

地基人工 VLF 电波对辐射带电子的调制*

王平[†] 王焕玉 马宇蓓 李新乔 卢红 孟祥承 张吉龙

王辉 石峰 徐岩冰 于晓霞 赵小芸 吴峰

(中国科学院高能物理研究所粒子天体中心, 北京 100049)

(2010年9月5日收到; 2010年9月28日收到修改稿)

辐射带电子的加速与沉降机理是空间物理研究的重要课题. 法国 DEMETER 电磁卫星观测到了美国 NPM 发射站 VLF 信号及与之相关的高能电子沉降事例. 本研究工作将根据基于回旋共振相互作用的准线性扩散理论, 通过对局域投掷角扩散系数的计算, 来说明受 VLF 影响的高能电子的投掷角分布与电子的能量及所处位置的关系. 理论计算较好地解释了 DEMETER 卫星在 NPM 实验期间所观测到的电子沉降事例. 在此基础上进一步讨论了通过人工方式对辐射带高能电子施加影响的效率问题.

关键词: 回旋共振, 投掷角散射, 电子沉降

PACS: 94.20.wj, 94.30.Tz

1. 引言

Van Allen 辐射带^[1]是地球空间环境的重要组成部分, 大量高能质子和电子组成环绕地球运动的内、外辐射带. 在大的磁暴等情况下, 这些高能粒子通量可以在一到两天时间内达到数个量级的变化^[2], 有可能成为影响空间飞行器及载人航天设备的安全威胁^[3]. 研究辐射带带电粒子的加速、沉降机理是空间物理领域所关注而仍未完全解决的热点问题之一.

过去的研究表明, 受到大范围的电、磁场扰动而导致的高能电子径向扩散对外辐射带电子加速和输运起主导作用, 而局域的波粒回旋共振相互作用导致电子的投掷角散射对内辐射带电子的沉降起主导作用^[4]. 最近的许多研究表明波粒回旋共振作用可能对地球外辐射带电子加速与内辐射带电子的沉降都起主要的作用^[2, 5, 6]. 人工地基 VLF 信号在磁层可以“哨声波”(whistler)模式传播, 当其频率接近于所处位置电子的回旋频率时, 可与电子发生回旋共振相互作用, 导致电子磁矩不变量被破坏, 投掷角扩散而掉入损失锥中, 并与高层大气分

子作用而沉降. 在这些沉降位置可观测到短时间的粒子通量增加^[6-10]和可观测的韧致辐射现象^[11]. 人工地基 VLF 信号对内辐射带电子影响的研究结果促使人们设想对辐射带高能电子实现“人工控制”的目的. 另外类似于天气预报那样对空间环境高能电子通量变化“预报”方面的理论工作也一直在开展中^[12].

最近, 研究人员在美国位于夏威夷的 VLF 基地 (NPM) 通过人工控制的方式开展了地基 VLF 信号对辐射带高能电子影响的实验^[13]. 法国电磁卫星 DEMETER (Detection of Electro Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions) 观测到了该 VLF 信号并清楚显示了与该 VLF 信号相关的高能电子沉降事例. 本文应用新近发展的以波粒回旋共振理论为基础的磁层粒子准线性扩散理论^[14, 15], 通过求解投掷角扩散系数, 计算了受 VLF 影响的电子的投掷角分布, 所得结果与 DEMETER 的观测相符合, 并对实验期间出现相邻两次电子沉降现象给出了合理的解释. 由此在回旋共振导致电子投掷角扩散的理论基础上证实了 DEMETER 所观测到的辐射带高能电子沉降与 NPM 的 VLF 信号之间的相关性. 此外, 针对 NPM 实验讨论了地基 VLF 信号对辐

* 国家高技术研究发展计划(批准号: H71222208A)资助的课题.

[†] E-mail: pwang@ihep.ac.cn

射带电子施加人工影响的效率问题. 对于 NPM 实验的研究结果是否具有普遍性的验证工作将在以后的工作中持续进行.

