

地球外太空的奥秘:一个巨大的动力辐射区域

陈嘉胜¹, 吕凌霄²

1. 波士顿大学太空物理中心, 美国马萨诸塞州波士顿 02215
2. 国立中央大学太空科学研究所, 中国台湾桃园中坜 32001

摘要 2010年,作者在地球外太空发现一个以磁口(cusp)为中心的巨大的动力辐射区域。这个新辐射区域纵深可达10.5Re;在7—8Re高度上,其尺度在纬线和经线方向上可分别达到6Re和>10Re;当人造卫星穿越该区域时,测得的电磁涨落强度与高能带电粒子强度都有数量级的增加。本文对此进行了综述分析,认为这是太空时代最关键和最重大的发现之一,如同1958年Van Allen等发现以地球磁赤道为中心的辐射带一样重要。作者证明新辐射区域为Van Allen外辐射带提供了直接的高能带电粒子源。

关键词 磁层;磁口;磁洞;高能粒子;电磁涨落;辐射

中图分类号 P353.4

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.33.011

The Secret in Geospace: A Broad and Dynamic Region of Radiation

CHEN Jiasheng¹, LYU Ling-Hsiao²

1. Center for Space Physics, Boston University, Boston, MA 02215, USA
2. Institute of Space Science, National Central University, Zhongli City, Taoyuan County, Taiwan 32001, China

Abstract The Earth's magnetospheric cusp is a key region for transferring the solar wind energy, mass, and momentum into the Earth's magnetosphere. Recently, a broad and dynamic region of radiation in the geospace is discovered which is centered at the Earth's magnetospheric cusp. The size of the region is up to 10.5Re (Earth radii) in the depth, the size is 6Re in the latitudinal direction and is bigger than 10Re in the longitudinal direction at an altitude of 7—8Re. When spacecraft was crossing through the new region of radiation, it observed orders of magnitude enhancements for both electromagnetic fluctuations and energetic charged particle intensities. When solar wind charged particles access the cusp, the diamagnetic effect further tears wide and deep magneticholes in the magnetosphere and further transfer the solar wind energy into the electromagnetic fluctuation power. The strong electric field fluctuations could efficiently energize the cusp charged particles by cyclotron resonant acceleration, resulting in a broad and dynamic region of radiation centered at the cusp. The ion phase space densities in the region of radiation could be two orders of magnitude higher than that in the outer radiation belt at a given magnetic moment. The region of radiation is observed on both open and closed geomagnetic field lines. It could extend to low-latitude, overlapping with part of the outer radiation belt and providing a direct particle source for the outer radiation belt.

Keywords magnetosphere; cusp; magnetic hole; energetic particles; electromagnetic fluctuation; radiation

0 引言

地球磁口(cusp)是太阳风能量、质量和动量进入地球磁层的关键区域。最近,在地球外太空发现一个以磁口为中心的巨大的动力辐射区域。这个新辐射区域纵深可达10.5Re(地球半径);在7—8Re高度上,其尺度在纬线和经线方向上可分别达到6Re和>10Re;当人造卫星穿越该区域时,测得的

电磁涨落强度与高能带电粒子强度都有数量级增加^[1]。这是因为当磁口吞入太阳风带电粒子后,减磁效应进一步撕开磁层,形成大的磁洞,并将太阳风的能量转变成涨落电磁能。而后者又共振加速部分带电粒子到更高的能量,形成一个新的以磁口为中心的巨大的动力辐射区域。在给定的磁矩,离子在磁口的相空间密度可以比在磁赤道附近外辐射带的相空

收稿日期:2011-10-21;修回日期:2011-11-15

基金项目:NSC Grants(99-2111-M-008-004,100-2111-M-008-015)

作者简介:陈嘉胜,研究员,研究方向为太空物理学,电子信箱:jschen@bu.edu

间密度大 2 个数量级。新辐射区域既可占据开放磁场线区域亦可占据部分封闭磁场线区域,甚至抵达低纬度区域与部分外辐射带重叠,从而为 Van Allen 外辐射带^[2]提供了直接的高能带电粒子。

