第21卷 第3期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.3
2001 年 7月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE July, 2001

外辐射带动态演化的粒子模拟研究 *

沈 超 刘振兴
(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

运用计算机实验方法即三维电磁粒子模拟方法初步研究了暴时扰动情况下外辐射带粒子环境的动态演化特性. 模拟计算了暴时辐射带粒子环境的演化情况. 模拟计算结果显示, 高能质子、电子注入午夜辐射带后, 两者一方面沿磁力线做弹跳运动, 向高纬扩展, 部分注入质子和电子沉降于南北两极区域; 另一方面, 注入质子和电子还经历顺时针和逆时针方向的漂移运动, 粒子能量越大, 漂移速度越快. 暴时多次注入引起整个辐射带粒子通量的大幅增强; 粒子注入频次和强度越大, 辐射带粒子通量增幅越大. 本项研究为开发研制完整的辐射带动态模式积累了有益的经验.

关键词 辐射带—动态模式—电磁粒子模拟

1 引 言

地球辐射带为近地空间充满高强度地磁场捕获带电粒子的区域, 由内辐射带和外辐射带构成. 受磁层活动的影响, 地球辐射带的结构和粒子通量分布处于动态变化中 [1]. 辐射带是通信卫星、气象卫星、测地卫星等各种应用卫星和载人飞船、载人太空实验室的主要活动空间区域. 辐射带粒子环境是导致航天器的故障和异常的重要因素. 观测统计表明, 磁暴、强亚暴往往引起辐射带区域运行卫星严重故障. 为了航天器安全的需要, 航天器的带电控制, 保障宇航员的辐射安全, 对航天材料、电子器件进行辐射防护措施, 我们必须知道宁静和暴时辐射带空间粒子通量的分布及其动态变化规律, 建立准确、可行的辐射带模式. 目前, 国际上流行的辐射带模式有 NASA 开发的电子 AE8 的质子 AP8 模式 [2,3], 它是根据有限的卫星数据编制的平均和静态的经验模式, 现在已经不能满足航天器安全运行对辐射带环境预报的需要. 研制和开发能够描述暴时扰动条件下辐射带粒子通量的动态模式是亟待解决的前沿课题. 虽然对辐射带环境粒子分布的动态变化已经进行了大量的卫星观测研究, 然而辐射带动力学过程中的许多机制仍未清楚, 尤其是小时空尺度上的暴时粒子分布演化. 卫星观测的局限性是由卫星轨道决定, 只能进行单点、单时间测量, 而且数据覆盖时间区域很不完整, 难以确定暴时辐射带整体图像和特性. 以卫星观测数据为基础的经验模式显然无法真正实现辐射带动态模式. 本项研究从基本的物理规律出发, 探索用于计算机实验方法即三维电磁粒子模拟研究辐射带粒子的动态演化过程, 从而能够在全空间、全时间范围内对辐射带进行全面的试验研究及“观测”分析, 所

* 国家自然科学基金 (49804009, 49834040), 国家高技术航天技术领域专家委员会青年科学基金共同资助
中国科学院空间天气学开放研究实验室, 中国 CLUSTER 数据研究中心
2000-12-25 收到原稿, 2001-04-27 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

需设备为普通计算机，而非耗资巨大的卫星观测系统. 一些作者采用单粒子轨道方法或福克-普朗克动力论方程描述辐射带动态演化过程 [4−8]. 然而在他们的研究工作中，电场和磁场都是人为地由外部施加，必须分别计算每种带电粒子 (电子、质子) 的通量演化. 与其相比较，在本项研究的三维电磁粒子模拟过程中，电子、质子同时存在于模拟区域，电场和磁场是自洽的，因而能较好地反映辐射带电磁场和粒子的动态演化过程.