2. DEMETER 卫星及其对 NPM 实验事例的观测

DEMETER 卫星是由法国国家空间研究中心 (CNES) 发射的用于研究与地震和火山活动等自然灾害有关的电磁和高能粒子现象的小卫星^[16], 运行高度大约 710 km (运行开始值). 星上载有用于测量高能电子的探测器 IDP^[17], 可测量的能量范围 70 keV—2.34 MeV, 几何因子为 $1 \text{ cm}^2 \text{ str}$, 视场角大约 30° (探测器被安装在垂直于卫星轨道的方向上). 另一载荷电场测量仪 ICE, 可对 VLF 波段电磁波的一个电场分量的功率谱进行连续的测量.

美国位于 Lualualei, HI (21.4°N , 158.2°W , $L = 1.17$) 的 NPM 发射站, 发射特征频率 21.4 kHz, 发射功率为 424 kW. 为了研究其发射的 VLF 波对空间高能电子的影响, 设计了一系列开、关机实验^[13]. 每当 DEMETER 卫星经过 NPM 高能电子沉降区 ($L = 2$) 或对应的共轭点时进行实验. 每次实验持续 30 min, 分别以 5 s 为间隔的开、关机操作. 如果电子通量在 NPM 处于开机状态 3 s 内明显增加并能持续 3—6 s 则认为与 NPM 的 VLF 信号存在相关性, 如果在 NPM 开机后的第 4—9 s 内出现电子通量增加则不被认为与 NPM 的 VLF 信号存在相关性. 大约两年时间内进行了总计 91 次实验, 在同一次实验中观测到存在两个相关性事例的共有 3 次, 得到一个相关性事例的共有 9 次, 非相关的电子通量增加事例总计 6 次, 而没有观测到电子通量增加的事例为 73 次. 虽然相关性事例相对总实验次数而言很少, 但由于出现两个相关性事例中电子通量两次增加与 NPM 的 VLF 信号显示出同样的周期性结构, 所以对这样事例的研究仍然具有重要的价值.

我们的研究工作选取了 NPM 实验期间发生在 NPM 沉降区的一次典型事例 (图 1), 该事例出现两次相关性电子通量增加. 2005 年 12 月 29 日, 在世界时 07:20:05—07:20:30 期间, DEMETER 卫星载荷 IDP 观测到相邻两次电子通量明显增加, 每次持续大约 5 s, 且都发生在 NPM 处于开机状态 3 s 内. DEMETER 上载荷 ICE 接收到的 NPM 5s 周期的 VLF 信号同时也被中途岛的信号接收站所证实. 相

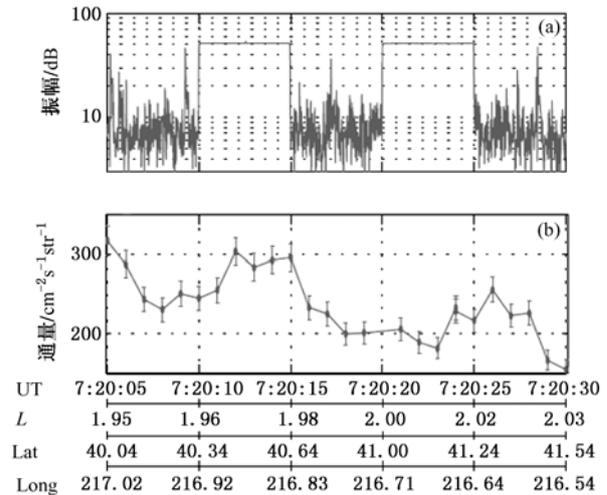


图 1 DEMETER 卫星观测到的电子沉降事例 (a) 在中途岛地面接收站观测到的 NPM 发射的 VLF 信号, 与 ICE 的观测结果呈现相同的周期结构; (b) IDP 观测到的电子通量变化, 其中电子中心能量值分别在 130 keV 和 120 keV^[13]

邻两次通量增加中的第一次出现在磁壳位置 L 大约为 2 处, 能量范围区间为 108.5—144.1 keV, 中心能量集中于 130 keV; 第二次电子通量变化出现时刻与首次变化消失间隔大约 5 s, 中心能量集中于 120 keV. 根据 DEMETER 数据, 在磁壳位置接近 $L = 2$ 处 DEMETER 5 s 大概穿越磁壳层 $\Delta L \approx 0.02$, 由此确定第二次电子沉降出现在磁壳位置 $L \approx 2.02$ 处 (向高 L 区运动).

