

# 航天器带电原理

## ——航天器与空间等离子体的相互作用

[美] SHU T. LAI (黎树添) 著  
李盛涛 郑晓泉 陈玉 闵道敏 译



科学出版社

# 航天器带电原理

——航天器与空间等离子体的相互作用

[美]SHU T. LAI(黎树添) 著  
李盛涛 郑晓泉 陈 玉 闵道敏 译

科学出版社

北 京

图字:01-2014-1520号

## 内 容 简 介

本书全面深入地介绍了航天器带电的基本原理,包括空间等离子体环境造成的航天器表面带电与高能电子辐射造成的航天器介质深层带电。书中还介绍了太空缆索、等离子体接触器、超带电、带电抑制方法,反映本领域的最新研究进展。内容包括地球空间等离子体环境、航天器与等离子体相互作用、二次电子和背散射电子、麦克斯韦等离子体中的航天器充电、势阱和势垒、航天器放电、介质深层充电、带电抑制方法、流星体碰撞及中性气体释放等。

本书可供航天器带电领域高年级本科生、研究生及科技研发人员参考学习。

Copyright © 2012 by Princeton University Press  
Published by Princeton University Press, 41 William Street,  
Princeton, New Jersey 08540  
In the United Kingdom: Princeton University Press, 6 Oxford  
Street, Woodstock, Oxfordshire OX20 1TW  
press.princeton.edu

All Rights Reserved

版权所有。没有出版人的书面许可,本书的任何部分都不得用以下任何方法或形式复制或传输,包括影印、录音或用任何信息存储系统。

### 图书在版编目(CIP)数据

航天器带电原理:航天器与空间等离子体的相互作用/(美)黎树添著;李盛涛等译. —北京:科学出版社,2015.1

书名原文:Fundamentals of Spacecraft Charging: Spacecraft Interactions with Space Plasmas

ISBN 978-7-03-042258-3

I. ①航… II. ①黎… ②李… III. ①航天器-空间带电粒子-研究  
②航天器-作用-宇宙等离子体-研究 IV. ①V47 ②P35 ③O53

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第245679号

责任编辑:耿建业 陈构洪 / 责任校对:蒋萍  
责任印制:徐晓晨 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京科印技术咨询服务有限公司印刷  
科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2015年1月第一次印刷 印张:16 7/8

字数:321 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

谨以此译著献给广大航天科技战线的工作者

## 前 言

航天器充电研究领域探求航天器表面和材料与周围等离子体和人工带电粒子环境的基本相互作用。它既是基础空间科学又是空间工程。在动笔写作本书时,尽管有些书籍中有一章或两章是论述航天器充电的相关内容,但是还没有一本专门论述航天器充电的教科书。纵览不时出现的涉及航天器充电各个方面的综述论文、研究论文和技术报告,本书旨在集这些有关航天器充电的零散研究成果于系统的教科书,服务于研究生教育,并为研究人员提供参考。

航天器充电研究始于 20 世纪中叶,发展至今,航天器充电研究已经有了长足的进步,这些都反映在历届学术会议中。第一届航天器技术会议由美国马萨诸塞州汉斯科姆空军基地空军剑桥研究室(AFCRL)和美国国家航空航天局共同发起,1978 年在科罗拉多州科罗拉多泉市美国空军军官学校召开。事实上,前四届会议都在美国空军军官学校召开。第五届会议在美国加利福尼亚州蒙特利海军研究生院召开。第六届会议在美国马萨诸塞州汉斯科姆空军基地(AFCRL)召开。第七届会议在亚拉巴马州亨茨维尔的美国国家航空航天局马歇尔航天中心召开。第八、第九和第十届会议分别于 2001 年在荷兰诺德维克、2005 年在日本筑波和 2007 年在法国比亚里茨召开。第十一届会议于 2010 年在美国新墨西哥州阿尔布开克市科特兰空军基地召开。与会人数,特别是国际参会人数逐届增多,该领域的学术论文数量也不断增加。今天,航天器充电已经发展成为一个独立的科学领域。