2　辐射带粒子动态演化粒子模拟

2.1　粒子模拟方法

粒子模拟方法考察等离子体中每个带电粒子在外场以及其他带电粒子的电磁场中的运动，并考虑了整个电磁场自洽地服从麦克斯韦电磁定律. 其控制方程 (SI 单位制) 为

$$\frac{\mathrm{d}(\gamma_\alpha \boldsymbol{v}_\alpha)}{\mathrm{d}t} = \frac{q_\alpha}{m_\alpha}[\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v}_\alpha \times \boldsymbol{B}], \tag{1}$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = +\frac{1}{\mu_0}\nabla \times \boldsymbol{B} - \sum_\alpha q_\alpha \boldsymbol{v}_\alpha n_\alpha, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = -\nabla \times \boldsymbol{E}, \tag{3}$$

$$\varepsilon_0 \nabla \cdot \boldsymbol{E} = \sum_\alpha n_\alpha q_\alpha, \tag{4}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0. \tag{5}$$

其中 $\gamma_\alpha = 1/\sqrt{1 - v_\alpha^2/c^2}$ 为相对论因子，ε_0, μ_0 为真空中介电常数和磁导率. $m_\alpha, q_\alpha, \boldsymbol{v}_\alpha$ 为第 α 个粒子的质量，电荷和速度. 归一化取质量、电量、速度、长度、时间、电场、磁场的符号分别为 $m_0, q_0, v_0, l_0, t_0, E_0, B_0$(其中 v_0, E_0, B_0 为导出符号). 取 $\varepsilon_0 = 1, \mu_0 = 1/c^2$, $c\boldsymbol{B} \to \boldsymbol{B}$, 则方程化为 $\boldsymbol{E}, \boldsymbol{B}$ 对称形式：

$$\frac{\mathrm{d}(\gamma_\alpha \boldsymbol{v}_\alpha)}{\mathrm{d}t} = \frac{q_\alpha}{m_\alpha}[\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v}_\alpha \times \boldsymbol{B}], \tag{6}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = c\nabla \times \boldsymbol{B} - \sum_\alpha n_\alpha q_\alpha \boldsymbol{v}_\alpha, \tag{7}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = -c\nabla \times \boldsymbol{E}, \tag{8}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{E} = \sum_\alpha n_\alpha q_\alpha, \tag{9}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0, \tag{10}$$

以利于计算机离散运算.

进一步取 $c = 0.5$, 等步长 $\Delta t = \Delta x = \Delta y = \Delta z = 1$, 柯朗条件已得到满足

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot c = 0.5. \tag{11}$$

如此建立三维相对论性电磁粒子模拟程序，可对地磁场中暴时辐射带电磁场和粒子通量的时空演化进行模拟计算研究. 以上进行归一化，已取 $\varepsilon_0 = 1$, $c = 0.5$, $\Delta t = 1$ 和

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$\Delta x = 1$.

模拟区域采用三维直角坐标系. x 方向为太阳-地球方向, y 方向为黄昏-清晨方向, z 为北南方向 (即地球偶极子轴). x、y、z 三个方向格点划分为 $m_x \times m_y \times m_z = 101 \times 101 \times 101$. 使得向阳面边界 ($x = -m_x/2$)、南北向边界 $z = \pm m_z/2$、昏-晨向边界 $y = \pm m_y/2$ 为导体边界条件, 这是对实际磁层顶边界的近似, 因磁层顶外的太阳风可视为良导体. 导体边界能较好地模拟磁层顶对地磁场的屏蔽作用, 可以反映向阳面、南北、昏晨等磁层顶对磁场的屏蔽作用. 在磁尾方向 ($x = m_x/2$) 也取为导体边界, 这虽与实际不符, 但是只要此边界取得足够远, 其对辐射带偶极磁场的影响就很弱, 不失合理性. 模拟过程中取 1 个长度单位相当于 0.16 R_e, 则 1 个时间单位相当于 0.16 R_e/(0.5 倍光速)= 1.7×10^{-3} s.

