

空间物理学进展

(第三卷)

吕保维 叶永烜 刘振兴 主编



科学出版社

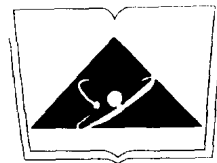
空间物理学进展

(第三卷)

高耀熊 叶永烈 周建伟 主编



科学出版社出版



国家自然科学基金委员会资助出版

空间物理学进展

(第三卷)

吕保维 叶永恒 刘振兴 主编

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书内容包括两大部分:第一部分论述地球空间粒子的空间分布、时间变化及其与磁层亚暴和磁暴过程的关系等方面的新进展,主要包括地球捕获粒子带中低能粒子,地球捕获带中的高能粒子,磁层带电粒子输运和扩散现象的理论基础,地球磁层中来自电离层的离子,磁层等离子体结构的 GEOTAIL 卫星观测。第二部分在地球磁层探测和研究的基础上,论述行星磁层结构探测和理论研究的新进展,主要包括水星磁层结构、太阳风与金星和火星的相互作用、外行星(包括木星、土星、天王星和海王星)磁层探测。

本书可供有关高等学校的教师、研究生及空间物理、太阳物理、行星物理学的研究工作者学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

空间物理学进展(第三卷)/吕保维,叶永烜,刘振兴主编. - 北京:科学出版社,2001

ISBN 7-03-008998-7

I. 空… II. ①吕…②叶…③刘… III. 空间物理学-进展 IV. P35-1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 84502 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 7 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

2001 年 7 月第一次印刷 印张:11 3/8 插页:1

印数:1—800 字数:297 000

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

编委会名单

吕保维	叶永烜	刘振兴	于 晟
王 水	方 成	艾国祥	朱志文
肖 佐	赵寄昆	胡文瑞	涂传诒

执行编委

史建魁

前 言

近年来在地球磁层开展了多个卫星的探测计划（如 CRRES, Polar, Geotail, Interball 以及 与这些卫星相配合的 Wind 和 SOHO 卫星），在磁层粒子特性的探测和研究方面取得了一些新的进展。另一方面，利用空间飞船对内行星（金星、水星、火星）磁层及外行星（木星、土星、天王星和海王星）磁层进行了探测和研究（如 PIONEER 10, 11; VOYAGER 1, 2 和 GALILEO 卫星），有一些新的发现。

磁层物理的主要发展动向是：在行星际和地球磁层的各主要区域布置多颗卫星进行多卫星的协调探测及多尺度的探测（包括中、小尺度）；利用多卫星的探测数据，揭示磁层中场和粒子空间分布和时间变化的新现象，研究磁层结构和动力学对行星际磁场和太阳风扰动响应的全球过程；对内行星磁层和外行星磁层及其主要卫星进行探测，研究太阳风与行星磁层的相互作用，在此基础上开展地球磁层与行星磁层的比较研究，了解行星磁场起源及其对行星磁层中带电粒子和中性大气演化的影响。

当前磁层物理的研究情况主要是利用国际日地物理计划 (ISTP) 中几颗核心卫星（如 SOHO, Wind, Polar, Geotail 和 Interball）及近年来发射的卫星探测数据，围绕着国际空间局协调组织 (IACG) 三个战役的主要内容进行研究，研究的焦点集中在：影响太阳风能量向磁层中传输的磁层顶边界层的结构和动力学过程；磁层亚暴和磁暴的发生和发展对行星际条件响应的全球过程；磁层中不同能量的带电粒子空间分布和时间变化对磁层亚暴和磁暴的响应过程。地球磁层和行星磁层的比较研究也是一个重要的课题。

结合国家自然科学基金重点项目“磁层空间环境的全球变化

过程及其效应”(No.49834040)的研究内容及空间物理学发展的动向和研究现状,我们编著了本书。其主要内容反映了当前受重视的一些关键问题,对进一步了解磁层空间粒子(包括亚暴注入粒子、辐射带粒子、环电流粒子、电离层上行离子和沉降电子)的时间变化过程(如粒子的加速、输运、扩散和消失机制等),了解磁层亚暴和磁暴对磁层捕获粒子及磁尾结构的影响,了解地球磁层和行星磁层的共性和特点,了解行星磁场和粒子的来源及演化等重要空间物理问题有十分重要的科学价值。