根据 NPM 沉降区磁场情况和 IDP 在该位置的具体方位可确定 IDP 与该处磁场方向夹角为 77.9° ^[13], 考虑到 IDP 的视场角大小可知 IDP 在该处可观测的电子投掷角范围大约为 62.9° — 92.9° , 换算到磁赤道面可知沉降电子的磁赤道投掷角分布范围大约 17.7° — 19.9° . 该位置弹跳损失锥和漂移损失锥大小分别为 16.8° 和 23.5° , 由于 IDP 观测到的这些辐射带电子处于弹跳损失锥边界和漂移损失锥内, 所以在其下一个弹跳或漂移周期内将与高层大气分子碰撞而沉降. 在这个意义上说 IDP 观测到了沉降电子. 必须注意的是, 由于 IDP 没有角度分辨能力, 所以只能给出视场角内电子的投掷角范围.

由于 DEMETER 所观测到的这些沉降电子与 NPM 的 VLF 信号之间显示了同样的周期性结构, 所以我们认为这两者之间存在因果关系. 下节将从理论方面阐述辐射带电子与 VLF 之间的回旋共振及扩散机理, 并在后面的工作中用该机理来解释此次

事例中观测到的电子沉降现象.

3. 电子在辐射带中的准线性扩散理论

等离子体弱扰动的准线性理论建立于上世纪 60 年代^[18], 现如今仍在不断发展中^[14, 15, 19-21]. 基本思路是忽略等离子体粒子之间的相互碰撞, 并假定参与相互作用的等离子体波幅度足够小, 使粒子受波散射导致的粒子分布函数的时间变化尺度远远大于参与相互作用的等离子体波的周期, 以及每次散射时粒子的投掷角、能量改变都很小. 如果参与相互作用的波相位之间没有关联, 那么粒子可看作在相空间中无规行走, 粒子分布函数的演化就可用扩散方程描述. 在相空间中粒子流从高密度向低密度区域扩散, 扩散率正比于波的功率. 准线性扩散理论很好地描述了粒子扩散过程的平均特性, 但也忽略了一些非线性效应. 作为一个平均后的结果, 其一般来说弱于真实的扩散过程, 但在上述基本思路的前提下是一个很好的近似.

对于内辐射带电子, 忽略能量扩散后的基于回旋共振作用的准线性扩散方程 (Fokker-Planck 方程) 可写为^[20]

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{\sin\alpha} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(D_{\alpha\alpha} \sin \frac{\partial f}{\partial \alpha} \right), \quad (1)$$

其中 $f(\alpha, E, L)$ 是粒子相空间密度函数, 它是局域投掷角 α , 粒子动能 E , 粒子所处磁壳层 L 的函数, $D_{\alpha\alpha}$ 是局域投掷角扩散系数, 波粒共振作用的全部信息就包含在扩散系数 $D_{\alpha\alpha}$ 中, 这样对问题的认识就归结到对扩散系数的求解中来. 对于我们所研究的事例, 相当于给定电子磁壳层位置 L 和动能 E , 求局域扩散系数 $D_{\alpha\alpha}$ 对投掷角 α 的依赖关系.