地磁偶极场由加于赤道面 x-y 平面上、地球球心即坐标原点 (0, 0, 0) 周围的一个环电流产生. 计算初始时, 在原点加入环电流, 经过若干时间后, 稳定的偶极子磁场形成.

2.2 静态辐射带的模拟

在完成了三维模拟程序后, 首先对平静时辐射带进行了模拟研究, 考察其特性, 并验证本程序的适用性.

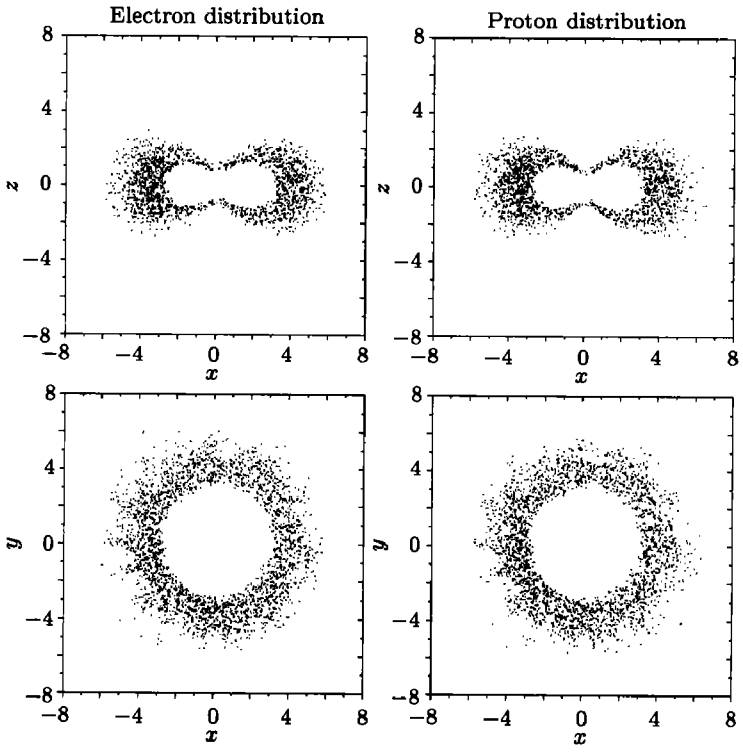


图 1 模拟计算静态辐射带中质子、电子的空间分布情况
x、y、z 坐标的长度单位是地球半径, 地球中心位为原点

Fig.1 The calculated spatial distributions of protons and electrons in the static radiation belt
The unit of x、y、z coordinates is one earth radius , the origin is at the center of earth

在模拟地磁场中加入能谱具有指数衰减形式、投掷角为各向同性的粒子 (电子、质子),

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

在地磁场的作用下做沿磁力线的弹跳运动以及围绕地磁轴的梯度漂移和曲率漂移，最终形成通常的静态辐射带的粒子分布形态.

在实际情况中，当粒子打到磁层顶边界时，将逃逸至太阳风中 (因在太阳风中相对地较少受磁场约束，尤其是高能粒子)；另外，当带电粒子进入地球表面的大气层时，通过与大气成份碰撞而被大气所耗散、吸收. 辐射带的某些带电粒子经历此两种过程后，都将不能返回辐射带. 因此，在模拟中，如果粒子撞到边界上，就令其消失；如果打到地球表面 ($r < \mathrm{R_e}$), 就认为其沉降于大气层 (一般沉降于南北两极).

图 1 为三维粒子模拟所计算得到的静态辐射带中质子、电子的空间分布情况. 左列和右列分别为电子和质子的空间分布，第一行两图分别为电子和质子在子午面上的分布情况，第二行两图分别为电子和质子在磁赤道面上的分布情况. 从第一行两图看，电子和质子受到地磁偶极场的约束，沿磁力线做弹跳运动. 图 1 显示辐射带具有轮胎形状，与观测比较看，此三维粒子模拟程序能很好地再现平静辐射带中质子、电子的运动情况.

