第4卷 第1期 空间科学学报 Vol. 4, No.1
1984 年 1 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan., 1984

用 STARE-TRIAD 联合观测对磁层-电离层不完全耦合的实例研究

资 民 筠
(北京大学地球物理系)
尔·尼尔森 (E · Nielsen)
(马科斯-普朗克高空研究所)

摘 要

本文用 STARE-TRIAD 联合观测的一个实例研究磁层-电离层不完全耦合现象。实例中观测的电场、场向电流和推出的 Pederson 电导率在 Harang 不连续区的分布与用 Kan-Lee 磁层-电离层不完全耦合理论的预测值符合得很好。这支持了该理论所说的在电等位 U-位形低纬侧有 S-位形存在以及与之相应的电离层电导率的第二增强区和电场凹陷区等现象。STARE 的其他观测事实说明这些现象具有一定的普遍意义。

一、引 言

Harang 不连续区原指 Harang (1946) 提出的极区电射流的子夜前的不连续现象，1972 年 Heppner 将其命名为 Harang 不连续性。极区电射流基本上是 Hall 电流，所以 Harang 不连续性实际上是南、北电场同时出现的电场不连续性。近十年来不少作者对其进行了研究，这已成为磁层-电离层耦合问题中的一个重要课题。

极区双雷达 STARE 为这一研究创造了有利条件，它可同时观测到 Harang 不连续性的二维分布(随经、纬度变化)，和其随时间的变化，得到清晰的图象。本文从 STARE 的观测出发，结合 TRIAD 卫星对场向电流的观测，对 Harang 不连续区的特殊现象——磁层-电离层的不完全耦合问题进行讨论。

二、Harang 不连续性与极光粒子沉降及倒 'V' 形事件

对 STARE 雷达过去已介绍过，它以 20s (冬)或 60s (夏)的时间分辨率，22km × 22 km 的空间分辨率测量东经 13°.5—26°.0 北纬 67°.6—72°.6 (磁纬 65°.2—70°.2) 间的电子漂移速度分布，从而可推出电场分布。

STARE 观测到的 Harang 不连续图象特点[6]是观测区北部基本为东向漂移，对应南

本文于 1983 年 4 月 4 日收到.

向电场，南部则为西向漂移，北向电场．两区域间常出现空白，表明电场低于 STARE 观测的阈值 15mV/m．不连续性在观测场中初出现时图象很鲜明，此后可延续数十分钟甚至一、两小时，在此期间图象有时会显得不清，说明这是一变化动荡的区域．

STARE 观测与极光观测比较[6]说明，在 Harang 不连续区分界处常有极光弧出现．Greenwald 等[2]又发现不连续区对应于 TRIAD 观测的三重场向电流区，中间向上之电流恰好通过不连续分界区，而向上电流实际是向下运动的电子流造成的．这些事实说明了 Harang 不连续性与极光粒子(此处是电子)沉降的密切联系．

本文作者与吴雷等合作[7]将 STARE 观测的 Harang 不连续边界开始时间的 Kp 变化与某些同步卫星观测的磁层中粒子注射边界的 Kp 变化进行了比较，统计结果说明，Harang 不连续边界大致对应于 ATS 1 的高能电子 (>30 keV) 注射边界．这虽是统计图象，磁层-电离层间沿磁力线投影又很复杂，因此不能作为严格判据，但起码是 Harang 不连续性与高能电子沉降之联系的又一旁证．

由此联想到大高度上经极区之卫星对沉降粒子流观测时发现的倒 'V' 形事件．倒 'V' 形事件多见于夜间，有观测证明其与电场转向区对应，这与 STARE 观测的 Harang 不连续区及其相关现象很类似．虽尚无直接观测之证明，但有理由推测 Harang 不连续性就是夜间的倒 'V' 形事件在较低高度上的某种表征．