不失一般性, 假设 VLF 电磁波谱密度呈高斯分布, 且在目前只考虑 VLF 沿与地磁场平行方向传播,

$$W(\omega) = \frac{|\Delta b|^2}{8\pi} \frac{1}{\rho} \frac{1}{\delta\omega} e^{-\left(\frac{\omega-\omega_m}{\delta\omega}\right)^2}, \quad (2)$$

其中 $\rho = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\omega_m - \omega_1}{\delta\omega}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{\omega_2 - \omega_m}{\delta\omega}\right) \right]$, erf 是错误函数, ω_1 是波频率下限, ω_2 是波频率上限, 频率超出上、下限则不存在 VLF 信号. 从 DEMETER 观测^[13] 可知其中心频率 $\omega_m \approx 21.4$ kHz (修正后的结果), 带宽很窄, 在此处半波带宽取值 $\delta\omega \approx 50$ Hz. Δb 是波幅度, 约为 5 pT, 并满足

$$\frac{|\Delta b|^2}{8\pi} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} W(\omega) d\omega. \quad (3)$$

VLF 波与电子的回旋共振条件为

$$\omega - vk \cos\alpha = n \frac{\Omega_e}{\gamma}, \quad (4)$$

其中 ω, k 分别为波频率和波矢, v 为电子速度, α 是投掷角. Ω_e 为电子回旋频率 $\Omega_e = Be/m_e, \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ 是相对论因子. n 取整数值, 为相互作用共振阶数, 这里只考虑占主导作用的一阶共振 $n = 1$, 高阶共振是对一阶共振的修正.

电子与 VLF 回旋共振作用的局域扩散系数可写为^[14]

$$D_{\alpha\alpha} = \frac{\pi}{2} \frac{\Omega_e}{\rho} \frac{1}{(E+1)^2} \sum_i \frac{\Delta b^2}{B^2} \frac{\left(1 - \frac{x_i \cos\alpha}{y_i \beta}\right)^2 \left|\frac{dx_i}{dy_i}\right|}{\delta x \left| \beta \cos\alpha - \frac{dx_i}{dy_i} \right|} \times \exp\left[-\left(\frac{x_i - x_m}{\delta x}\right)^2\right], \quad (5)$$

其中 $\beta = v/c, B$ 为地磁场大小, $x_m, \delta x$ 分别为约化参量 $x_m = \omega_m/\Omega_e, \delta x = \delta\omega/\Omega_e, x_i, y_i$ 为约化变量, $x_i = \omega_i/\Omega_e, y_i = ck_i/\Omega_e$, 其满足耦合条件(4)及电子-质子等离子体中 R 模式波的色散关系^[22]

$$\left(\frac{ck}{\omega}\right)^2 = 1 - \frac{1 + \epsilon}{\alpha^* \left(\frac{\omega}{\Omega_e} - 1\right) \left(\frac{\omega}{\Omega_e} + \epsilon\right)}, \quad (6)$$

其中 $\epsilon = m_e/m_p$, 是电子和质子静质量之比. $\alpha^* = \Omega_e^2/\omega_{pe}^2$ 是重要的等离子体参量, 这里 $\omega_{pe} = (N_0 e^2/\epsilon_0 m_e)^{1/2}$ 是等离子体振荡频率, ϵ_0 是真空介电常数, N_0 是背景等离子体密度.

在下节的计算中我们将只考虑电子投掷角扩散发生在赤道面, 且 VLF 沿与地磁场平行方向传播, 这样得到的是赤道面局域投掷角扩散系数.

4. 理论计算与 DEMETER 观测结果比较

根据 DEMETER 的观测结果^[13], 我们在赤道面投掷角扩散系数的计算中所用参数如下: 中心频率 $\omega_m = 21.4$ kHz, 半波带宽 $\delta\omega = 50$ Hz, 波幅 $\Delta b = 5$ pT, 赤道面地磁场大小 B 由偶极子模型给出 $B = 3.11 \times 10^{-5}/L^3 T$, 赤道面等离子体密度 N_0 在文献[23]所给范围内取值, 在 $L = 2$ 时, $N_0 = 647 \text{ cm}^{-3}$, L 不同时, 按幂律 $N_0 = 647 \times (2/L)^4 \text{ cm}^{-3}$ 变化. 需要注

意的是,受观测所限,等离子体密度并不是一个准确值,一般的计算中只考虑到不同磁壳层对应的等离子体密度变化,而在同一磁壳层等离子体密度随纬度如何变化有待更多观测数据来揭示.

