脉冲双星EXO2030+375各相位的X能谱, 发现了冷等离子的吸收与相位相关, 为研究脉冲星的X射线发射机制提供了重要的依据。

由上可以看出, 经过近年的努力, 我国的宇宙线研究跟踪学科发展的趋势, 瞄准国际先进水平, 着重仪器设备的建造, 同时已取得一些较好的物理成果。今后重点将转向在观测、数据分析和物理方面多做工作, 争取做出更多的成果。

(责任编辑 宋义荣)

新书介绍

《茅以升科普文集》正式出版发行

由中国科普创作研究所主编, 湖北教育出版社出版的《茅以升科普文集》出版了。

被誉为“中国桥魂”的茅以升同志, 是我国著名的桥梁专家, 又是在我国广大读者中享有盛誉的老科普作家。数十年来, 他孜孜不倦, 勤奋工作, 在我国大江之上建造起规模宏伟桥梁的同时, 还精心创作了许多优秀的科普作品。其中科学小品文尤为读者所喜爱。60年代, 当《桥话》在《人民日报》上连载时, 曾受到了毛泽东同志的称赞, 他的另一篇科学小品文《中国石拱桥》, 被收入全国中、小学语文课本, 受到广大青、少年的欢迎。

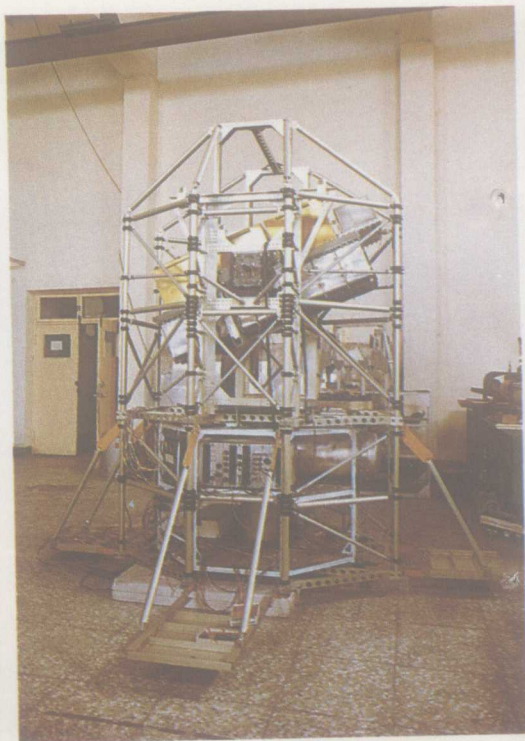
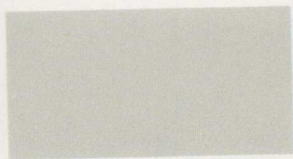
《茅以升科普文集》从作品内容上分为四部分: 1. 作者六十年生活历程的自我回顾; 2. 科普理论论述; 3. 科技与社会述评; 4. 科学小品文。《文集》集中反映了作者数十年来对科普工作经验的思考与理论, 体现了对我国科普事业的关怀与热爱, 对祖国未来的主人——青、少年一代热爱科学的殷切期望。《文集》还反映了, 作者以通俗的语言, 广博的学识, 富有文采的笔法创作的科学小品文, 深入浅出地向读者介绍了我国古代桥梁建筑的悠久历史, 富有民族风格的桥梁建筑技术, 以及对我国古代桥梁建筑技术与文化艺术高度统一的丰富内涵。这对广大读者, 尤其对科普创作、科普理论研究工作来说, 是一本增进学识, 开发智能, 丰富科普理论, 提高学术水平的优秀科普读物。

(吕海瑛)

我国宇宙线物理研究



1. 西藏甘巴拉山海拔5 500米乳胶室设备, 世界最高的宇宙线观测站, 用于研究 10^{15} eV以上能区的超高能作用。
2. 门头沟510米深地下实验室, 作低本底放射性实验和宇宙线 μ 子等探测用。
3. 西藏羊八井海拔4 300米广延空气簇射阵列, 当前运行的同类阵列中的最高者。
4. 观测硬X-射线的充气多丝正比室STAR-2试装入吊舱中。



1

2

3

4