2.3　暴时辐射带粒子演化

在暴时条件下，由磁尾等离子体片向午夜辐射带注入高能粒子，引起辐射带通量的显著增加. 本节将运用粒子模拟方法考察注入带电粒子在辐射带中的运动情况. 与实际情况相一致，首先在模拟区域背景中分布冷电子、质子，它们能够消除暴时注入的高能电子、质子反向漂移造成的电荷分离.

这里模拟计算了存在多次连续粒子注入情况下辐射带的通量变化. 图 2 为发生连续三次粒子注入形成的增强辐射带粒子的时空演化. 左列图为注入粒子赤道面附近的东西向漂移情况，右列图为子午面附近注入粒子向南北两极的扩散运动. 三次粒子注入的时刻分别为 $T_1 = 1\,200$ 、 $T_2 = 3\,200$ 和 $T_3 = 4\,000$. 注入高能电子、质子能谱为 $f(E) \propto \mathrm{e}^{-E/E_{\alpha 0}}$, $E_{\alpha 0} \sim 1\,\mathrm{MeV}$.

在午夜赤道面附近，第一次注入 ($T_1 = 1\,200$) 发生后，注入高能电子、质子，注入粒子在辐射带中的运动如图 2(a) 所示. 能量质子、电子注入午夜辐射带后，两者都倾向于沿磁力线向南北两极扩散，尤其是投掷角 (速度与磁力线的夹角) 趋于 0 或 π 角度的一部分注入电子、质子将沿降于南北两极区域.

从图 2(a) 显示，注入电子、质子还经历顺时针和逆时针方向的漂移运动. 由于电子、质子的速度存在一个分布，非单一的，所以不同能量的电子、质子的漂移速度不同；随时间的发展，电子、质子在绕轴方向将扩展开，分布于更广的辐射带空间区域.

由于偶极子轴为 $+z$ 方向 (与实际相反), 在辐射带区域的磁场为北-南方向，则由理论可推知电子、质子的磁漂移方向分别为顺时针和逆时针方向. 因此图 2(a) 的模拟结果与理论相符，并与实际观测一致.

亚暴的单次注入对辐射带的影响时间短暂而不能持久，最强的作用发生于午夜注入带 (如图 2(a) 所示).

第二次注入 ($T_2 = 3\,200$) 发生后，辐射带粒子通量有显著的增强 (如图 2(b) 所示). 如图 2(c) 所示，第三次注入 ($T_3 = 4\,000$) 后，逐渐形成完整的增强辐射带.

粒子注入的频次和强度对辐射带粒子通量的增强有显著影响. 粒子注入强度越大，辐射带粒子通量增幅越大.