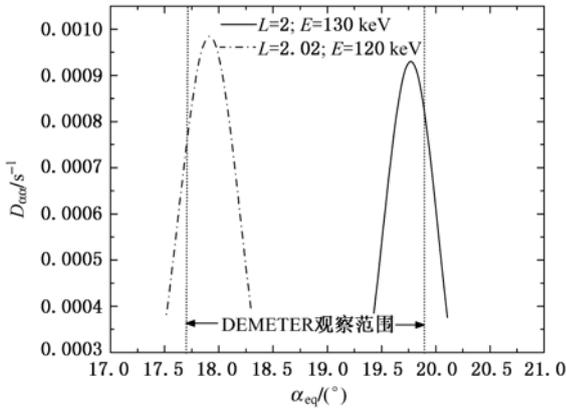


图2 赤道面投掷角扩散系数 D_{α} : 两曲线分别对应相邻两次电子投掷角散射时不同投掷角所对应的投掷角扩散系数(曲线之外区域表示该区域投掷角对应的电子不存在投掷角散射. 两竖直虚线显示了 IDP 在对应位置的视场角范围)

从图2可看出,相同磁壳位置及相同动能的电子,投掷角不同扩散效果一般也不相同,大小可相差数倍. 相对于电子磁壳位置及动能的较小变化,扩散系数绝对值变化不大,但所影响到的电子投掷角范围则明显不同. 在相邻两次投掷角散射过程

中,第一次发生在 $L = 2$,且能量集中在 130 keV,此时受影响的电子投掷角范围大约为 19.4° — 20.1° , IDP 在此位置的视场角范围为 17.7° — 19.9° . 相比较后可看到受 VLF 影响的电子投掷角在 IDP 的视场角内或附近,扩散到 19.4° — 19.9° 范围内的电子被 IDP 记录到,这就是 DEMETER 所观测到的第一次扩散时的沉降电子. 在相邻的第二次投掷角散射时,由于磁壳位置改变 $L = 2.02$,在此处能发生回旋共振作用的电子能量相应降低并集中到 $E = 120$ keV(耦合能量与 L 之间的关系见图3(b)). 这样的变化导致受影响电子的投掷角范围变为 17.5° — 18.3° ,也在 IDP 视场角内或附近,投掷角散射的结果是被 IDP 记录到的电子投掷角范围为 17.7° — 18.3° (5 s 内 IDP 的视场角范围变化忽略不计). 这样相邻两次投掷角散射影响到的电子投掷角刚好都有部分落在 IDP 的视场角内部分在其附近,经投掷角散射后表现为 DEMETER 观测到两次与 VLF 相关的电子沉降事例. 而在同一次实验中(每次实验持续 30 min)这两次之外的电子沉降事例中受影响电子的投掷角由于距离 IDP 视场角较远,经投掷角散射后没有进入 IDP 的视场角范围,所以 DEMETER 没能观测到超过两次的和 VLF 具有相关性的电子沉降事例.