人类对空间的开发和利用在不断发展,各种科学卫星和应用卫星正向星座小卫星的方向发展,大型的空间站正在逐渐建立,飞行器在空间中将会长时间的运行,宇航员在空间的生活时间也将会越来越长,这些都需要对空间环境特别是各种能量粒子的时空变化过程有进一步的了解。本书主要内容将会推动磁层中爆发性粒子事件预报的发展,对飞行器和宇航员的安全防护有重要应用价值。

本书共分十章,材料主要来源于作者们的研究成果,同时也结合了国内外在这一领域研究的进展,主要包括:①空间高能粒子研究回顾;②环电流及伴随的效应;③行星际激波引起的新辐射带的迅速形成;④地球磁层中来自电离层的离子;⑤磁尾等离子体结构:GEOTAIL 观测;⑥磁层亚暴的全球模型;⑦地球内磁层的场向电流;⑧金星及火星磁层与太阳风的相互作用;⑨水星磁层的观测研究;⑩外行星的磁层物理现象。

最后需要说明的是,国家自然科学基金委员会资助了本书的出版。在此,我们特表示衷心的感谢。

目 录

前 言

第一章 空间的高能粒子——我研究经历的回顾····· (1)

参考文献····· (10)

第二章 环电流及伴随的效应····· (11)

第一节 简介····· (11)

第二节 带电粒子的运动····· (15)

第三节 粒子分布、电流密度和场····· (19)

第四节 环电流的观测和模式研究····· (26)

第五节 环电流的高层大气效应····· (33)

参考文献····· (45)

第三章 行星际激波引起的新辐射带的迅速形成····· (48)

第一节 引言····· (48)

第二节 辐射带研究的简要回顾····· (49)

第三节 由行星际激波引起的新辐射带的形成····· (54)

第四节 结束语····· (81)

参考文献····· (83)

第四章 地球磁层中来自电离层的离子····· (86)

第一节 引言····· (86)

第二节 上行离子的源区····· (87)

第三节 磁层中的电离层离子····· (95)

第四节 上行离子随地磁活动的变化····· (102)

第五节 上行离子随太阳活动的变化····· (103)

第六节 上行离子的理论研究····· (107)

参考文献····· (120)

第五章 磁尾等离子体结构: GEOTAIL 观测····· (124)

第一节 GEOTAIL 卫星简介····· (124)

第二节	磁岛、磁绳和传输压缩区的形成与演化·····	(125)
第三节	磁岛、磁绳和传输压缩区的观测特征·····	(132)
第四节	多重磁岛与 TCR 观测 ·····	(137)
第五节	磁岛边界层的观测·····	(147)
第六节	磁绳的观测特征与模型·····	(150)
	参考文献·····	(159)
第六章	磁层亚暴的磁重联-电流中断-电离层、磁层耦合全球模型·····	(165)
第一节	磁层亚暴及磁层亚暴模型·····	(165)
第二节	近磁尾位形不稳定性理论·····	(178)
第三节	近磁尾位形不稳定性与磁层亚暴膨胀相的爆发·····	(192)
第四节	极区电离层的协同效应和亚暴电流楔·····	(198)
第五节	亚暴膨胀相的中磁尾磁重联-近磁尾电流中断-电离层、近磁尾耦合全球模型 ·····	(202)
	参考文献·····	(208)
第七章	地球内磁层的场向电流·····	(218)
第一节	引言·····	(218)
第二节	场向电流参数的实验确定·····	(222)
第三节	地球内磁层场向电流的统计特征·····	(229)
第四节	结果与分析·····	(240)
	参考文献·····	(242)
第八章	太阳风与金星和火星的相互作用·····	(245)
第一节	绪论·····	(245)
第二节	太阳风与金星的相互作用·····	(250)
第三节	太阳风与火星的相互作用·····	(262)
第四节	火星与金星弓激波的比较研究·····	(267)
第五节	结语·····	(280)
	参考文献·····	(284)

第九章 水星磁层	(287)
第一节 引言.....	(287)
第二节 水星磁层中的主要物理过程.....	(292)
第三节 磁力线冻结.....	(294)
第四节 场向电流.....	(296)
第五节 极低频 (ULF) 振荡	(298)
第六节 粒子加速.....	(299)
第七节 表面静电感应.....	(303)
参考文献.....	(305)
第十章 外行星的磁层物理现象	(308)
第一节 简介.....	(308)
第二节 木星.....	(308)
第三节 土星.....	(322)
第四节 天王星.....	(335)
第五节 海王星.....	(344)
参考文献.....	(348)