三、磁层-电离层不完全耦合

对倒 'V' 形事件的研究引出平行地磁场电场的存在及与之相关的物理现象这一重要课题．只有引入平行电场的加速作用，倒 'V' 形事件中高密度电子沉降流才能得到解释．这时沿同一磁力线的电离层电位与磁层电位不等，属于不完全耦合．本文不讨论平行电场的产生，只注意平行电场对电离层电场分布的影响．最初的理论模式是倒 'V' 形事件附近，磁层、电离层间电位线成 'U' 形分布，'U' 形中间是电场反向区[5]．Kan 和 Lee[4]进一步提出，在 'U' 位形的低纬一边还会出现 'S' 位形，后者同样可引起电子沉降．在 'S' 位形附近，电场并不转向，而是出现凹陷区．其物理过程可概括为：当某种原因驱使磁层中对流增强，此增强必会通过场向电流增强来加强电离层中的电磁运动．但由向下电子沉降所造成的向上场向电流强度是有限制的，超过此限，会由某种机制(模型中不涉及)产生平行磁力线的电场．这种平行电场对电子之加速不仅使场向电流大增，也大大增加电离层电导率，由此亦改变了电离层中电场和电流的分布．场向电流和电离层电流分别与平行电场和电离层电场同方向，起负载作用，使磁层过程不可能无限制地增加，最终达到平衡．平衡的图象如 Kan 和 Lee 文章[4]中图 3 所示，可看到电位线的 'U'、'S' 位形及对应的电场转向区与凹陷区．

Kan-Lee 模式是针对倒 'V' 形事件提出的，从前面的分析看，其推论也应在 Harang 不连续区的观测中有所体现．下面我们用 STARE 资料结合 TRIAD 观测对 Kan-Lee 模式进行考察，主要以 1978 年 11 月 12 日为特例，进而再考察其普适性．

四、1978 年 11 月 12 日实例考查

首先对 TRIAD 观测稍加说明. TRAID 是八百公里上的极轨卫星,有时飞经 STARE 观测场上空,在 STARE 观测场内的 Kiruna (北纬 68°, 东经 20°) 建有地面站. TRIAD 上载有精确度达 12γ 的三轴磁强计,时间分辨率高于 0.5s. 记录时自动扣除地球基本磁场,从而得出基本对应于场向电流磁场之三个分量. 本工作中, Z: 向上, X: 指磁北极, Y:指磁西向. B_Z 一般可忽略,场向电流基本沿磁纬方向,成薄层状,故有 $B_x \ll B_y$,根据 Maxwell 电磁方程有:

$$J_{\parallel} = \frac{1}{\mu}\frac{\partial B_y}{\partial x}. \quad (J_{\parallel} \text{ 为场向电流密度}) \tag{1}$$

纬度每度 100γ 的磁场变化率约对应 0.64μA/m^2 的 $J_{\parallel}$.

在 1978 年 11 月 12 日世界时 17:32—17:33 间,TRIAD 飞经 STARE 观测场,与此同时 STARE 正好观测到 Harang 不连续性. 当天因地磁活动较高, Harang 不连续性在 STARE 观测区出现很早 (MLT～20h), TRIAD 观测的三重电流也比通常发生得早 (一般在 21h 以后).

图 1 给出 STARE 的观测结果,本图为 TRIAD 所经经度附近漂移运动随纬度分度之时间变化. 与 STARE 观测的其他 Harang 不连续性相似,从观测区南部到北部,漂移从西向转为东向,其分界区在 70°.6—70°.8 间. 和 STARE 观测的多数 Harang 不连续区不同处是, 不连续边界处空白缺值区很窄,为定量分析创造了有利条件.

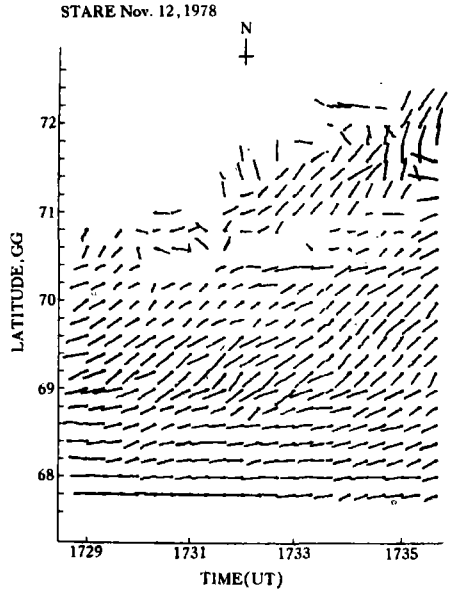

图 1 STARE 17:33 左右漂移运动随纬度时间的变化图象, Harang 不连续边界在 70°.6—70°.8附近

Fig. 1 The latitude-time profile of electron drift velocities around 17:30 from the STARE observations, the Harang discontinuity boundary is around 70°6—70°8

图 2 给出 TRIAD 的观测. 图 2 (a) 是 800km 高度上由大规模场向电流产生的电场; 2(b) 是同一观测在磁纬-磁地方时坐标中的矢量表示,磁矢量基本为磁东、西向. TRAID 观测明显对应于三重场向电流系,电流从两边流入电离层,从中间流出.

