第13卷 第1期 空间科学学报 Vol. 13, No. 1
1993年 1 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan., 1993

“风云一号”(B)星对内辐射带质子的观测结果

陈贵福 叶宗海 朱光武 沈思忠 梁金宝 黄红锦
(中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100080)

摘 要

本文介绍“风云一号”(B)星上的“宇宙线成份监测器”于1990年11月19至24日对内辐射带质子的观测结果. 通过对这些结果的分析,本文获得了4—23 MeV 能量范围内辐射带质子垂直强度在磁坐标内的分布特征. 同时,本文还给出了100° E 子午面内质子垂直强度的分布. 分析表明,所得结果与辐射带理论一致.

关键词 辐射带,质子,能量粒子

一、引 言

辐射带粒子是近地空间环境的重要组成部份. 较高能量的辐射带粒子, 对长期飞行于近地空间的卫星及其元器件都可能产生严重的影响. 因此, 对辐射带环境进行经常的观测和研究成为空间科学的基础性工作. “风云一号”(B)星上的“宇宙线成份监测器”的目的之一就是对内辐射带的粒子环境进行探测. 有关仪器的原理请参阅文献[1].

“风云一号”(B)是一颗太阳同步轨道卫星, 其轨道倾角为99°, 偏心率 $e < 0.005$, 轨道周期约为103 min, 轨道高度约为900 km. 由图1可见, 只有在310° E附近,即所

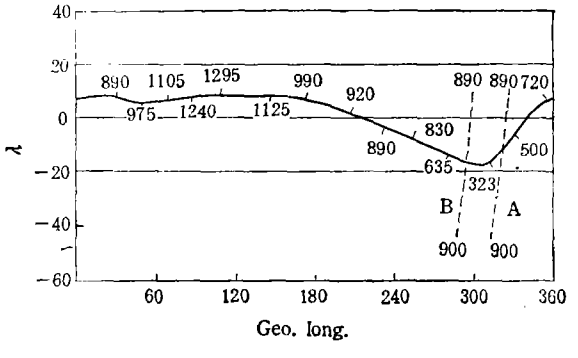


图1 积分不变量赤道及资料点的轨道段分布

Fig. 1 The distribution of drift shell equator and sections of the satellite orbit for obtaining data

本文于1991年10月17日收到.

谓的南大西洋异常区，赤道附近的辐射带底部高度才降到 900 km 以下[2]。因而在这部份区域，卫星才能探测到辐射带粒子。"风云一号"（B）星获取辐射带资料的轨道弧段如图 1 中的虚线所示，虚线两端的数字表示高度（km）。A 段轨道的星下点从（36°W，10°N）到约（48°W，45°S）；B 段轨道的星下点从（62°W，10°N）一直到（76°W，45°S）。"风云一号"（B）星利用这两段轨道对辐射带的粒子环境进行了长达三个多月的测量。除测得太阳和地磁平静时辐射带质子强度外，还探测到太阳质子事件对辐射带质子强度的影响；同时还探测到内辐射带 4—23 MeV 能量的重粒子（主要有 C、N、O 和 Fe 等）的存在。本文仅分析日地平静时辐射带质子的强度结构。

二、结 果 分 析

1. 强度随位置的变化——定性分析

"风云一号"（B）星上的"宇宙线成份监测器"是一种半导体带电粒子探测器，可以探测 H、He、C、N、O 和 Fe 共六种粒子成份。探测的能量范围为 4—23 MeV/n，仪器接收锥全张角为 60°，几何因子为 0.255 cm² · Sr。数据的采样周期为 3.277s。由于仪器只有一个能道，所以获取的基本信息是接收角内粒子的平均方向强度。