我们还初步非自洽地模拟研究了行星际激波冲击和压缩磁层对辐射带粒子分布的影

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

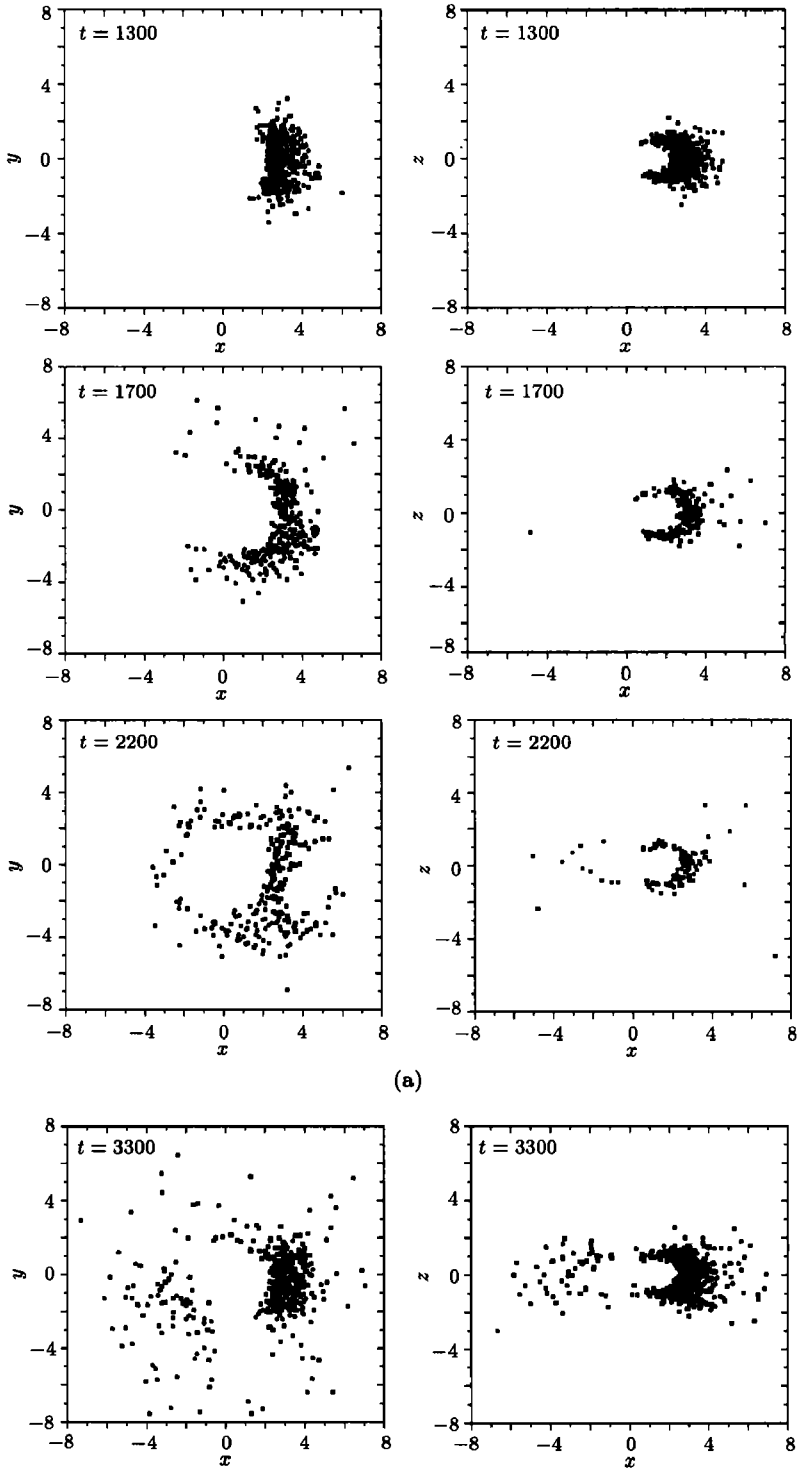
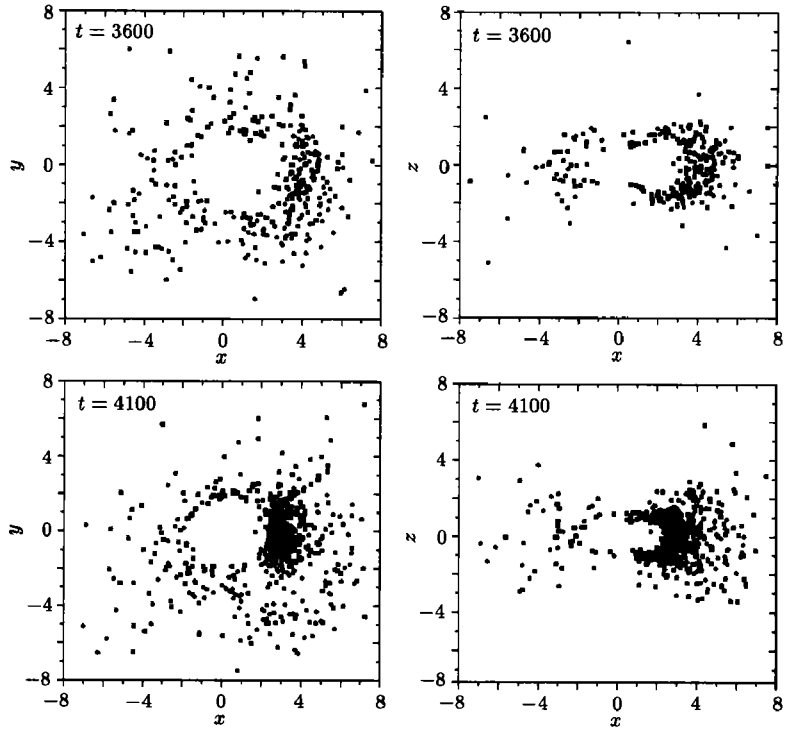


