

高空高能电子

林进福

(上海工程技术大学)

摘要

本文介绍了苏联高空高能正、负电子研究进展。宇宙站的测量表明,巴西磁场异常带的正、负电子流强度比地球赤道区高出约 10 倍,高能正、负电子是地球辐射带的重要成分。接近宇宙空间的高能正、负电子源的形成机制可能分为两个过程:首先是高能质子同剩余大气的构成物相互作用而产生 π^+ 介子, π^+ 介子衰变而产生正、负电子,然后是不同类型的次级粒子的加速过程。在轨道宇宙对接体上的实验结果支持了高能正、负电子源形成机制的假设。

一、高空高能电子发现的简史

为了配合人类的宇宙航行活动,需要研究磁暴,探索太阳黑子活动规律,开展宇宙线成分的研究。1967—1969 年间,苏联莫斯科工程物理学院和莫斯科大学在 35km 高空的气球上安装了附有火花放电室的闪烁切伦科夫望远镜,对能量大于 100MeV 的正负电子流进行了 20 次测量,发现在固定的高度测得的正、负电子流数值不是一个常数,而是和地磁状态有关。在地磁暴开始后,正、负电子流强度随时间的流逝而减弱。在这个高度上测得的高能正、负电子流强度可达 $500\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,测得的次级正、负电子流强度小于 $100\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ^[1]。该现象可解释为,高能正、负电子流是从地球辐射带涌出的。

1972 年,莫斯科工程物理学院研究了在地磁暴时从地球辐射带涌现的补充正、负电子流的电荷成分。利用由切伦科夫计数器、闪烁计数器、宽缝火花放电室和簇射火花放电室组成的望远镜进行测量^[2],并用磁铁片作为分离正、负电子的器件。在磁暴时,记录到能量大于 100MeV 的正、负电子流,其强度约为 $300\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ^[3],电荷比 N_{e-}/N_{e+} 的变化范围为 0.91—3。在涌现的正、负电子流中,电子成分

约占 80—100%^[4]。

为了解释在地球辐射带中正、负电子流的存在,Гальпер 等人研究了产生电子的机制^[6]。他们认为,假如次级电子产生在巴西磁场异常区域,且次级电子产生时的俯角近似于 90° ,则在大于或等于 100km 的高空,由于原级宇宙线和剩余大气之间相互作用而产生次级电子,并在地球辐射带中被吸收。我们认为,粒子和等离子体振动的感应切伦科夫相互作用是电子加速的机制,作用的结果是电子被加速到几百 MeV。

在高空气球上进行的测量,无法肯定在地球辐射带中是否存在足够多的高能正、负电子。所以必须在地球辐射带内进行直接测量。1979 年,他们在礼砲 6-联盟-进步号轨道对接体的船舷上安装“Елена-Ф”望远镜,进行了第一次有目的的测量。该望远镜由一个气体切伦科夫计数器和用铅隔开的六个闪烁计数器组成,如图 1 所示^[7]。利用质子和仪器中的物质的相互作用,可以把正、负电子从质子的本底中分离出来。

在宇宙站的固定方位上,飞行高度为 350 km 时,在巴西磁场异常区域的上面,记录到被磁场俘获的俯角 $\sim 90^\circ$ 的正、负电子。测量结果表明,在地球辐射带 350km 高度处,测得的正、负电子强度要比辐射带附近的正、负电子流强