本文意在考查稳定辐射带质子的强度结构，因而在选取资料时避开了明显的太阳及地磁活动，选取 1990 年 11 月 19至 24 日的资料进行分析。辐射带质子分布的长期变化是极其缓慢的[3]，因而在这么短的几天时间内，完全可以忽略其时间变化。基于这一原因，下面首先给出这期间在图 1 所示的两段轨道上获取的质子平均方向强度随探测时间的变化，如图 2 所示。因每一个时刻对应一个卫星位置，所以图 2 实质上表示质子的平均方向强度随空间位置的变化。为分析方便，表 1 列出了间隔为两分钟的一系列时刻所对应的测点的地理坐标及测点处的磁场强度 B 和磁壳参量 L 值。

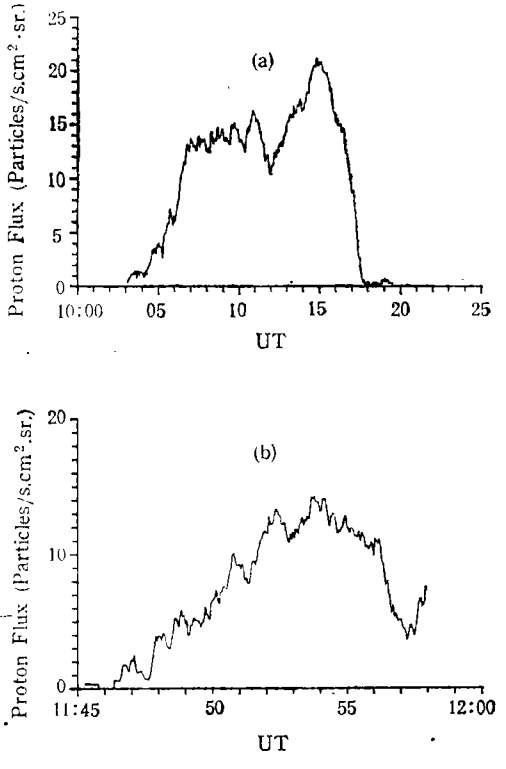


图 2　沿 A、B 两段轨道质子强度随时间的变化

Fig. 2　Proton directional flux versus UT

联系表 1 对图 2 进行分析，可以得出以下几点结论：

1）在两段轨道上，质子强度随位置的变化都是先由小到大，达最大值后又由大变小。这反映了卫星穿越磁异常区辐射带的情形。

表 1 测点的坐标

UT	1004	1006	1008	1010	1012	1014
R	7273	7275	7276	7278	7279	7280
Lon.	−38.6	−40.2	−41.9	−43.6	−45.6	−47.7
Lat.	−4.6	−11.4	−18.2	−25.0	−32.0	−38.9
B	0.190	0.180	0.173	0.171	0.173	0.181
L	1.173	1.200	1.275	1.386	1.524	1.680

2) 沿A段轨道，卫星于约 10^h03^m UT 进入辐射带，此时卫星位于（1°S，37.8°W）处，因而在该位置辐射带底部高度降到 900 km；在 10^h18^m UT，卫星于（52.5°S，56.5°W）处穿出辐射带，故在此处辐射带底部高度又回升到 900 km．沿B段轨道，辐射带底部高度在（5°S，64°W）处降到 900 km，一直到（43°S，75°W）处，质子强度也未回复到零，因而辐射带底部高度仍在 900 km 以下．

3) 沿A段轨道，从 10^h03^m UT 到 10^h07^m UT，测点处的 L 逐渐增大，B 则逐渐减小．在辐射带中心以下的区域，L 的增大及 B 的减小都将导致质子强度的增加，因而在 10^h07^m UT 以前质子强度上升较快．从 10^h07^m 到 10^h12^m UT，虽然测点的 L 值仍在增大，但 B 却变化很小，因此，在这一区段上质子强度的增加将变缓，图 2 所示的探测结果也确是如此．从 10^h12^m 到 10^h15^m UT，测点的 L 及 B 都增大．尽管质子强度随 B 的增大而减小，但这一区段的 L 已接近内辐射带中心处的 L 值，在该处质子强度随 L 的增大而迅速增加，故图 2 中的这一段曲线再度很快上升．10^h15^m UT 以后，测点处的 L 及 B 继续增大，但因此时测点的 L 大于 1.76，这些点位于内辐射带中心处的磁壳以外，此处的质子强度不仅随 B 的增大而减小，也随 L 的增大而减小，图 2(a) 中 10^h15^m UT 以后质子强度的迅速下降，正是内辐射带中心以外区域测点的 L 与 B 共同增加的结果．仔细分析图 2(b) 同样会发现，B 段轨道上质子强度的变化也是受测点的 L 与 B 的变化所共同决定的．