1 Van Allen 辐射带及其粒子来源

Van Allen 辐射带发现于 1958 年。它由内外辐射带组成。外辐射带位于地球磁赤道附近且离地心约 3.5—11Re, 内辐射带则离地心小于 2.4Re^[3]。内辐射带高能带电粒子来源于中子衰变,而这些中子则产生于宇宙射线与地球大气层的相互作用^[4]。然而,外辐射带高能带电粒子的起源则始终是一个谜题^[5]。虽然 50 多年来,许多国家特别是美国和俄罗斯均投入了大量的人力和资金,成百的太空科学家相继发表了上千篇科研论文,却还是无法说明这些外辐射带粒子来自何处,从而成为困扰太空科学界的一大谜团。2010 年,通过分析卫星的电磁场和粒子数据,陈嘉胜和吕凌霄证明了新辐射区域是为 Van Allen 外辐射带直接提供高能带电粒子的源^[1]。

2 磁口探测研究

地球实际上是块大磁铁,有南北两极;其磁场在大气层之上所形成的区域被称为地球磁层。地球磁层包含在地球的外太空中;其磁口则包括南磁口和北磁口。早期的理论模型认为,磁口是位于磁层南北两极磁场大小接近于零的 2 个点。从 20 世纪 30 年代开始,磁口就一直被认为是又窄又小的弱磁场区,位于开放磁场线(场线一端连着地球另一端连着行星际磁场)之内^[6]。因而,在磁口并不期望能够看到显著的高能粒子流量^[7]。目前,中国太空界仍然把 cusp 译成“磁极尖区”,体现的正是这种窄小场区的观念。

地球磁层会受到来自太阳的粒子流影响而变形。倘若将磁层向阳(白天)的部分称为磁头,将背阳(黑夜)的部分称为磁尾,那么由于太阳粒子流的压力,磁头将会变扁而磁尾将会变长,类似于彗星。连续不断来自太阳的粒子流称为太阳风。太阳风是完全电离的等离子体,由电子、质子及一些高电荷重离子(如 He²⁺和 O⁶⁺)组成。22 年间(1965—1987)平均的太阳风速是 445km/s^[8-10]。该风速对应的粒子动能大约是:质子,1000eV;电子,100eV。磁层的磁场有折射带电粒子的作用,磁场越强折射度越大。由于磁口的磁场较弱,在磁口测到太阳风粒子的机会和强度都会比在磁层的其他区域大一些。40 年前,太空科学家首次在磁口探测到太阳风粒子^[11-12]。此后,磁口就被认定是太阳风粒子简单沉积的地方,无局部加速。

1996 年 2 月 24 日,美国宇航局(NASA)发射了轨道为 1.8×9Re 的极轨卫星 POLAR。当 POLAR 卫星在飞越磁口时,观测到了 1MeV 的氦离子和 100keV 的相对论性电子^[13-15]。这些带电粒子的能量比典型的太阳风粒子能量高出 1000 余倍,确实令人吃惊。更让人意外的是,原本如此高速(高能)的带电粒子在开放磁场线区域的停留时间应当远小于 1s,而实际上 POLAR 卫星常常连续数小时在磁口观测到如此高速

(高能)的带电粒子。卫星的这些观测结果对传统的磁口结构观念是个颠覆性的挑战。这些粒子被称为“磁口高能粒子”(Cusp Energetic Particles, CEP)^[14]。陈嘉胜等进一步认为,磁口本身是一个新的加速区域^[14]。之后,CEP 的起源引起国际太空界整整 10 年的激烈争论。2011 年,太空科学先驱者 W. J. Heikkila 在《地球磁层》一书中总结 CEP 起源的争论时写道:“尽管关于 CEP 起源的争论已持续 10 年,这些 CEP 粒子如何获得能量还是仍然未知,直到陈嘉胜 2008 年揭开了秘密。”^[16]现在,我们终于明白了磁口涨落电场能够在数秒内将 1keV 的太阳风粒子回旋共振加速至 1MeV 的原理^[17]。

3 探测结果分析

上述观测现象可以从基本物理过程来理解。当太阳风带电粒子抵达磁口时,每个受周围磁场影响而做回旋运动的带电粒子(电子或离子)都会形成一局部环状电流;该环状电流产生的磁矩总是与周围磁场的磁矩方向相反,从而造成周围磁场的弱化,称为减磁效应。减磁效应能够将磁口及其附近的磁层撕开形成一个又大又深的磁洞,其尺度纵深可达 10.5Re, 7—8Re 高度上的尺度可达 6Re(纬线方向)和 >10Re(经线方向)。其中,观测的磁场呈现大幅涨落,可以从高于 260nT 迅速减弱到接近 0nT^[1]。这样,太阳风进入磁口的能量就通过减磁效应而大量的转化成涨落电磁能。作者的另一个重要贡献是:揭示了在单电离氧(O⁺)回旋频率处,磁场涨落功率谱密度在磁口比在地球磁赤道附近的 Van Allen 外辐射带可高出 5 个数量级^[1]。这些涨落磁场引发了涨落的感应电场;且后者的方向总是垂直于周围的磁场方向。卫星观测到的磁口涨落电场能量可以比磁尾的对流电场能量高出 6 个数量级^[17]。因为带电粒子的回旋频率与周围的磁场强度呈正比,所以当磁场强度涨落时,那些带电粒子的回旋频率与所处的电场变化频率相同时,就会经历完全的或部分的回旋共振。这样,涨落电磁能又部分地转化成带电粒子的动能。这就解释了 CEP 的起源和新辐射区的形成。