# 目 录

## 前言

绪论 地球空间等离子体环境	1
P.1 太阳风	1
P.2 磁层	2
P.3 地磁亚暴	2
P.4 等离子体密度	3
P.5 电离层	3
P.6 极光区	4
P.7 辐射带	5
P.8 空间等离子体环境与航天器带电的相关性	7
参考文献	7
第1章 航天器带电简介	8
1.1 什么是航天器带电?	8
1.2 航天器充电有哪些效应?	9
1.3 航天器带电是如何发生的?	11
1.4 电容充电	12
1.5 其他电流	13
1.6 航天器充电发生在哪儿?	13
1.7 练习	16
参考文献	17
第2章 像朗缪尔探针的航天器	19
2.1 轨道限制吸引作用	20
2.2 球面的电流收集	20
2.3 圆柱面的电流收集	21
2.4 平面的电流收集	21
2.5 评述	22
2.6 玻尔兹曼排斥因子	22
2.7 蔡尔德-朗缪尔饱和电流	23
2.8 练习	24
参考文献	25

<b>第 3 章 二次电子和背散射电子</b> .....	26
3.1 二次电子发射 .....	26
3.2 背散射电子 .....	28
3.3 电子发射的总贡献 .....	28
3.4 评述 .....	30
3.5 与入射角的关系 .....	30
3.6 关于经验公式的评述 .....	31
3.7 练习 .....	31
参考文献 .....	32
<b>第 4 章 在麦克斯韦等离子体中的航天器充电</b> .....	33
4.1 速率分布 .....	33
4.2 航天器起始充电临界温度:物理推理 .....	34
4.3 电流平衡 .....	35
4.4 带电水平 .....	37
4.5 轨道限制区的电流平衡方程 .....	38
4.6 与实际卫星数据的比较 .....	39
4.7 练习 .....	40
参考文献 .....	40
<b>第 5 章 在双麦克斯韦等离子体中的航天器充电</b> .....	42
5.1 多重根一般理论 .....	42
5.2 双麦克斯韦空间等离子体 .....	43
5.3 航天器电位的三重根状态 .....	43
5.4 三重根状态的物理解释 .....	47
5.5 航天器电位的三重根跳变 .....	48
5.6 迟滞 .....	49
5.7 航天器三重根充电域 .....	50
5.8 练习 .....	54
参考文献 .....	54
<b>第 6 章 势阱与势垒</b> .....	55
6.1 引言 .....	55
6.2 势垒与势阱的形成 .....	55
6.3 势垒对电子或离子分布函数的影响 .....	57
6.4 实验数据的解释 .....	58
6.5 由势垒形成的双麦克斯韦分布 .....	58
6.6 自持充电 .....	60

---

6.7	航天器尾流充电	62
6.8	练习	65
	参考文献	65
<b>第7章</b>	<b>航天器在阳光下充电</b>	<b>67</b>
7.1	光电流	67
7.2	表面反射	67
7.3	太阳主谱线	69
7.4	阳光下的航天器可能被充电到负电位吗?	69
7.5	航天器充电至正电位	70
7.6	负电位航天器的光发射电流	70
7.7	单极-偶极电位	72
7.8	光电子发射电流的入陷比例	74
7.9	单极与偶极的竞争	75
7.10	航天器光照下带电电位的测量	76
7.11	练习	76
	参考文献	77
<b>第8章</b>	<b>太空缆索、等离子体接触器和鞘层电离</b>	<b>78</b>
8.1	洛伦兹力	78
8.2	系绳切割环境磁场	78
8.3	裸线和导电系绳	81
8.4	等离子体接触器的浮动电位	82
8.5	鞘层模型	83
8.6	鞘层电离	84
8.7	鞘层电离模型的数值模拟方法	86
8.8	鞘层电离的结果	87
8.9	理论分析与空间实验的比较	88
8.10	练习	89
	参考文献	90
<b>第9章</b>	<b>电子束撞击引发的表面带电</b>	<b>91</b>
9.1	电子束的碰撞能量	91
9.2	电子束撞击未带电表面	92
9.3	电子束碰撞初始带负电表面	92
9.4	电子束撞击初始带正电表面	94
9.5	总结	96
9.6	局限性	96



9.7 练习	97
参考文献	97
<b>第 10 章 电子束发射诱导航天器充电</b>	<b>98</b>
10.1 无束流发射时的电流平衡	98
10.2 电子束发射	99
10.3 正电位充电	101
10.4 评述	102
10.5 练习	103
参考文献	103
<b>第 11 章 超带电</b>	<b>104</b>
11.1 大束流发射感应充电	104
11.2 超带电	106
11.3 实验结果的物理解释	106
11.4 长杆表面带电	107
11.5 总结	108
11.6 练习	108
参考文献	109
<b>第 12 章 从航天器的离子束发射</b>	<b>110</b>
12.1 航天器电位的主动控制	110
12.2 离子束的返回	112
12.3 电位减小的下限	113
12.4 空间电荷效应	113
12.5 带电粒子束的电荷交换	115
12.6 在离子束中的化学反应	117
12.7 太阳光下的离子束	118
12.8 练习	119
参考文献	120
<b>第 13 章 航天器放电</b>	<b>122</b>
13.1 引言	122
13.2 航天器放电的位置	122
13.3 表面放电的相似定律	124
13.4 不等量带电	125
13.5 “刷状火花”放电	126
13.6 帕邢和非帕邢放电	127
13.7 汤逊准则	127