这样基于波粒回旋共振作用的准线性扩散理

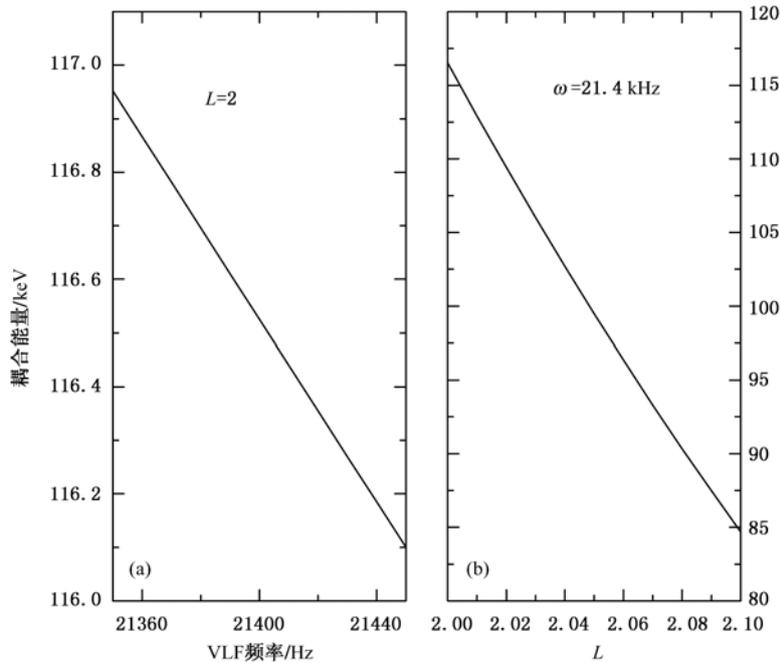


图3 耦合能量 (a) 对应于磁壳层 $L = 2$,中心频率 $\omega_m = 21.4$ kHz,半波带宽 $\delta\omega = 50$ Hz 的电子耦合能量;(b) 对应于固定频率 $\omega_m = 21.4$ kHz,磁壳层变化的电子耦合能量

论就较好地解释了在 NPM 实验期间 DEMETER 所观测到的电子沉降事例并对没能观测到二次以上的相关性事例给出了较为合理的说明.

现在从耦合能量方面来考虑 DEMETER 所观测到的电子沉降事例. 耦合能量是能与 VLF 波发生回旋共振作用的电子能量下限, 可从耦合条件(4)与色散关系(6)中得到. 分别考虑特定磁壳层 $L=2$, 中心频率 $\omega_m = 21.4$ kHz, 半波带宽 $\delta\omega = 50$ Hz 的 VLF 所影响到的电子能量范围(图 3(a))以及保持频率 $\omega_m = 21.4$ kHz 不变, 磁壳层 L 在范围 2.0—2.1 之间变化时所影响到的电子能量范围(图 3(b)). 图 3(a)与 DEMETER 的观测结果, 即沉降电子能量范围 108.5—144.14 keV 中的下限 108.5 keV 很接近. 图 3(b)则显示了在 VLF 波频率不变时随着磁壳位置增加, 能够发生耦合共振作用的电子能量则相应降低, 耦合能量从 $L=2$ 时的 116.5 keV 降低到 $L=2.02$ 时的 109.4 keV, 变化幅度约为 7.1 keV, 与 DEMETER 在对应位置上观测到的中心能量值的变化幅度 10 keV 较为接近.

从 DEMETER 观测到的 NPM 发射的 VLF 信号可以看出, 人工 VLF 源在一定空间范围内传播带宽很窄, 如果这样的性质具有普遍性, 那么对辐射带高能电子施加人工影响的效率则很低. 从图 2 中可看出与 VLF 发生回旋共振的电子投掷角局限在很小的范围内, 这样对特定磁壳层和动能电子的投掷角散射效果就很弱, 很难达到对所有电子“人工移除”的目的. 改变半波带宽 $\delta\omega$ 后的扩散系数如图 4 所示. 从中可以看出在保持功率不变的情况下, 带宽增加确实可以扩大参与回旋共振作用电子的投掷角范围, 但对应电子的扩散效率下降, 即延长了对电子“人工移除”的时间.