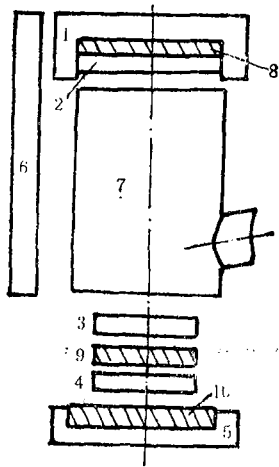


图1 “Елена-Φ”望远镜
1—6 为闪烁计数器；7 为切伦科夫计数器；
8—10 为铅块

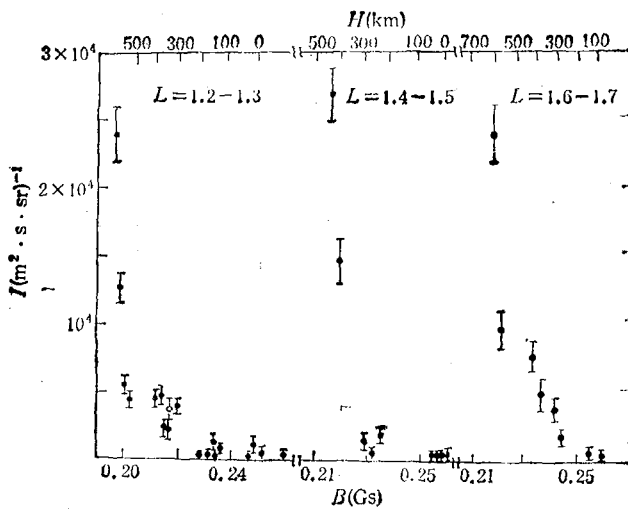


图2 正、负电子流强度和地磁场、磁壳层的关系
(○ 为 1987 年发表数据^[19])

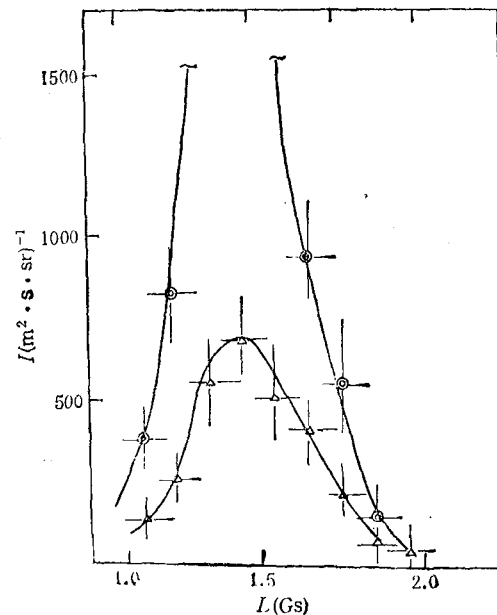


图3 正、负电子流强度和磁壳层的关系
(○ 为 500km, △ 为 350km, ● 为 400km, ▲ 为 300km)

度高 10—20 倍，其数值为 $1000-7000 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1[8]}$ 。

1981 年，他们采用和“Елена-Φ”结构相似的仪器，在地球辐射带内研究高能正、负电子流^[9]。仪器的光强为 $0.6 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$ ，最小阈能约为

20MeV。仪器在 850 km 高空的圆形轨道上记录到具有俯角近似等于 90° 的粒子。通过对实验结果的分析，得到在地球辐射带中的高能俘获正、负电子的空间分布和角分布特征。图 2 表示具有能量为 20—350 MeV、俯角约为 90° 的正、负电子流强度和地磁场、磁壳层的关系。

从图 2 可知，高度小于或等于 200km 时，实际强度在 $200 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的水平上。从 200km 高度开始，随着高度的增加，其强度将增大到 $4 \times 10^4 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。这时正、负电子经常被磁区所俘获，它们的俯角分布具有最小值，其半高度的半宽度约为 $10^\circ[10]$ 。以测得的数据为基础，在巴西异常区的不同高度处，可以得到俯角为 90° 、能量为 20—350MeV 的最大正、负电子流强度 I 和磁壳层的关系(如图 3 所示)。

在实验中记录到正、负电子的同时，还记录到能量大于 100MeV 的质子。测量结果表明，在能量 30—500MeV 范围内，质子成分在质子电子流中只占约 10%^[11]。总之，宇宙站上的实验证明，能量大于几十 MeV 的正、负电子是地

球辐射带的重要成分^[12]。莫斯科大学的科研工作^[13,14]支持了在地球辐射带存在高能正、负电子的观点,同时表明正、负电子的飞行径迹消失在800—900km的高空。

二、高空高能电子研究的进展

显然,在辐射带发现高能正、负电子具有重要的物理意义。在辐射带没有发现高能正、负电子流之前,大家普遍认为辐射带内正、负电子流的形成机制是(从地球大气层)反照中子的衰变。但是,在反照中子衰变情况下产生的电子最高能量不大于几十 MeV^[15]。所以,在接近宇宙空间中产生电子的传统观点和记录到高能正、负电子流的实验事实相矛盾。因此,必须寻找产生正、负电子的新机制。