4) 以上定性分析表明，探测结果与地磁辐射带理论所预言的质子强度随空间位置的变化规律是一致的，而且分析表明，4—23 MeV 的辐射带质子的中心约在 $L = 1.76$ 的磁漂移壳附近．

2. 质子垂直强度在磁坐标（L，B）内的分布

为了便于应用所得资料，需要找出质子的全向强度或垂直强度在 L-B 坐标中的分布．由于客观条件的限制，很难从观测资料确定质子的局地投掷角分布．因此，本文根据经验假定质子的投掷角分布具有 $\sin^2\alpha$ 的形式[4]，由此将探测器张角内的平均方向强度换算成垂直强度，并进而研究质子垂直强度在磁坐标内的分布特征．为此，利用卫星的轨道根数，首先确定 T 时刻测点的地理坐标，然后根据选定的磁场模型计算该位置的磁坐标（L，B），最后计算磁场与探测器主轴的夹角并将该处的平均方向强度转换成垂直强度．计算中采用的地磁模型为 1985 年的国际参考地磁场，并将地磁场修正到了 1990 年．L 值是采用 Mcllwain 的方法计算的[5]．

下面研究在一些具体的漂移壳内质子垂直强度随磁场强度 B 的变化．为此首先将资

随时间的变化

1016	1148	1150	1152	1154	1156	1158
7281	7274	7276	7277	7278	7279	7280
−50.2	−65.2	−67.0	−68.6	−70.5	−72.5	−74.8
−45.6	−8.6	−16.2	−22.6	−29.6	−36.5	−43.1
0.197	0.180	0.172	0.172	0.179	0.192	0.210
1.854	1.204	1.208	1.2136	1.299	1.403	1.560

料点按 L 值的大小划分为不同的组，即将 L 值在 $L-\frac{\Delta L}{2}$ 到 $L+\frac{\Delta L}{2}$ 间的那些资料点划到以 L 为代表的组，这样，对于每一个 L 值组(相应于一个漂移壳)，就可得若干对 (J_i, B_i) 值，表征在 L 值所对应的磁壳内，质子垂直强度 J 随磁场强度 B 的变化。在对资料点进行分组时，ΔL 既不能选得过大，也不能选得过小。若 ΔL 选得过小，则落到该组的资料点就会很少，从而可能反映不出真实的物理规律；反之，若 ΔL 选得过大，则可能会将本来属于明显不同磁壳的资料点统计到相同的漂移壳内。鉴于以上两方面的限制，本文在对资料点的 L 值分组时，所遵循的原则是：