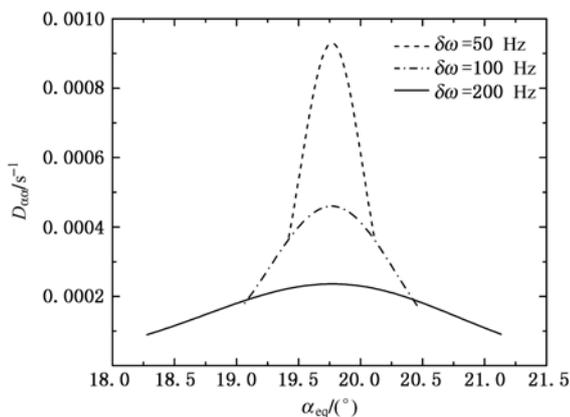


图 4 对应于不同带宽的赤道面投掷角扩散系数

5. 结 论

除了前面提到理论本身的适用范围, 我们假定了波粒回旋耦合作用发生在赤道面上, 虽然大多数情况下这是很好的近似, 但更严格的计算应该把电子在弹跳和漂移过程中的扩散过程考虑进来. 电子通量的时间演化原则上在知道扩散系数 $D_{\alpha\alpha}$ 后可得到, 但由于电子在初始时刻投掷角分布的不确定, 求解中将会引入更多的假设条件及不确定参数. 对于不同的初始电子投掷角分布所导致的电子通量时间演化的详细分析将在我们以后的工作中继续进行. 等离子体密度是理论中一个重要的参数, 其取值的不确定为理论计算结果引入了可能的不确定性. 另外我们假设了 VLF 在赤道面时与磁场方向平行传播, 考虑其他传播过程的方向性及所导致的与电子高阶回旋共振作用已被证明是对一阶回旋共振作用较小的修正^[24]. DEMETER 所观测到的 NPM 信号的频谱特性是否具有普遍性有待更多的观测事实, 其结果直接有关人工方式对辐射带电子的影响效率.

通过基于回旋共振作用的准线性扩散理论的计算与 DEMETER 观测结果对比, 我们发现该理论较好地解释了在 NPM 实验期间 DEMETER 卫星观测到的与 NPM 信号存在密切相关的电子沉降事例. 通过计算投掷角扩散系数, 可以看到相邻两次发生耦合共振的电子投掷角刚好部分落在 IDP 的视场角内部分在其附近, 这直接导致 DEMETER 所观测到的与 NPM 的 VLF 信号存在密切相关的高能电子沉降事例, 而且也解释了 DEMETER 卫星为什么在同一次实验进程中没有看到超过两次以上相关的电子沉降事例. 另外还从理论方面对在特定磁壳层, 能与特定频率的 VLF 波发生回旋共振作用的电子能量下限(耦合能量)做了具体分析, 结果表明可以和 DEMETER 卫星的观测结果较好地符合. 对于通过人工方式影响辐射带电子的设想, 我们从 DEMETER 所观测到的 NPM 信号对辐射带电子的投掷角散射效率方面进行了讨论, 其结果依赖于 NPM 信号的频谱特征是否具有普遍性. 美国将于近期发射的 Demonstration and Science Experiments (DSX) 卫星通过建立天基 VLF 发射站, 直接验证辐射带高能带电粒子与 VLF 波的相互作用机理, 对于人工方式影响辐射带电子的研究工作将会有很大

促进作用.