图 3 是 STARE 与 TRIAD 的综合比较. STARE 资料给出 Harang 不连续区电场的二维分布. 相应的 TRIAD 资料用圆圈中叉、点表示,分别对应电流向下流入和向上流出电离层. 圆圈大小定性表示场向电流大小. 图中图象即场向电流由不连续边界两边流入从边界附近流出电离层, 与 Greenwald[2] 等所分析之例证相符. 但他所

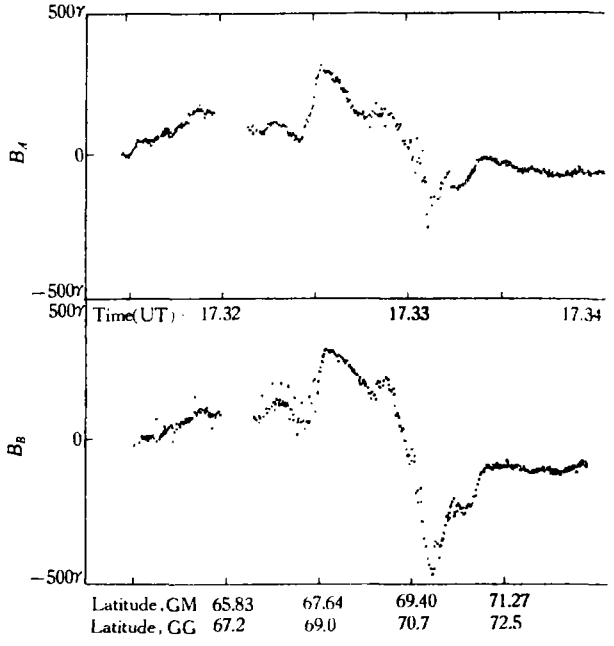

图 2(a)　TRIAD 观测，B_A,B_B 为垂直地球磁场之分量

Fig. 2 (a)　The observations from TRIAD. B_A, B_B: the two components transverse to the main geomagnetic field

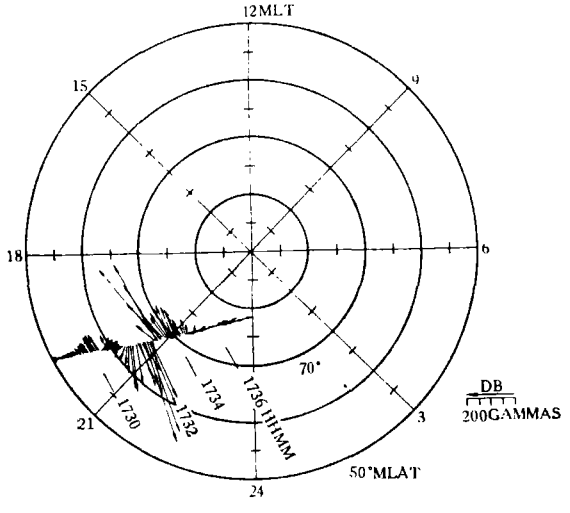

图 2 (b)　TRIAO 观测的磁纬-地磁地方时坐标系中的磁矢量沿卫星轨道的变化

Fig. 2 (b)　The magnetic field perturbation vector observed by TRIAD along the satellite's trajectory in IVAI-MLT coordinate

取之例证为相对静日，出现的磁地方时较晚，场向电流也较弱.