$$\Delta L/2 \approx D_e$$

此处 D_e 为质子在该磁壳的磁赤道处的迴旋直径。由此，本文对资料点的 L 值分组如表 2 所示。

表 2　L 壳层的划分及拟合系数

L 值区间	特定 L 值	最小磁场 $B_{min}(\times10^{-4}T)$	最大磁场 $B_{max}(\times10^{-4}T)$	A_1	$A_2(\times10^{-4}T)$
1.17—1.20	1.19	0.179	0.195	−17.5418	3.3596
1.20—1.22	1.21	0.171	0.186	−2.5695	0.6253
1.22—1.24	1.23	0.171	0.191	−6.7611	1.3749
1.24—1.26	1.25	0.172	0.175	−2.9130	0.7159
1.26—1.29	1.28	0.171	0.179	−2.1503	0.5854
1.29—1.32	1.31	0.170	0.183	−1.0676	0.4020
1.32—1.35	1.34	0.170	0.187	−0.2094	0.2523
1.35—1.38	1.37	0.170	0.190	−0.2839	0.2662
1.38—1.42	1.40	0.170	0.196	0.2827	0.1024
1.42—1.46	1.44	0.170	0.199	−1.3536	0.4478
1.46—1.50	1.48	0.171	0.204	−0.8331	0.3535
1.50—1.54	1.52	0.172	0.210	−0.9705	0.3693
1.54—1.60	1.57	0.173	0.212	−0.2987	0.2642
1.60—1.66	1.63	0.176	0.181	3.8815	−0.4694
1.66—1.73	1.70	0.180	0.187	1.5877	−0.0548
1.73—1.80	1.77	0.185	0.194	−0.3933	0.3298
1.80—1.87	1.84	0.191	0.201	−0.4038	0.3239
1.87—1.94	1.91	0.197	0.208	−0.4308	0.3294
1.94—2.01	1.98	0.205	0.214	−0.4734	0.3249
2.01—2.27	2.14	0.216	0.236	−1.8211	0.4189