- [1] Van Allen J A 2004 *Origins of Magnetospheric Physics* (Iowa City: University of Iowa Press)
- [2] Horne R B 2005 *Nature* **437** 227
- [3] Baker D N 2002 *Science* **297** 1486
Baker D N, Allen J H, Kanekal S G, Reeves G D 1998 *Eos* **79** 477
- [4] Schulz M, Lanzerotti L J 1974 *Particle Diffusion in the Radiation Belts* (New York: Springer)
Falthammar C G 1965 *J. Geophys. Res.* **70** 2503
- [5] Chen Y, Reeves G D, Friedel R H W 2007 *Nature Physics* **3** 614
- [6] Abel B, Thorne R M 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 2385
- [7] Inan U S, Bell T F, Bortnik J 2003 *J. Geophys. Res.* **108** 6-1
Inan U S, Chang H C, Helliwell R A 1984 *J. Geophys. Res.* **89** 2891
- [8] Kulkarni P, Inan U S, Bell T F, Bortnik J 2008 *J. Geophys. Res.* **113** A07214
- [9] Gamble R J, Rodger C J, Clilverd M A, Sauvaud J A, Thomson M R, Stewart S L, McCormick R J, Parrot M, Berthelier J J 2008 *J. Geophys. Res.* **113** A11201
Sauvaud J A, Maggiolo R, Jacquy C, Parrot M, Berthelier J J, Gamble R J, Rodger C J 2008 *Geophys. Res. Lett.* **35** L09101
- [10] Gu X D, Zhao Z Y, Ni B B, Wang X, Deng F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6673 (in Chinese) [顾旭东、赵正予、倪彬彬、王翔、邓峰 2008 物理学报 **57** 6673]
- [11] Imhof W L 1981 *Space Science Reviews* **29** 201
- [12] Fok M C, Horne R B, Meredith N P, Glauert S A 2008 *J. Geophys. Res.* **113** A03S08
- [13] Graf K L, Inan U S, Piddychiy D, Kulkarni P, Parrot M, Sauvaud J A 2009 *J. Geophys. Res.* **114** A07205
- [14] Summers D 2005 *J. Geophys. Res.* **110** A08213
- [15] Glauert S A, Horne R B 2005 *J. Geophys. Res.* **110** A04206
- [16] Cussac T, Clair M A, Guerard P U, Buisson F, Balier G L, Ledu M, Elisabelar C, Passot X, Rey N 2006 *Planet Space Sci.* **54** 413
- [17] Sauvaud J A, Moreau T, Maggiolo R, Treilhoua J P, Jacquya C, Crosa A, Couteliera J, Rouzauda J, Penoua E, Gangloff M 2006 *Plane-tary and Space Science* **54** 502
- [18] Kennel C F, Engelmann F 1966 *Phys. Fluids* **9** 2377
- [19] Lyons L R 1974 *J. Plasma Phys.* **12** 45
Lyons L R 1974 *J. Plasma Phys.* **12** 417
- [20] Melrose D B 1980 *Plasma Astrophysics* (New York: Gordon and Breach)
- [21] Albert J M 1999 *J. Geophys. Res.* **104** 2429
Albert J M 2003 *J. Geophys. Res.* **108** 1249
Albert J M 2004 *Space Weather* **2** S09S03
- [22] Swanson D G 1989 *Plasma Waves* (New York: Elsevier)
- [23] Angerami J J, Thomas J O 1964 *J. Geophys. Res.* **69** 4537
Inan U S, Chang H C, Helliwell R A 1984 *J. Geophys. Res.* **89** 2891
- [24] Shprits Y Y, Thorne R M, Horne R B, Summers D 2006 *J. Geophys. Res.* **111** A10225

Remediation of radiation belt electrons caused by ground based man-made VLF wave^{*}

Wang Ping[†] Wang Huan-Yu Ma Yu-Qian Li Xin-Qiao Lu Hong Meng Xiang-Cheng
Zhang Ji-Long Wang Hui Shi Feng Xu Yan-Bing Yu Xiao-Xia Zhao Xiao-Yun Wu Feng
(*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 5 September 2010; revised manuscript received 28 September 2010)

Abstract

The physics mechanisms of radiation belt electrons loss and acceleration are important issues in space physics research. Recently, France Microsatellite DEMETER has discovered the correlation between man – made VLF signals and radiation belt electrons precipitation in the NPM (the U. S. VLF transmitter located at Lualualei) experiment. Our research focuses on the explanation of the relation among affected pitch angle distribution, kinetic energy and position of electrons. This is achieved by calculating the local diffusion coefficient based on the theory of quasi-linear diffusion with resonant interaction. Our result has a good explanation of radiation belt electron precipitation discovered by DEMETER during NPM experiment. Furthermore, we have discussed the efficiency of radiation belt remediation in an artificial way.

Keywords: resonant interaction, pitch angle diffusion, electron precipitation

PACS: 94. 20. wj, 94. 30. Tz

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. H71222208A).

[†] E-mail: pwang@ihep.ac.cn