第一章 空间的高能粒子

——我研究经历的回顾

范章云

美国亚里桑那大学物理系

1957年10月4日和11月3日,原苏联分别将Sputnik 1号和2号送入人造卫星轨道,相形之下,美国在12月6日发射的Vanguard两秒钟后就失掉了推冲力。这事件给美国政府一个很大的刺激。幸亏,在1958年2月1日,美国用Jupiter C将Explorer 1号送入远地点2248公里的轨道, Van Allen教授首先宣告发现了辐射带^[1]。接着, Vernov等发表Sputnik上测到了高能粒子^[2],从而拉开了空间高能粒子研究的序幕。

当听到发现辐射带消息的时候,我正在Arkansas大学物理系任教,刚和Hughes教授申请到了一笔经费,准备造一台200keV的加速器,产生质子,打入 N_2 中,继续做我以前在芝加哥大学天文物理系Yerkes天文台所做的极光模拟实验。很显然,激发北极光的质子和辐射带有密切的关系。所以,听到上述消息,我非常高兴,觉得我们这个研究项目是很有前途的。5月底学期结束后,我正考虑如何度过那个暑假,忽然接到芝加哥大学物理系Simpson教授的一个长途电话,邀请我到芝加哥工作三个月,开始一个太空物理实验。我当时就答应了,因为他给我的待遇相当好,还加路费,反正只是三个月。谁知三个月变成了30年,使我后来有机会在研究空间高能粒子舞台上扮演了一个角色。

到达芝加哥的第二天,将家里安顿下来以后,就去看Simpson教授。原来,1957年底,Simpson教授从校长Kimpton那边得到了一笔款,希望将芝加哥大学的Midway实验室改为太空物理实验室。

物理的课题,由 Simpson 和 Meyer 教授决定。他们想在辐射带里测量宇宙线的强度,希望知道究竟福布什下降(Forbush Decrease)是由太阳活动直接引起的,还是太阳活动引起地磁扰动然后由地磁扰动而引起的。他们设计了一个探测器,将一个圆柱形正比计数器分为两个半圆柱形计数器,然后将这两个正比计数器联成双重符合。这样,可以将高能粒子引起的事件和由韧致辐射引起的事件分开。我的责任,是给 Midway 实验室的工程师和技术人员介绍一些一般性的物理思想使他们了解实验的目的。

我拿了这个方案回去,仔细考虑了一下,发现它有个缺点,那就是,一个韧致辐射 X 射线,可以在一个计数器中产生一个康普顿电子,再到第二个计数器中,产生另一个康普顿电子,这种机会,在辐射带里不能忽略。我当时就去看 Simpson 教授,建议一个改进的正比计数器系统,Simpson 教授毫不犹豫地接受了我的论点。几经改进,这个系统如图 1.1。它是将 7 个 7.5cm 长,直径 1cm 的正比计数器捆在一堆,分成 3-1-3 三组,中间单独一个量韧致辐射,需要三重符合测量高能粒子。Simpson 和 Meyer 给我全力支持,决定将这个系统放在先驱者 2 (Pioneer 2)、Explorer 4 和

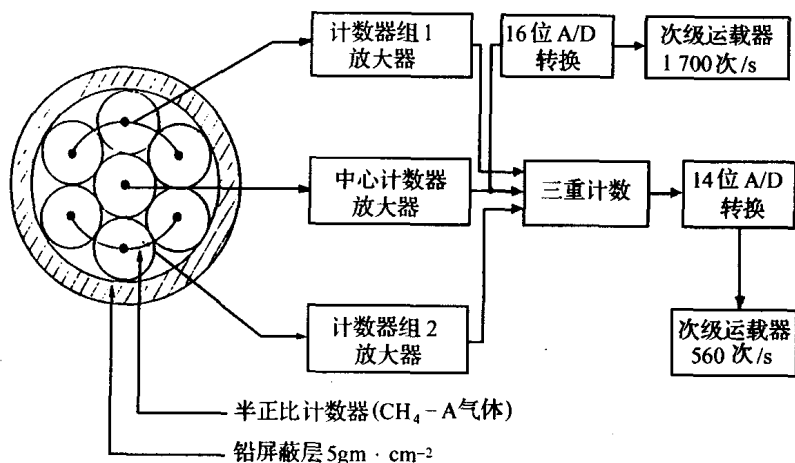


图 1.1 探险者 5 号上外电子带分析仪部件图

Pioneer 5 上。它们的发射时间,各为 1958 年 11 月、1959 年 8 月和 1960 年 3 月。那就是说,我已不能在三个月后回到 Arkansas 了,Arkansas 大学物理系主任 Paue Sharrah 非常客气,准我请假两年,使我能安心将这些太空实验做好。