产生正、负电子的新机制可能分为如下过程:首先是在接近宇宙空间的高能质子间剩余大气的构成物相互作用而产生 π^\pm 介子,然后是由 π^\pm 介子衰变而产生正、负电子,最后是由不同类型的次级粒子的加速过程。在文献[16, 17]中指出,高能正、负电子源的形成机制是以地球辐射带的质子和剩余大气构成物的相互作用为基础。所以在俘获的辐射成分中,期望高能质子流占优势(相对于电子流来说),而在加速过程中,则希望电子流占优势。因此,单独测量正、负电子流和研究地球辐射带内的电荷比,将有助于查明产生正、负电子的机制。

1985—1986年间,为了测量电荷比,人们在轨道宇宙联接体“礼砲-7”—“联盟 T-13”—“宇宙 1669”上安装了实验装置“Мария”^[18,19],并用该装置研究了确定粒子电荷符号的经典方法^[20],即利用磁场中粒子发生偏转的特性,采用时间飞行法,就可以在质子流本底中分离出正、负电子。利用年累积测量系统,可以测量粒子在磁场中的偏转角。“Мария”实验装置是一个磁闪烁谱仪,谱仪的示意图见图4。带电粒子经过闪烁计数器 C_1, C_2 ,然后到达磁系统M,粒子经磁场偏转 φ 角后被闪烁计数器 C_3 记录。按粒子偏转角 φ 的数值来确定粒子能量,利用

粒子偏转角 φ 的符号来判别粒子带电的正、负。将闪烁计数器 C_1, C_2, C_3 均分割成2cm宽的独立长条形体,每个长条形体当作一个光电倍

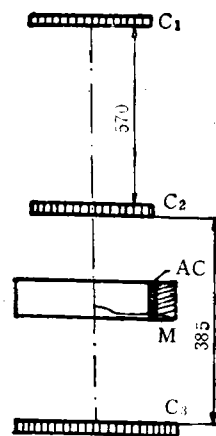


图4 磁闪烁谱仪示意图

增管。这样,测量粒子的磁偏转角的精度约 2° 。分离出所需要的事件要经过两个过程:第一,沿直线方向经过仪器的相对论粒子($\beta \geq 0.53$)的快速逻辑选择;第二,在闪烁计数器 C_1, C_2, C_3 中进行粒子的坐标分析和在磁场中偏转角大于 4° 的事件的分离。

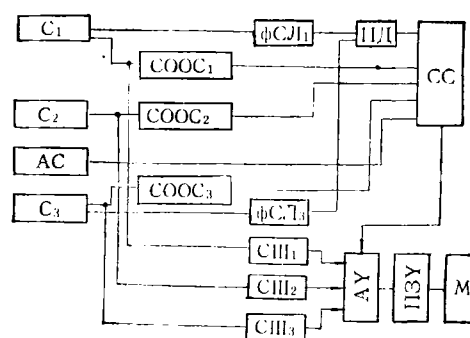


图5 谱仪的逻辑电子线路

图5是谱仪的逻辑电子线路。光电倍增管信号经过形成甄别器到达同一事件选择线路的进口处(COOC),同一时间的信号从 C_1, C_3 的光电倍增管经过带有跟踪窗口的成形器(ФСП)到达甄别器(ПД)。对于广义相对论粒子,甄

别器的效率大于 95%，对于反向粒子，甄别器的效率低于 0.5%。线路 COOC_{1,2,3} 和甄别器的信号进入符合线路 (CC)。然后，符合线路的脉冲输入到算术装置 (AV)。算术装置按闪烁计数器分割的长条形体的次序计算出粒子在磁场中偏转角的大小和偏转角的符号。最后，将多道分析器的计数率转换到过渡的记忆装置 (ПЗУ)，并通过遥测部分引到外部记忆装置。ПЗУ 的记忆容量为记录 42 个事件。当事件记满时，利用磁性记录仪贮存和转换信号。当信号引进输出控制台时，可以看到计算结果。