五、对 Kan-Lee 模式的验证

下面用此例证对 Kan-Lee 模式的一些基本结论进行检验. STARE, TRIAD 观测均

在电离层高度，故讨论只限于电离层部分．基本方法是：首先，通过 TRIAD 的场向电流观测及 STARE 的电场观测求出与此二者自洽的电离层电导率；其次，用 Kan-Lee 模型与 TRIAD 的场向电流观测求出电离层中的电场与电导率；最后，将二者加以比较．下面给出所用公式，只考虑 $J_{//}$ 向上部分，坐标同前．

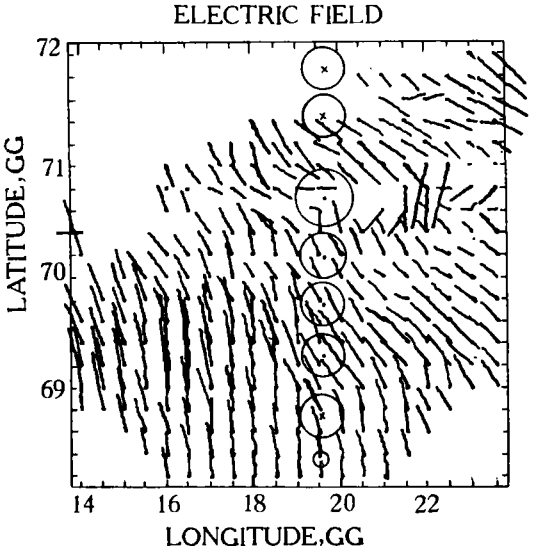

图 3 STARE 和 TRIAD 观测的综合比较图，图中给出 1978 年 11 月 12 日 17 时 33 分（世界时）STARE 观测的电场分布及与此同时 TRIAD 飞行路径上（按 Fairfield-Ness (1975) 磁场模沿磁力线投影到 STARE 观测高度）的场向电流分布．圆圈大小定性代表场向电流大小．×电流向上，·电流向下

Fig. 3 The combination of observations of STARE and TRIAD. The two dimentional map of electric fields deduced from the STARE observations (17:33, 12-th november, 1978) are superposed by the TRIAD measurments along the satellite trajectory (projected along the geomagnetic line onto the altitude of the STARE field of view according Fairfield-Ness model (1975).) The size of the circles represents the relative intensity of the field-aligned currents. ·: downward, ×: upward.

1. 从 TRIAD、STARE 观测计算电导率 Σ_p；

当 $B_y \gg B_x$，$\frac{\partial}{\partial x} \gg \frac{\partial}{\partial y}$ 时，(1) 式成立．

场向电流与电离层电流的关系可由电流连续方程求出．在一维近似情况下，

$$J_{//} = -\frac{\partial I_x}{\partial x}. \tag{2}$$

本问题所取近似下，与场向电流闭合的主要是 Pederson 电流，从欧姆定律有

$$I_x = \Sigma_p \cdot E_x, \tag{3}$$

其中 Σ_p 为 Pederson 电导率．结合上三式有：

$$\Sigma_p = \frac{B_y}{\mu E_x}. \tag{4}$$

(4) 式中 B_y，E_x 可分别由 TRIAD、STARE 资料得出，从而可推出 Σ_p．（见图4，实线对应本部分各值）．

2. 从 Kan-Lee 模式和 TRIAD 观测计算 E_x，Σ_p：

从前述 Kan-Lee[4] 的基本物理考虑出发，设平行电位势为 ϕ，在一维假设下有

$$E_{//} = \frac{\partial \phi}{\partial x}. \tag{5}$$

其中 $E_{//}$ 为平行地磁力线之电场，其对场向电流的效应为

$$J_{//} = J_0 + \alpha_0 \phi, \tag{6}$$

J_0 为无平行电场时之场向电流极限，α_0 为参数。平行电场对 Pederson 电导率的影响表现为

$$\Sigma_p = \Sigma_0 (1 + \beta_0 J_{//} \phi)^{1/2}, \tag{7}$$

Σ_0 为无平行电场时之电导率，β_0 为参数。

由(6)式出发可从测量的场向电流反推平行电位势 ϕ，即

$$\phi = \begin{cases} 0, & J_{//} \leqslant J_0 \quad (8\text{-}1) \\ \dfrac{J_{//} - J_0}{\alpha}. & J_{//} > J_0 \quad (8\text{-}2) \end{cases}$$

其中 $J_{//}$ 仍由 (1)式，由 TRIAD 观测的 B 值推出.