13.8	关于阈值电压的评述	129
13.9	放电时间的演变	129
13.10	放电的实验室观测	130
13.11	流星体或碎片碰撞诱发放电	131
13.12	练习	132
	参考文献	132
<b>第 14 章</b>	<b>高能粒子透入材料</b>	<b>134</b>
14.1	引言	134
14.2	高能带电粒子在固体中的穿透特性	135
14.3	高能带电粒子透入固体的物理过程	135
14.4	带电粒子相互作用的玻尔模型	136
14.5	阻止本领	137
14.6	贝特-布洛赫方程	138
14.7	透入深度和射程	139
14.8	透入深度的近似公式	140
14.9	带电粒子的穿透效应	141
14.10	对航天员的影响	142
14.11	高能带电粒子在材料中透入的科学问题	142
14.12	练习	143
	参考文献	144
<b>第 15 章</b>	<b>航天器异常</b>	<b>145</b>
15.1	引言	145
15.2	表面带电引起的航天器异常	145
15.3	表面放电能量	148
15.4	与空间环境的关系	148
15.5	CRRES 卫星介质深层带电的证据	149
15.6	深层介质带电的结论性证据	150
15.7	辐射带 Twin 卫星上观测到的异常	150
15.8	练习	153
	参考文献	154
<b>第 16 章</b>	<b>介质深层充电</b>	<b>155</b>
16.1	引言	155
16.2	深层介质带电的重要性	155
16.3	高能电子和离子通量	156
16.4	高能电荷透入材料	158

16.5	介质特性·····	158
16.6	归结于深层介质充电的观察·····	163
16.7	高电场雪崩电离·····	164
16.8	相关问题和相关机理·····	165
16.9	莫特转变·····	165
16.10	普尔-弗兰凯尔强电场效应·····	167
16.11	齐纳击穿·····	168
16.12	电子注量·····	169
16.13	介质深层带电的临界注量·····	170
16.14	有泄漏时的电荷密度·····	171
16.15	关于航天器异常的评述·····	171
16.16	电子沉积在电子器件内部的效应·····	172
16.17	练习·····	173
	参考文献·····	173
<b>第 17 章</b>	<b>抑制带电的方法</b> ·····	<b>176</b>
17.1	引言·····	176
17.2	尖角法·····	177
17.3	热灯丝发射法·····	178
17.4	导电栅网法·····	179
17.5	局部表面导电涂层法·····	179
17.6	高二次电子发射系数法·····	179
17.7	电子和离子发射法·····	180
17.8	DSCS 带电控制试验·····	181
17.9	蒸发法·····	183
17.10	介质深层充电·····	183
17.11	练习·····	183
	参考文献·····	184
<b>第 18 章</b>	<b>流星体简介</b> ·····	<b>186</b>
18.1	尺寸分布·····	186
18.2	流星雨·····	187
18.3	流星体速率极限·····	189
18.4	非雨状流星体·····	190
18.5	碎片·····	191
18.6	流星体成分·····	191
18.7	练习·····	192

参考文献	192
<b>第 19 章 流星体碰撞</b>	194
19.1 流星粒子的动能	195
19.2 透入深度	196
19.3 对流星碰撞的防护	198
19.4 流星体屏蔽	199
19.5 流星的碰撞概率	200
19.6 角动量的扰动	201
19.7 中性粒子碰撞产生二次电子和离子	201
19.8 中性粒子碰撞产生等离子体	202
19.9 航天器突发放电的风险	203
19.10 总结	204
19.11 练习	205
参考文献	205
<b>第 20 章 中性气体释放</b>	208
20.1 电离和复合	208
20.2 临界电离速率	211
20.3 中性束剥离	215
20.4 练习	216
参考文献	216
<b>第 21 章 补充知识和附录</b>	218
补充知识 1: 热电子漂移	218
补充知识 2: 坐标变换	226
补充知识 3: 麦克斯韦分布的归一化和维数	227
补充知识 4: 通量积分	228
补充知识 5: 能量分布	230
补充知识 6: 鞘淹没	231
补充知识 7: PN 结	235
补充知识 8: 概率函数	239
附录 1: 航天器带电计算软件	239
附录 2: 在木星和土星上的航天器带电	245
附录 3: 物理常量和单位变换	249
致谢	251
索引	252
译后记	255