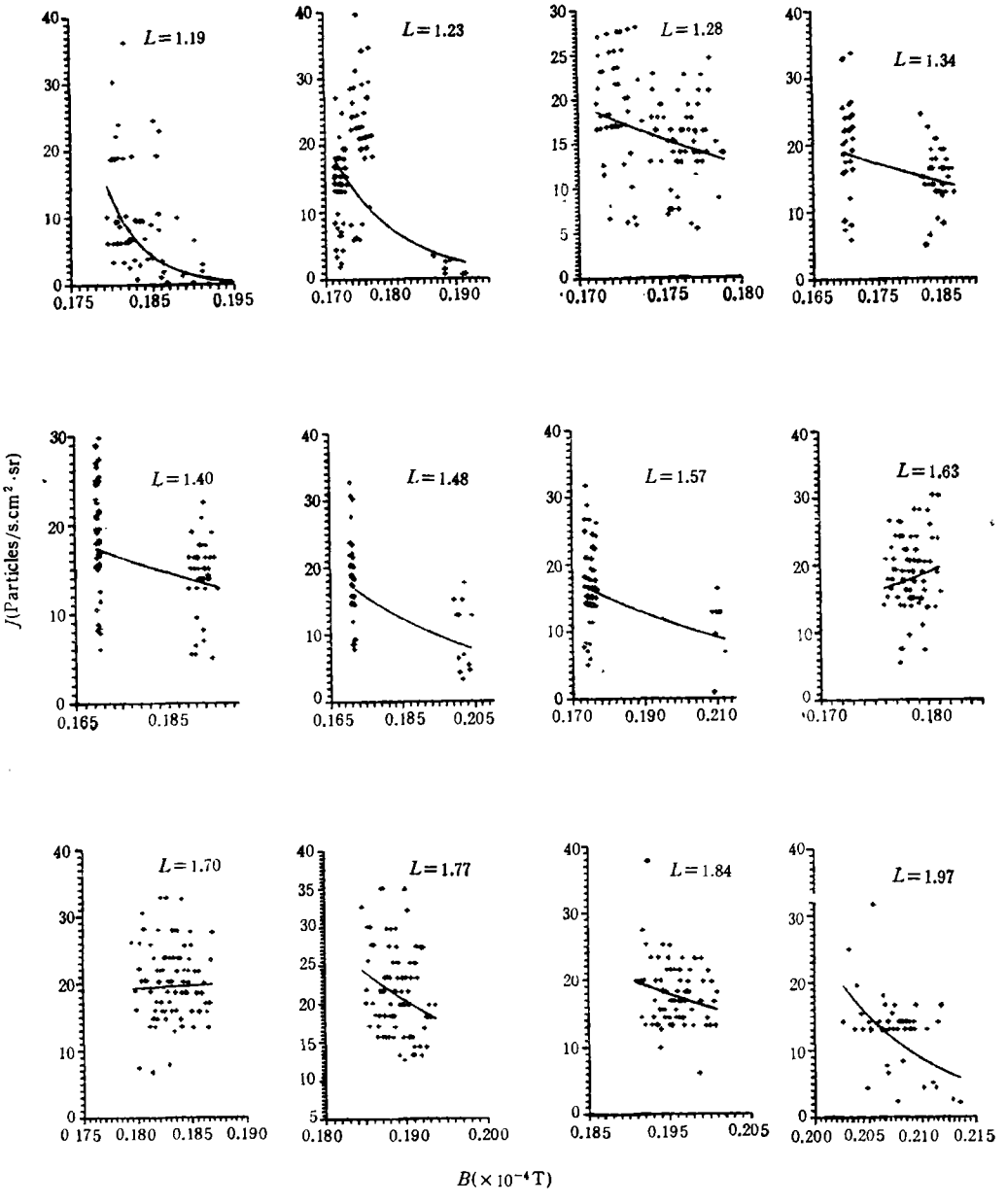


图 3 各磁壳内质子垂直强度随磁场的变化

Fig. 3 Proton perpendicular flux J versus geomagnetic field B on various L drift shells

划分好各组的 L 值之后，将各组的资料点组织到 J-B 坐标中，如图 3 所示。根据图中 J 随 B 的变化关系，用最小二乘法将 J 随 B 的变化拟合成如下形式：

$$\lg J = A_1 + A_2/B.$$

各组的拟合系数 A_1 及 A_2 亦列于表 2 中。图 3 中的实线即为 J-B 的最佳拟合曲线，代表 L 磁壳内质子垂直强度 J 随磁场强度 B 的变化。

由图 3 可见，在除 $L=1.63$ 及 $L=1.70$ 以外所有漂移壳上，质子垂直强度 J 随 B 的变化都是单调下降的，这正是辐射带质子的分布特征．在 $L=1.63$ 及 $L=1.70$ 的两个壳上，J 随 B 的增大而呈增大的趋势，这主要是资料点的空间分布不利所致．落到这两个壳内的点都来源于 A 段轨道，且其空间位置又相隔很近．当测点沿轨道向高纬移动时，测点的磁场强度及漂移壳参数 L 都在增大．若 L 的增大所引起的测点处质子强度的增大超过了因磁场强度的增强而导致的测点处质子强度的减小，则在这些磁壳上就会出现测点的质子强度随磁场强度的增强而增大的情况．图 3 中 $L=1.63$ 及 $L=1.70$ 的两个壳层正好反映了这样的情形．

3. 质子垂直强度在子午面的分布

利用质子强度在 L-B 空间的分布以及从 L-B 空间到地理空间的反演，可以获得任何一个子午面内的质子强度分布，其步骤为：1）选定所需子午面．本文选取 100° E 子午面作为我国上空正磁异常区子午面的代表；2）利用上一节所选定的磁场模型，计算该子午面内各点的磁坐标（L,B）；3）利用公式（1）计算空间各点的质子垂直强度；4）将强度值相等的点连接起来，便得所求子午面内的强度等值线分布．图 4 即是这样得到的 100° E 子午面内质子垂直强度的等值线分布．