求出 ϕ 后，将 ϕ、$J_{//}$ 代入 (7) 式求得 Σ_p，再由(2)式、(3)式推出 E_x. 计算结果也绘于图(4)中，见虚线. 所选取之参数基本依据 Kan-Lee 文章，只对 Σ_0 作了调整，以拟合观测值. ($\alpha_0 = 5\mu A/m^2/kV$; $\Sigma_0 = 7mho$; $J_0 = 0.5\mu A/m^2$. 原模式中 $\Sigma_0 = 10$ mho)

以上两推算中，前者基于观测，运用一般电磁运动方程，后者基于平行电位势对电导率及场向电流影响的非完全耦合理论，虽共同应用了 TRIAD 观测，方法一和方法二相互独立，二者之比较可作为观测对理论的检验与验证. 如图 4 所示，二者间有较好的拟合.

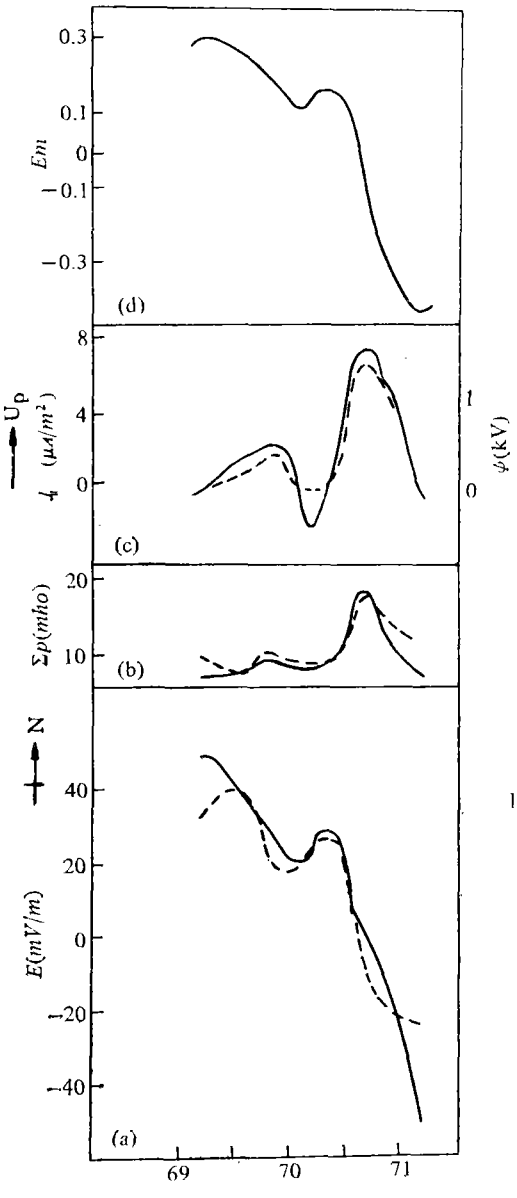

图 4　(a—c) 理论(虚线)与观测(实线)的比较. (c) 中虚线为推算的 ϕ. 4(d) 理论推算的磁层电场分布，文中未涉及

Fig. 4 (a—c) The latitudinal variations of the observed (solid lines) and the theoritically deduced (dotted lines) parameters. The dotted line in (c) represents th deduced ϕ. 4 (d) The deduced electric field in magnetosphere, not corcern the paper here

六、物 理 讨 论

上面的数学运算反映的物理图象是什么呢?

首先，Kan-Lee 模式的关键是平行于地磁场的电位除 'U' 位形外还有在其低纬侧的 'S' 位形，与此对应电位 ϕ 的纬度分布出现一大、一小的双峰. 场向电流直接受平行电位控制，ϕ 大 $J_{//}$ 也大，从而 $J_{//}$ 也应是双峰形分布. 此处所取的 TRIAD 观测中 $J_{//}$ 之分布确实是双峰形，这是理论与观测相符的最基本点.

受双峰形分布的 ϕ、$J_{//}$ 控制，Σ_p 也呈现双峰形. 观测推出的 Σ_p 确实如此，这是理论与观测相符的第二个要点.