在电子计算机上，采用蒙特-卡罗方法计算谱的特征。在苏联物理研究所的回旋加速器上，利用单能正负电子束进行谱的模拟，模拟结果和计算得到的谱特征相符^[20]。

磁谱仪安装在轨道宇宙对接体的船舷上。在巴西地磁异常区测量时，记录到被磁场俘获的地球辐射带的粒子。通过遥测系统将信息传递到地球。经计算机分析计算，把地磁赤道区和巴西异常带的正、负电子流强度列在表 1 中^[18,19]。

表 1

正、负电子流强度 ($m^2 \cdot s \cdot sr$) ⁻¹	地磁赤道区	巴西异常带
$I_{e+} + I_{e-}$	110 ± 30	1100 ± 160
I_{e+}	86 ± 23	250 ± 80
I_{e-}	24 ± 10	860 ± 140

实验结果表明，巴西异常带的正、负电子流之和的强度绝对值 $I_{e+} + I_{e-} = 1100 \pm 160$ ($m^2 \cdot s \cdot sr$)⁻¹，这个绝对值和“Елена-Ф”实验结果相符。巴西异常带的正、负电子流强度比地磁赤道区高出大约 10 倍。这个结论支持了在地球辐射带内存在着较强的正、负电子流的假设。地球辐射带内具有能量为 30—150MeV

的正、负电子流强度比为 $I_{e+}:I_{e-} = 1:3.4$ 。地球辐射带的电子流强度 (I_{e-}) 比地球辐射带外面的电子流强度要高 13.2 ± 2.3 倍。实验结果表明，在正、负电子流中，电子占优势。这个结论支持了电子加速机制的假设，从而使轨道宇宙对接体上的实验结果验证了有关接近宇宙空间的高能正、负电子形成机制的新理论。

- [1] А. М. Гальпер, Б. И. Лучков, Тр. IV Всес. Зимней школы по Космофизике. Изд. Кольского Филиала АН СССР, (1969), 132.
- [2] А. М. Гальпер и др., Изв. АН СССР, сер. физ., 34(1970), 2275.
- [3] С. А. Воронов и др., Сб. Элементарные Частицы и Космические Лучи, М: Атомиздат, (1976), 11.
- [4] С. А. Воронов и др., Изв. АН СССР, сер. физ., 38(1974)1976.
- [5] С. А. Воронов и др., Краткие Сообщения по Физике, 4(1975), 31.
- [6] А. М. Гальпер и др., Международного семинара по проблеме «Ускорение частиц в космическом пространстве», М: НИИЯФ МГУ, (1972), 282.
- [7] А. М. Гальпер и др., Изв. АН СССР, сер. физ., 45(1981), 637.
- [8] А. М. Гальпер и др., Космические исследования, 19(1981), 645.
- [9] А. М. Гальпер и др., Космические Исследования, 21(1983), 707.
- [10] А. М. Гальпер и др., Геомагнетизм и Аэронавигация, 22(1983), 849.
- [11] А. М. Гальпер и др., Космические исследования, 21(1983), 651.
- [12] А. М. Гальпер и др., Письма в ЖЭТФ, 38(1983) 409.
- [13] Р. Н. Баилова, А. А. Гусев, Геомагнетизм и Аэронавигация, 22(1982), 671.
- [14] К. Н. Шаврина, Геомагнетизм и Аэронавигация, 22(1982), 361.
- [15] В. Хесс, Радиационный Пояс и Магнитосфера, М: Атомиздат, (1972).
- [16] А. А. Гусев, Г. И. Пугачева, Геомагнетизм и Аэронавигация, 23(1982), 912.
- [17] Н. Л. Григоров, Геомагнетизм и Аэронавигация, 24(1984), 305.
- [18] V. G. Kirillov-Ugryumov et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A248 (1986), 238.
- [19] С. А. Воронов, А. М. Гальпер и др., Геомагнетизм и Аэронавигация, 3(1987), 492.
- [20] С. А. Воронов и др., ПТЭ, 2(1986), 35.