## 绪论 地球空间等离子体环境

空间并非空无一物,空间中几乎到处存在等离子体<sup>[1,2]</sup>。航天器与空间环境相互作用就有可能充电(如果航天器带有正的或者负的净电荷量,那么称为航天器**带电**)。太阳控制着地球空间等离子体环境的天气<sup>[3,4]</sup>。下面将简要介绍太阳风、磁层、地球同步轨道环境、电离层、极光区和辐射带的一些基本特性<sup>[5]</sup>。

### P.1 太 阳 风

太阳连续不断地发射太阳风。太阳风由等离子体电子和离子组成,其强度随时间变化。通常,太阳风电子和离子需要四天才能到达地球磁层(经过一个天文学单位(AU),1.496 亿 km)。太阳风到达地球周围时,其速度通常约为  $400 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,但是当太阳异常活跃时,太阳风速可以达到  $900 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,甚至更高。平均太阳风等离子体密度大约为  $5 \text{ cm}^{-3}$ 。太阳风的平均等离子体温度约为 10 eV。太阳风还产生平均强度约为 5nT 的弱磁场。

太阳不时发出称为**共转相互作用区(CIRs)**的高能等离子体激波。太阳间或还射出称为**日冕物质抛射(CMEs)**的大规模磁化云(图 P. 1)。当共转相互作用区和日冕物质抛射到达时,它们将严重干扰地球空间环境的**空间天气**和处于该环境的**空间系统**。通常,日冕物质抛射引起的干扰非常强烈,而共转相互作用区引起的干扰持续时间周期较长。

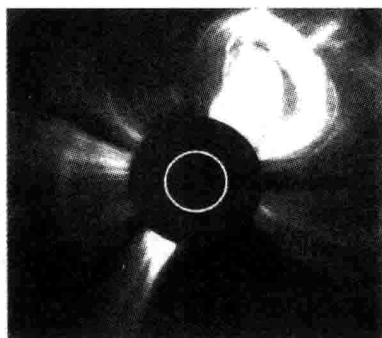


图 P. 1 日冕物质抛射(CME)

照片中 CME 云向上抛射,两边可见太阳风流光,太阳风能量比 CME 的低。为了更好地成像,挡住了耀眼的太阳(照片由 SOHO/LASCO 共同体提供。SOHO 是欧洲航天局和美国国家航空航天局的一个国际合作项目)

## P. 2 磁 层

地磁为偶极磁场。如果不受扰动,偶极磁场沿连接两极的轴线对称。太阳极大地影响地球偶极磁场的形态。这种形态称为**磁层**<sup>[1-5]</sup>,它是不对称的。太阳风将地球向日面磁场线推向地球,而将背日面磁场线拉离地球(图 P. 2)。背日面拉伸的磁场形态称为**磁尾**,其范围常超过 200 个地球半径,它超过了月球轨道,甚至更远。

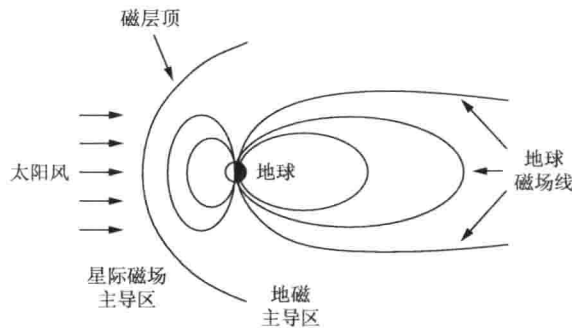


图 P. 2 地球磁层

太阳风向里推向日面磁层磁场线,但是向外拉背日面磁层磁场线

## P. 3 地 磁 亚 暴

拉伸的磁尾像是绷紧的橡皮筋,这样的状态并不稳定。最终磁尾突然拉断向地球回弹,紧接着在磁尾某处发生称为**磁场重联**的过程(图 P. 3)。磁场线回弹压缩等离子体,其结果是将电子和离子的能量加速到 keV(或者以上),可参考文献[2]。