图 2 辐射带中暴时多次注入粒子的演化 (方形、圆形黑点分别标记质子、电子的位置,

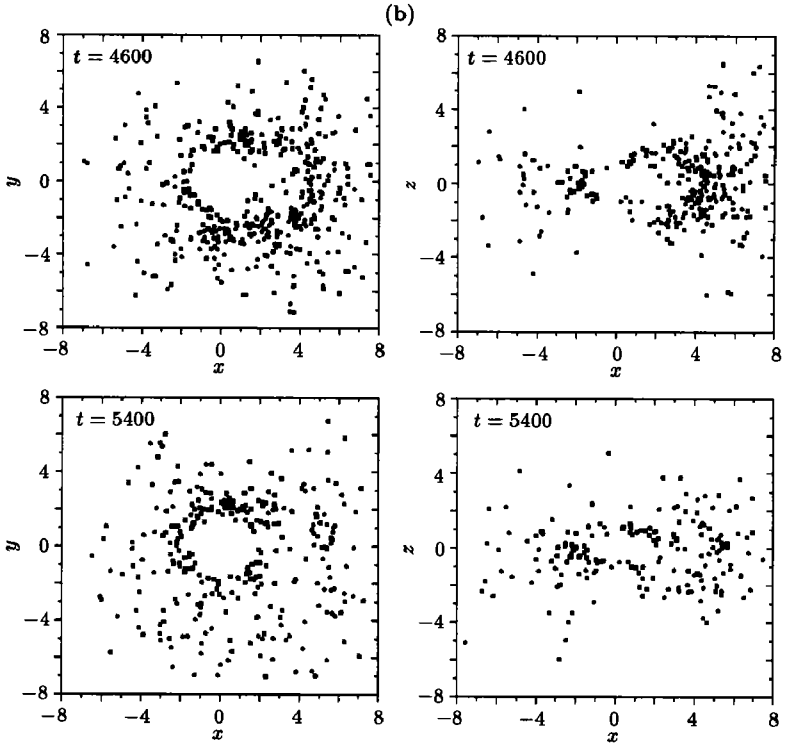
Fig.2 The evolution of protons and electrons in radiation belt during storm time multiple

The unit of x 、 y 、 z coordinates is one earth

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



(b)



(c)

x、y、z 坐标的长度单位是地球半径，地球中心位为原点)

injections. The square and circle dots denote protons and electrons, respectively. radius, the origin is at the center of earth

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

响. 采用的方法是，使边界磁场在一短时间内逐渐升高若干倍，以模拟行星际激波冲压磁层顶，结果显示辐射带整体地地向移动，并且质子、电子的能量显著升高，这表明行星际激波冲压磁层顶引起的感生电场导致辐射带质子、电子的地向飘移以及相应的绝热加热过程.