从双峰形电位出发，Kan-Lee 的不完全耦合模式的重要推论是：对应较大的峰有电离层电场的反向，在较小峰附近出现电场凹

陷区，这种电场位形确实存在于本处的 STARE 观测中．这是理论与观测相符的第三点．这些相符处也说明前面有关 Harang 不连续性和倒 'V' 形事件的关系的推测是合理的．

模式预测与观测间存在某些差异是很自然的．这有多重原因，主要是 Σ_p-ϕ，$J_{//}$、$J_{//}$-ϕ 关系可能更复杂，比如，从观测看，背景电导率 Σ_0 可能随纬度变化，使 Σ_p 增大和输运 $J_{//}$ 的沉降电子又可能不全在同一能量范围．此外，一维恒稳模式的局限性，参数的选取等等，都会影响计算结果．不过，既然观测与模式基本吻合，说明上面所说的不过是次级效应．

观测例证中，不完全耦合尺度为纬度 2°，即 220km 左右，比原模式中 400km 的尺度约小一半．由此，再加上 Σ_0 的调整，电场要比原文模式中大一倍．这些并不影响模式的物理本质．

由于这里只得到一个合用的 STARE、TRIAD 同时观测的实例，自然应问，这一实例是否具有普遍性．从前面总结的物理图象可知，虽无两种观测的同时比较，但可从TRIAD 三重电流观测中观察向上电流的双峰分布，亦可在 STARE 的 Harang 不连续性观测中寻找电场转向区南侧的凹陷形变化．前者因作者掌握的 TRIAD 资料有限，无法进行．在 STARE 观测的 Harang 不连续性中，作者看到了一些凹陷形电场，受 STARE 观测阈值限制，凹陷形电场分布常以不连续边界空白区南侧的第二空白区(即电场因低于15mV/m 而缺值)出现(见 Nielsen，Greenwald[4] 文章中图 6 等)．当然，凹陷区或第二空白区并非永远伴随 Harang 不连续性存在．有时可能是因为两个空白区相连无法分辨，也说明 'U' 位形电位分布并非永远伴有 'S' 位形．不管怎样，1978 年 11 月 12 日实例具有一定的普遍意义．

更深入地探讨必然涉及平行电场的激发，场向电流的驱动等重要理论问题，也需要有电场、场向电流、粒子沉降、电导率等观测的综合分析．这些都超出了本文范围．

作者感谢 Potemra 和 W. Ip 博士对此工作的支持和帮助．

参 考 文 献

[1] Armstrong, J. C. and Zmuda, A. J., *J. Geophys. Res.*, Vol. **78**, p. 6802, 1973.
[2] Greenwald, R. A. et al., *J. Geophys. Res.*, Vol. **85**, p. 563, 1980.
[3] Iijima, T. and Potemra, T .A., *J. Geophys. Res.*, Vol. **81**, p. 2165, 1976.
[4] Kan, J. R. and Lee, L. C., *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 7, p. 633, 1980.
[5] Lyon, L. R., *J. Geophys. Res.*, Vol. **85**, p. 17, 1980.
[6] Nielsen, E. and Greenwald, R. A., *J. Geophys. Res.*, Vol. **84**, p. 4189, 1979.
[7] Zi Min-yun, Wu Lei, Gendrin, R. and Higel, B., *J. Atmosph. Terr. Phys.*, Vol. **44**, p. 671, 1982

A Case Study for Imperfect Magnetosphere-Ionosphere Coupling by STARE-TRIAD Joint Observations

Zi Min-yun

(*Dept. of Geophysics, Peking University*)

E. Nielsen

(*Max-Planck Institut für Aeronomie, B. R. D.*)

Abstract

A case from STARE-TRIAD simultaneous observations is used to investigate the Magnetosphere-Ionosphere imperfect coupling. The latitudinal profiles of the STARE observed E-fields, the TRIAD measured field-aligned currents and the deduced height-integrated Pederson conductivities near the Harang discontinuity are found to be in good agreement with the theoritical model of Kan and Lee. The observations support the prediction that the U-shape electric equipotential contours at the discontinuity is accompanied by a S-shape contour equatorward, which is associated with a second enhancement of height integrated Pederson conductivity and a valley in the latitudinal profiles of the ionospheric E-fields. Other samples from the STARE observations show that the results here have some universal significance.