事实上,POLAR 卫星已在磁口观测到振幅在 -300—350mV/m 的强垂直电场,并且观测到周期与离子回旋周期相同的左手圆偏振磁口涨落电场^[17]。该涨落电场能够回旋共振加速磁口离子。由回旋共振加速的带电粒子的垂直动能的变化率可以解析地表达为^[17]

$$\frac{dK_{\perp}}{dt} = \left(\frac{2K_{\perp}(0)}{m} \right)^{1/2} qE + \frac{q^2 E^2 \tau}{m} \quad (1)$$

其中, $K_{\perp}(0)$ 为带电粒子在时间 $t=0$ 时的垂直动能, m 为粒子质量, q 为粒子电荷, E 为具有带电粒子回旋频率的左(右)手偏振垂直电场。

积分方程(1),由回旋共振加速一个回旋周期 T_i 的带电粒子所获得的能量为

$$\Delta K_{\perp} = \left(\frac{2K_{\perp}(0)}{m} \right)^{1/2} qET + \frac{q^2 E^2 T^2}{2m} \quad (2)$$

方程(2)的重要性在于:其等号右边所有的量都是可测的,

且独力于任何模型和模拟。方程(2)说明,带电粒子由回旋共振加速所获得的能量增加是一个其初始垂直动能、电荷/质量比、回旋周期和左(右)手偏振垂直电场的函数。以 He^{2+} 为例,假定其初始垂直动能为 2keV (太阳风),则通过 2s 的回旋周期,其由回旋共振加速所获得的能量增加将为 $101.4\text{keV}, 0.54\text{MeV}, 2.04\text{MeV}$, 分别对应于 $20, 50, 100\text{mV/m}$ 的垂直电场^[17]。

地球磁层内又大又深的磁洞,对目前的太空天气学研究是一个挑战,同时也将会对该研究产生很大的促进。本来从太阳或星系来的高能带电粒子经过地球磁层的屏蔽,被折射回外太空,不会直接射到人类身上。地球磁层起到保护人类的作用,而磁洞则会削弱这种保护。不久前,太空科学家 K. Kudela^[18]在其“论太空中的高能粒子”一文中提到2个令太空科学家费解的观测现象:(1) $1-100\text{MeV}$ 的太阳高能粒子穿进磁层到达所有现存磁场模型都不允许的低纬度处;(2) 在某些强磁暴期间,具有不同能量的粒子穿越边界的位置却是相同的,与期望的穿越结构矛盾。而新辐射区域则很容易也很好地解释了这两个观测现象。对现象一,由于磁洞削弱磁层的保护,从而使得太阳高能带电粒子能够穿进磁层至更低纬度区域;对现象二,因为局部回旋共振,故在同一边界位置可存在不同能量的带电粒子。事实上,观测的 CEP 能量范围为 $20\text{keV}-10\text{MeV}$ ^[19-20],恰好与 Van Allen 外辐射带的带电粒子能量范围一致。

根据刘维定理,若无新的粒子源和损失,则在给定的磁矩,粒子在磁流管输运过程的相空间密度应当一样。而带电粒子的相空间密度则正比于其被磁场束缚的概率(或束缚时间)^[4,20]。由于磁场强度在磁赤道附近的外辐射带比在新辐射区域更大更稳定,其磁束缚力也更强,因此带电粒子在磁赤道附近外辐射带的停留时间远远长于在新辐射区域的停留时间,也因此太空科学家们相信带电粒子的相空间密度在磁赤道附近外辐射带远远大于在磁口的密度。令人难以置信的是,比较了来自太阳风的 He^{2+} 以及来自电离层的 O^+ 在上述两区域的相空间密度之后,作者发现,在给定的磁矩这两种离子在磁口的相空间密度可以比在磁赤道附近外辐射带的相空间密度大2个数量级^[1]。此发现太令人惊讶也太重要了,因为它是打开外辐射带高能带电粒子起源这个奥秘的钥匙。它揭示了高能带电粒子输运方向是从磁口到外辐射带。进一步的分析说明了以磁口为中心的新辐射区域既可占据开放磁场线区域亦可占据部分封闭磁场线区域,甚至抵达低纬度区域与部分外辐射带重叠,从而为 Van Allen 外辐射带提供了直接的高能带电粒子^[1]。