除了 Pioneer 2 号因第三级火箭没有点燃而失败以外,Explorer 6 和 Pioneer 5 上的实验是非常成功的。Explorer 6 上电池的寿命,只有两个月(那时还没有可用的太阳电池)。在这两个月中,我们很清楚地将辐射带的高能粒子(三重符合)和韧致辐射分开,看到内外辐射带的强度和地磁扰动的相关性(图 1.2)。最令我高兴的是用在同一个 L 量但不同磁纬的计数,而推到粒子的投掷角的分布^[3]。当然 Simpson 教授最想知道的,是在 Pioneer 5 号上由太

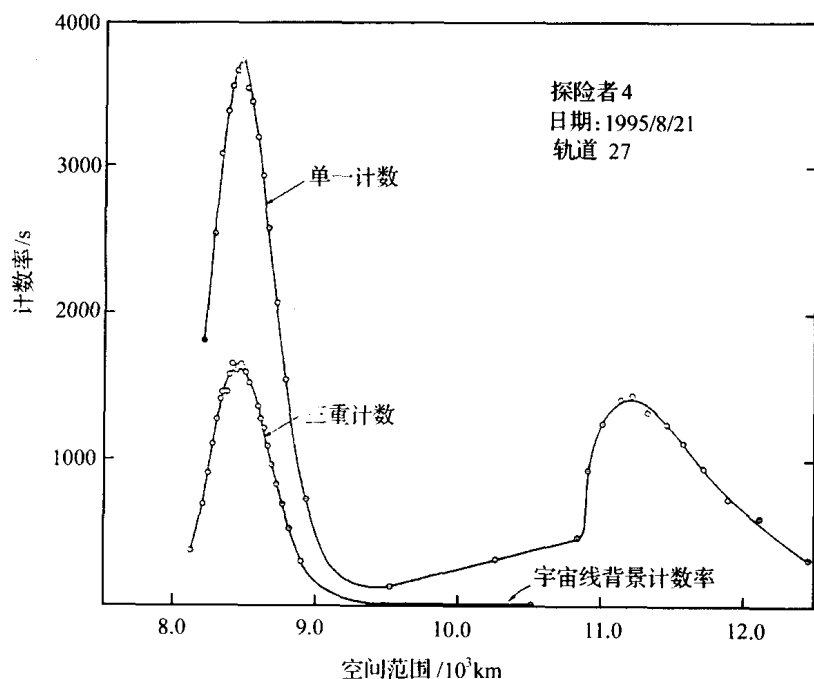
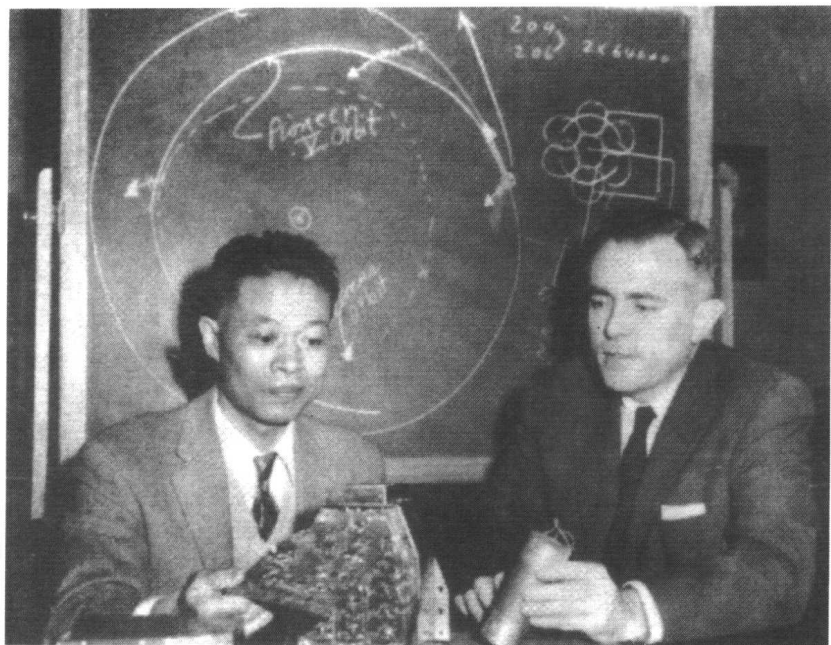