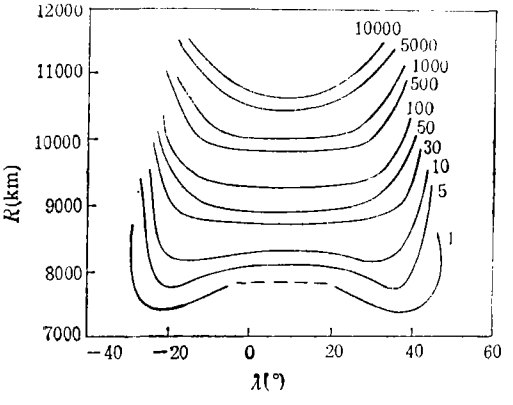


图 4　质子垂直强度在 100 °E 子午面内的等值线图

Fig. 4　Isogram of proton perpendicular flux in 100°E meridian plane

分析图 4 可以发现，质子垂直强度在 100° E 子午面内的分布具有以下几个特征：1）等值线大致关于 10° N 对称，这是地磁场的对称性决定的；2）辐射带的底部高度在磁赤道处约为 1400 km，在高纬则降到 1000 km，在此高度以下，质子垂直强度小于 $1/(cm^2 \cdot S \cdot Sr)$；3）辐射带质子的分布被限制在从约 30° S 到 50° N 的范围．

三、讨　论

通过以上对"风云一号"（B）星上的"宇宙线成份监测器"探测资料的分析，有如下几点主要结论：

1）质子垂直强度随空间位置的变化受空间点的磁坐标（L,B）控制，其变化趋势与辐射带质子的空间分布规律一致．

2）4—23 MeV 的辐射带质子的中心在 $L=1.76$ 的磁壳附近．国外的探测结果表明，40—110 MeV 质子的中心约在 $L=1.5$ 处[8]．由于辐射带质子最大强度处的 L 值随质子能量的减小而增大[9]，因而本文推断的 4—23 MeV 质子中心处的 L 值比 1.5 稍大也是合理的．

3）在几乎所有 $L<2.0$ 的磁壳内，质子强度都随 B 的增大而单调下降，这正是辐射

带质子的空间分布特征. 同时，本文给出了每一壳上质子垂直强度随磁场强度 B 的变化关系.

4) 辐射带底部高度在负磁异常区低于 900 km，而在 100° E 子午面内上升到 1400 km. 这一高度与从前的观测结果也基本相符[10].

由于资料点的分布不太理想，由这些测点来推断远离测点处的质子强度可能有一定的误差. 但由于本文的资料点是在辐射带下边界附近获得的，因而这些资料对于推断辐射带下边界的位置具有较重要的参考价值.

参 考 文 献

[1] 朱光武等，宇航学报，第 2 期，第 69 页，1981.
[2] 阮忠家和李再琨译，人造卫星环境手册，科学出版社，第 28 页，1973.
[3] 涂传诒等，日地空间物理学，下册，第 123 页，科学出版社，1988.
[4] Valot, P. and J. Engelmann, Space Research XIII, p. 675, 1973.
[5] Roederer, J. G., Dynamics of Geomagnetically Trapped Radiation, Springer-Verlag, p.96, 1970.
[6] McIlwain, C. E., *J. Geophys. Res.*, Vol.66, p.3681, 1961.
[7] 涂传诒等，日地空间物理学，下册，第 122 页，科学出版社，1988.
[8] 人造地球卫星环境手册编写组，人造地球卫星环境手册，国防工业出版社，第 87 页，1971.

THE RECENT OBSERVATIONAL RESULTS OF THE GEOMAGNETICALLY TRAPPED PROTONS

Chen Gui-fu Ye Zong-hai Zhu Guang-wu Shen Si-zhong
Liang Jing-bao Huang Hong-jing

(*Center for Space Science and Applied Research, Academia Sinica, Beijing* 100080)

Abstract

The cosmic ray composition monitor on the board the Chinese Satellite, Fengyun-1(B), launched in September 1990, had detected the geomagnetically trapped particles (mainly protons, α particles, ions of Carbon, Nitrogen, Oxygen and Iron) for as long as more than 100 days. Both stationary and solar proton perturbed fluxes of the geomagnetically trapped protons have been recorded. This paper reports the results of 4—23 MeV protons obtained from 19th to 24th November 1990, a relatively quiet period of the geomagnetic field. The perpendicular flux distribution of the protos in the L-B space are obtained and studied. This paper also presents the perpendicular flux distributions of protons on a particular geographical meridian plane (100° E). The results are agreeable with the Radiation Belt theory.

Key words Radiation Belt, Protons, Energetic particles