4 结论

当磁口吞入太阳风带电粒子后,减磁效应进一步撕开磁层,形成大的磁洞,并将太阳风的能量转变成涨落电磁能。而后者又加速部分带电粒子到更高的能量,形成一个新的以磁口为中心的巨大的动力辐射区域,为 Van Allen 外辐射带提供了直接的高能带电粒子^[1]。

参考文献 (References)

- [1] Chen J, Lyu L H. Observations of a broad and dynamic region of radiation in geospace [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, doi: 10.1016/j.jastp.2011.07.003.
- [2] Van Allen J A, Frank L A. Radiation around the Earth to a radial distance of 107,400 km[J]. *Nature*, 1959, 183: 430-434.
- [3] Spjeldvik W N, Rothwell P L. Handbook of geophysics and the space environment [M]. Jursa A S. ed, Arlington, VA: Air Force Geophysics Laboratory, 1985: 5-34.
- [4] Hess W N. Energetic particles in the inner Van Allen Belt [J]. *Space Science Reviews*, 1962, 1(2): 278-312.
- [5] Sheldon R B, Chen J, Fritz T A. The quadrupole as a source of energetic particles: III. Outer radiation belt and MeV electrons [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, 70(14): 1829-1846
- [6] Chapman S, Ferraro V C A. A new theory of magnetic storms [J]. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity (Journal of Geophysical Research)*, 1931, 36(3): 171-186.
- [7] Roederer J G. Dynamics of geomagnetically trapped radiation[M]. Berlin: Springer, 1970.
- [8] Chen J. Long-term modulation of cosmic rays in interplanetary magnetic turbulence[D]. Newark, DE: University of Delaware, 1989.
- [9] Bieber J W, Chen J. Cosmic-ray diurnal anisotropy, 1936-1988: Implications for drift and Modulation theories [J]. *The Astrophysical Journal*, 1991, 372: 301-313.
- [10] Chen J, Bieber J W, Pomerantz M A. Cosmic ray unidirectional latitude gradient: Evidence for north-south asymmetric solar modulation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(A7): 11569-11585.
- [11] Heikkila W J, Winningham J D. Penetration of magnetosheath plasma to low altitudes through the dayside magnetospheric cusp [J]. *Journal of Geophys Research*, 1971, 76(4): 883-891.
- [12] Frank L A. Plasma in the earth's polar magnetosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(22): 5202-5219.
- [13] Chen J, Fritz T A, Sheldon R B, et al. A new, temporarily confined population in the polar cap during the August 27, 1996 geomagnetic field distortion period [J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(12): 1447-1450.
- [14] Chen J, Fritz T A, Sheldon R B, et al. Cusp energetic particle events: Implications for a major acceleration region of the magnetosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(A1): 69-78.
- [15] Sheldon R B, Spence H E, Sullivan J S, et al. The discovery of trapped energetic electrons in the outer cusp [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(11): 1825-1828.
- [16] Heikkila W J. Earth's Magnetosphere formed by the low-latitude boundary layer[M]. Oxford: Elsevier, 2011
- [17] Chen J. Evidence for particle acceleration in the magnetospheric cusp [J]. *Annales Geophysicae*, 2008, 26(7): 1993-1997.
- [18] Kudela K. On energetic particles in space [J]. *Acta Physica Slovaca*, 2009, 59(5): 537-652.
- [19] Chen J, Fritz T A. The global significance of the CEP events[C]//Wang H N, Xu R L ed. Solar-Terrestrial Magnetic Activity and Space Environment, COSPAR Colloquia Series, 2002, 14: 239-249.
- [20] Chen J, Fritz T A. CEP as a source of upstream energetic ions[M]//Sauvaud J-A, Němeček Z ed. Multiscale Processes in the Earth's Magnetosphere: From Interball To Cluster, NATO Science Series Book, New York: Kluwer Academic Publishers, 2004, 178: 175-194.
- [21] Chen J, Guzik T G, Wefel J P, et al. Energetic helium isotopes trapped in the magnetosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101 (A11): 24787-24799.

(责任编辑 陈广仁)