图 1.2 沿卫星轨道的质子计数率

这些数据表明了高能质子区 P_1 (内带) 和外带中电子峰的存在。注意,由于宇宙线辐射使得三重质子计数率超过 P_1

阳风中的磁场直接引起的实验结果。为了此事,新闻记者到实验室来访问 Simpson。下面的照片是他和我在当时的合照。



在 Pioneer 5 号发射以后(1960 年 3 月),Midway 实验室显得很清静,我也正打算回到 Arkansas 大学,刚好,Holloman 空军基地要求 Midway 实验室为他们设计一个宇宙线重粒子探测器,因为他们想知道空间有多少低能的重粒子和它们对宇航员的脑神经系统的影响。Midway 实验室的主任将任务交给了我。

我记得,一天早晨坐在床上空想,忽然得到用 $\left(-\frac{dE}{dx} - E\right)$ 的探测器的概念。原理是很简单的,一个粒子有三个未知量:质量、电荷和能量,高能粒子不带电子,所以,做两个不相关的测量,就可以决定粒子的质量和能量。用一个很薄的晶体测量一个高能粒子在该晶体中单位射程内能量的耗损 $\left(-\frac{dE}{dx}\right)$,再用一块厚的晶体,吸收那颗粒子,所生的信号,就和该粒子的总能 E 成正比。这种想法的探测器,从未在宇宙线实验上用过,它得到了 Simpson 和

Meyer 的支持并引起 Midway 实验室很多人的兴趣,立刻着手制造。

图 1.3 就是我的设计。那时 George Gloeckler 已经通过他的博士预备考试,就被派到实验室来,帮助建造和装配。探测器很顺利地 1961 年初造成,放在一个高空气球上做了一次实验,虽然没有得到什么有意义的结果,但证明这种想法和设计是好的。

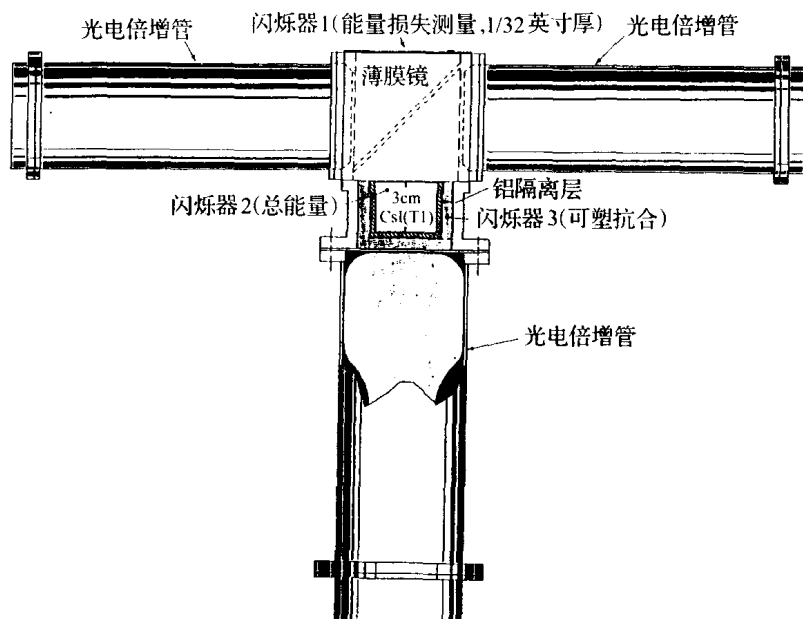


图 1.3 高能粒子探测器截面图

那个时候,半导体探测器刚刚兴起,Simpson 邀请了 Tuzzolino 并建议用半导体探测器来测量光子。在这方面成功以后,我们就用两块薄的半导体探测器,代替那块 $\left(-\frac{dE}{dx}\right)$ 晶体,同时用两块半导体探测器测量那块 E 晶体中出来的光子,代替了一个光电倍增管。这样一来,把 $\left(-\frac{dE}{dx}, E\right)$ 探测大大改进成为 Simpson 实验室中测量空间高能粒子的基本系统。这一类探测器,后来就放在

Interplanetary Monitor Platform (IMP) 1、2、3 和 4 号上及 Orbital Geophysical Observatory (OGO) A、B 和 C 上测量空间的高能粒子。图 1.4 就是放在 IMP3 上的系统的简图。