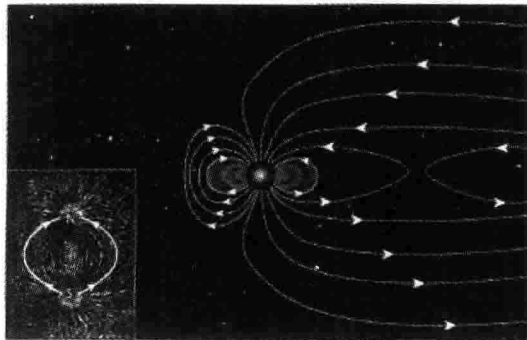


图 P. 3 磁尾重联

磁尾被太阳风拉伸。磁场重联发生在靠近地球磁尾的某处(由美国国家航空航天局供图)

(keV 或以上的)热电子和离子到达地球同步轨道(约 6.6 倍地球半径)的背日面中心附近。在那里,电子和离子进一步受到地球磁场梯度和曲率以及地球共转作用和越尾电场的影响,其结果是造成高能电子趋向于向黎明侧漂移。拉伸和回弹的整个过程可能仅持续几小时,一个夜晚可能不止发生一次,这称为**地磁亚暴**,或简称亚暴。

## P. 4 等离子体密度

电离层中的等离子体密度最高(P. 5 节)。随着径向距离的增加,密度在等离子体层中维持在  $1000 \sim 100 \text{ cm}^{-3}$  的水平,到等离子体层顶处快速降低(图 P. 4)。在同步地球轨道(约  $6.6R_E$ )处,等离子体密度非常低(约  $0.1 \text{ cm}^{-3}$ )。在不平静时期,当等离子体层范围超出地球同步轨道时,尤其是在下午侧,通常地球同步轨道高度上或附近的等离子体密度低(约  $1 \text{ cm}^{-3}$  或更低),但能量高(亚暴时,高达几 keV)。这些热电子造成地球同步轨道航天器在午夜时分和在凌晨发生充电。在平静期(略去太阳活动),地球同步轨道高度上或附近的等离子体密度约为  $100 \text{ cm}^{-3}$  或更大,但平均能量只有几十 eV 或更低。

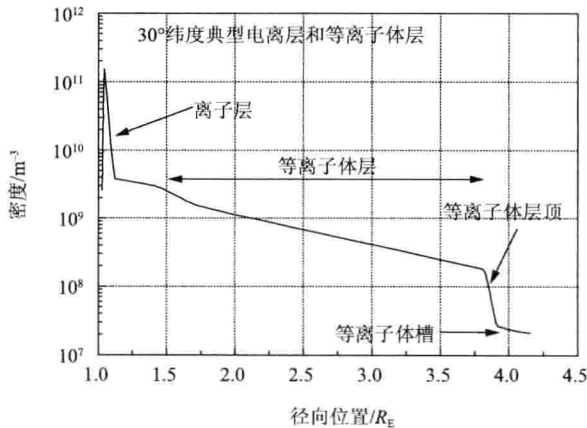


图 P. 4 电子密度与离开地球表面距离的关系

图示 30° 纬度典型电离层和等离子体层 (Richard Quinn 供图, 2006)

## P. 5 电 离 层

在电离层中<sup>[6,7]</sup>(高度为 100~1500 km),等离子体密度高,但能量很低。等离子体密度为  $10^4 \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$ ,在大约 300 km 高度处密度最高,电子密度在夜晚达到

大约  $10^5 \text{ cm}^{-3}$  而白天大约为  $10^6 \text{ cm}^{-3}$  (图 P. 5 和图 P. 6)。电离层中电子和离子能量低于 1 eV。

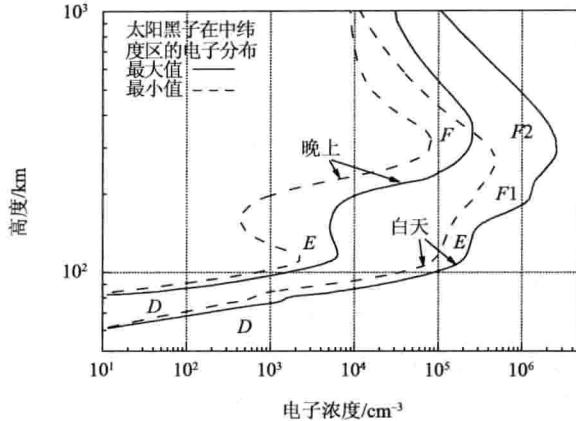


图 P. 5 电离层的电子密度  
(技术数据来源:参考文献[1])