4 结论与讨论

本项研究运用计算机实验方法即三维电磁粒子模拟方法研究暴时扰动情况下辐射带粒子环境的动态演化特性. 模拟计算结果显示，高能质子、电子注入午夜辐射带后，两者一方面沿磁力线做弹跳运动，向高纬扩展，部分注入质子和电子沉降于南北两极区域；另一方面，注入质子和电子还经历顺时针和逆时针方向的漂移运动，粒子能量越大，漂移速度越快. 暴时多次注入引起整个辐射带粒子通量的大幅增强；粒子注入频次和强度越大，辐射带粒子通量增幅越大. 本项研究为开发研制完整的辐射带动态模式积累了有益的经验.

所采用的三维电磁粒子模拟研究方法比其他研究方法也具有其独特的优越性，能够对辐射带粒子变化的过程进行全时间、空间的全面分析研究. 在此研究方法中，电场和磁场为自洽的，电子、质子同时存在于模拟区域. 此方法的一个潜在的独特优势是能够有效地模拟行星际激波冲压磁层顶引起的感生电场导致辐射带质子、电子地向飘移和相应的绝热加热过程. 此方法的另一优点是它能够模拟磁场相对较弱、质子不满足瞬间近似的情况，如在近地等离子体片区域.

我们的暴时辐射带变化研究可进一步开展以下几方面工作：(1) 加大网格密度，更广泛深入地研究暴时辐射带粒子通量演化的时空变化特性. (2) 对已建立的三维粒子模拟程序进行改造，对电子采用漂移近似，而质子仍采用牛顿方程控制；如此完成的粒子模拟程序能够进行更有效的模拟研究，并降低计算量. (3) 对辐射带重离子 (O^+ 、 He^+ 等) 通量的暴时变化特性进行模拟研究. (4) 在加入磁层电场后，外辐射带粒子的时空演化情况. (5) 行星际激波冲击和压缩磁层对辐射带粒子分布的影响.

参 考 文 献

[1] Roederer J R. Dynamics of Geomagnetically Trapped Radiation. Springger-Verlag Berlin Heidelberg, 1970. 1—163

[2] Gaffey J D Jr, Bilitza D. NASA/national space science data center trapped radiation models. *J. Spacecraft Rockets*, 1994, **31**:2—10

[3] Fung S F. Recent development in the NASA trapped radiation models. In: Radiation Belts Models and Standards, Geophysical Monograph, Vol.97. Washington D C: AGU, 1996. 79—91

[4] Li X *et al.* Simulation of the prompt energization and transport of radiation particles during the March 23, 1991 SSC. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, **20**:2 423—2 427

[5] Fok M C, Moore T E, Greenspan M E. Ring current development during storm main phase. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 15 311—15 322

[6] Fok M C, Moore T E, Delcount D C. Modeling of the inner plasma sheet and ring current during substorms. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**:14 557—14 569

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

[7] Bourdarie S *et al.* Electron and proton radiation belt dynamic simulations during storm periods, A new asymmetric convection-diffusion model. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**:17 541—17 552

[8] Jordanova V K *et al.* Ring current activity during the early $B_z < 0$ Phase of the January 1997 magnetic cloud. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**:24 895—24 914

PARTICLE SIMULATION ON THE DYNAMICAL EVOLUTION OF RADIATION BELT PARTICLES

SHEN Chao　LIU Zhenxing

(*Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

Abstract

In this research, the spatial and temporal evolution properties of the external radiation belt particles during geomagnetic disturbances have been investigated by using a three dimensional relativistic electromagnetic particle code. The calculation shows that, the injected energetic protons and electrons perform bounce movements along geomagnetic field lines and can expand into the high latitude region. On the other hand, the injected protons and electrons also experience clockwise and anti-clockwise magnetic drift movements, the larger the energy of the particles is, the faster the drift velocity will be. Multiple injections will cause a remarkable increase of the flux of the external radiation belt particles.

Key words　Radiation belt, Dynamical model, Particle simulation

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com