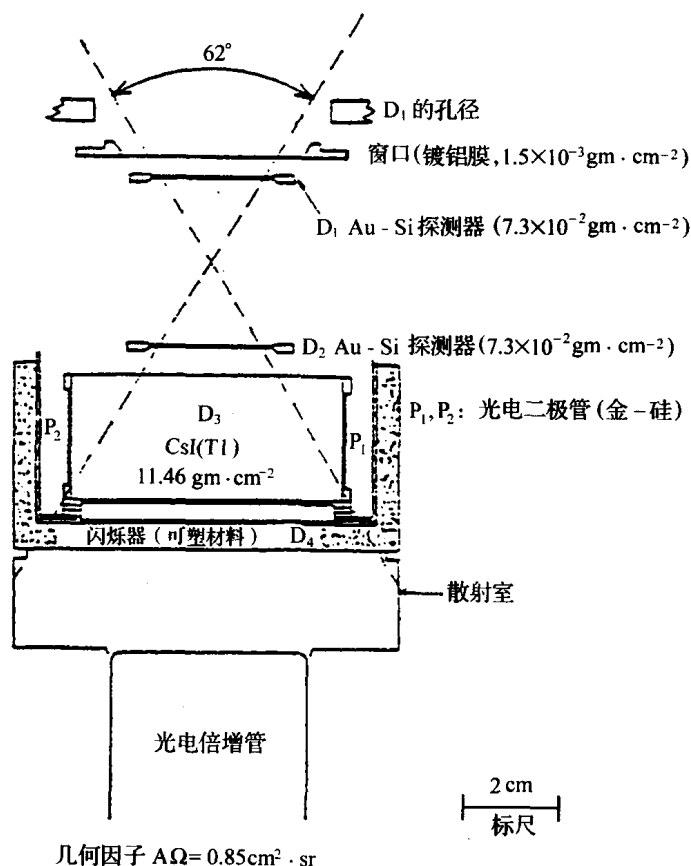


图 1.4 芝加哥大学宇宙线望远镜截面图

20 世纪 60 年代是研究太空科学的黄金时代。美国政府的投资多,发射与科学有关的太空卫星有 70 个左右。那时做太空研究的单位少,所以,只要有一点新思想,总可以拿到一笔研究经费制造新的探测器,有机会放到人造卫星上去做测量。那时空间还有

不少没有发现的物理现象,只要仪器工作正常,总可以发现一些新现象的。

我们是发现了不少新的现象,其中比较重要的,是地磁层前面的冲击面处的高能电子,磁层里电子脉冲和它的晨昏不对称性,27天周期性的太阳粒子事件,宇宙线中的 ^2H 和 ^3He 同位素和 20MeV/n 以下的能谱。那时,我们实验室里有近10个优秀的学生,例如Gloeckler,谢克强,McKibben等,还有几位客座研究人员如Pick,Kondo,Murayama等。他们像找金矿似的,一天到晚去挖,挖出了这些可喜的成果。引起我最大兴趣的是宇宙线在 20MeV/n 以下的能谱。

由于受太阳活动的调制,宇宙线每单位能量的束流,从约 500MeV/n 起向下,随能量而减小,但是,到了约 20MeV/n ,忽然变成随能量减小而增加^[4],我们在IMP和OGO上的探测器,只能量到 2MeV/n 。我就面对了一个问题,如何设计一个探测器,在空间分析 2MeV/n 以下的粒子。

我想到用静电场,将粒子依他们的单位电荷的能量分开,然后用半导体探测器测量它们的能量,这样,就可以决定每个粒子的电荷和它的能量。因为这种系统不需要窗口,能量下限完全由探测器放大器的噪音决定。那时的电子工艺的噪音,为 100keV ,用一个 20keV 的静电分析器,它就可以用来分析 $0.1\sim 2\text{MeV/Q}$ 能量中的正负粒子。制造 20kV 高压电源和空间使用的困难,可以用一个 $+10\text{kV}$ 和一个 -10kV 来代替而解决。

那时,George Gloeckler已经毕业,我们两个合作了多年,成了好朋友,我就将这个分析 $0.1\sim 2.0\text{MeV/Q}$ 粒子的思想告诉了他,他非常高兴,并建议用多条狭缝来增加静电场的视角,刚巧,Midway实验室的一位工程师E. Jums已经离开实验室,也有兴趣重起炉灶,我们三人商量合写一个研究建议,将这样一个探测系统放在IMP 7号和8号上,图1.5就是这样一个探测器的简图。

20世纪60年代,美国和苏联在空间科学上的竞争到了白热化的程度。美国有不少大学向空间科学扩展,需要天文物理的教