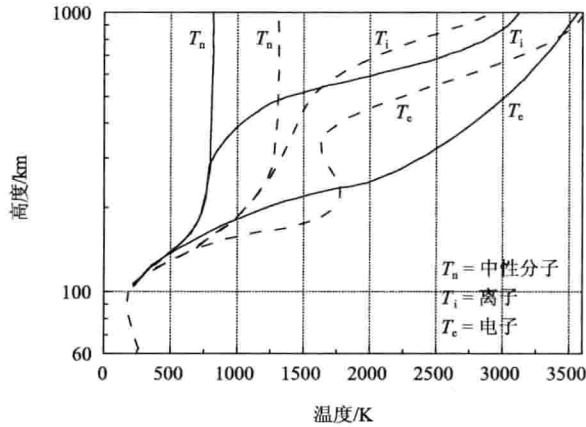


图 P. 6 白天电离层电子温度  
实线为太阳最弱时,虚线为太阳最强时(技术数据来源:参考文献[1])

## P. 6 极 光 区

极光常出现在纬度  $65^\circ \sim 75^\circ$ , 高度  $80 \sim 1000 \text{ km}$  的区域。最明亮的极光通常出现在  $100 \sim 130 \text{ km}$  处。之所以出现极光,是因为高能电子碰撞大气分子,产生各种颜色(波长)的发射谱线。电子呈束状沿磁场线盘旋而下,典型的电子能量为



几 keV(图 P. 7)。简单的电子加速过程如下。

在磁尾中某处发生重联后,出现磁尾回弹<sup>[2]</sup>。磁尾回弹压缩处于背日侧磁层闭合磁场线磁瓶中的电子。这种压缩将电子加速到更高能量。在极光纬度上,有些电子沿着磁场线向地球运动。当它们靠近极光高度时,磁场线逐渐汇聚。根据其能量、螺旋角和质量,部分电子和离子在不同高度折返回去。在那里,存在着平行于磁场线的强电场(几十  $\text{mV} \cdot \text{m}^{-1}$ ),电场进一步向地球加速电子。随着电子盘旋向下,大气密度增加。电子碰撞大气分子,造成分子激发或电离,这样就形成了极光。

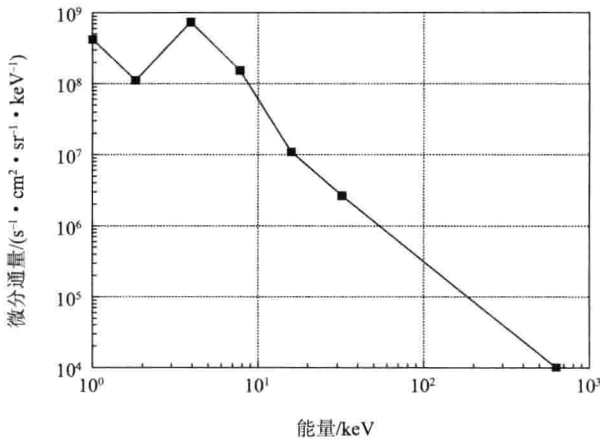


图 P. 7 测得的极光电子能谱

典型峰值能量为几 keV(参见 [http://csrsrv1.fynu.ucl.ac.be/csr\\_web/cpd/tna/node26.html#\\_aurospec](http://csrsrv1.fynu.ucl.ac.be/csr_web/cpd/tna/node26.html#_aurospec).)

## P. 7 辐射带

辐射带也称为范·艾伦带或范·艾伦辐射带<sup>[8-10]</sup>。这里,辐射指的是高能(MeV 或更高)电子和离子。有两个电子带和一个质子带(图 P. 8)。闭合磁场线将电子和质子限制在辐射带中,在存在电磁波的情况下,电子和质子做来回穿梭运动。有时,如果太阳喷出物压缩磁层的前端,磁瓶中的电子和离子可能被激发到更高能量状态。

内层辐射带起始于大约 1000 km,结束于大约  $2.5R_E$  处。外层辐射带起始于大约  $2.8R_E$ ,终止于  $6.6R_E$ 。辐射带边界,尤其是外层辐射带的边界,在太阳活跃期会扩展。当发生异常活跃事件时,在内外层辐射带间的“狭槽”中可能出现第三个辐射带。

在靠近巴西南部的大西洋区域,磁场强度稍弱些,辐射带的高度下跌到大约