

辐射带磁声波与电子的弹跳共振

李欣欣

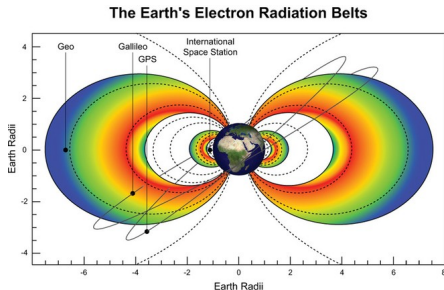
Space Physics
University of Science and Technology of China

June 11, 2015

- 1 地球辐射带
- 2 辐射带动态变化：波粒相互作用
- 3 提出一种新的波粒作用机制：弹跳共振
- 4 总结与展望

地球辐射带

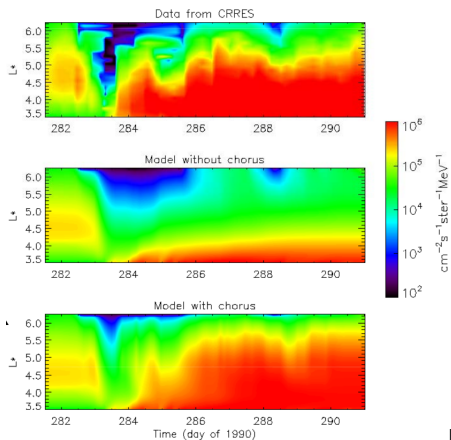
- ▶ 地球辐射带分内带和外带
- ▶ 外辐射高能电子 ($E \sim MeV$), 损毁航天器
- ▶ 外辐射带粒子通量在磁暴期间剧烈变化



— 辐射带研究主要围绕粒子的加速和损失, 而波粒相互作用是最主要的加速和损失机制

举例：合声波在磁暴期间能够显著影响电子通量变化

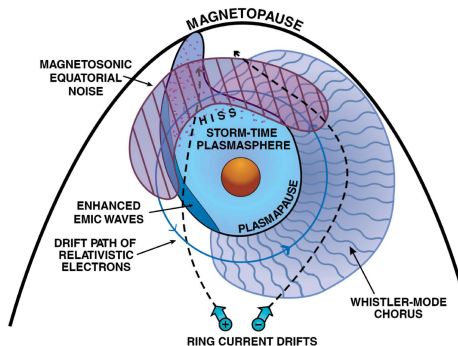
90° Particle flux ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{ster}^{-1}\text{MeV}^{-1}$) for Energy = 1090.0 keV



[Horne,2007]

- 1 CRRES 卫星测得的磁暴期间电子通量变化 (up)
- 2 未加入合声波的模型 (middle)
- 3 加入了合声波的模型 (bottom)

波粒相互作用：影响辐射带粒子通量变化的主要波模



- 目前已研究的重要波粒相互作用主要有
 - 粒子回旋运动相关的回旋共振
 - ULF 波与漂移运动的共振
- 尚缺少对弹跳共振的研究

磁声波的频率区间 $[f_{ci}, f_{lh}]$, 因此可与粒子的弹跳运动 ($f_b \approx Hz$) 发生共振

粒子通量变化：波粒相互作用引起的加速和损失

- 简化的 Fokker-Planck 方程 $\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \alpha} [D_{\alpha\alpha} \frac{\partial f}{\partial \alpha}] + \frac{\partial}{\partial E} [D_{EE} \frac{\partial f}{\partial E}]$
- 损失相关的 $D_{\alpha\alpha}$ ，投掷角 α 扩散近损失锥
- 加速相关的 D_{EE}

— 研究波粒相互作用引起的加速和损失通常参考 $D_{\alpha\alpha}$ 与 D_{EE}

根据弹跳共振模型得出投掷角扩散系数

- 电子弹跳运动 $\frac{dp_{\parallel}}{dt} + \frac{M}{\gamma} \frac{\partial B_e}{\partial z} = f(z, t)$, $M = \text{constant}$
- 弹跳运动 $s(t) = z_m \sin(\Omega_b t + \varphi_b)$, 磁声波扰动 $\sum_i f(\omega_i) \cdot \cos(\omega_i t - \mathbf{k}_i \mathbf{r} + \phi_i)$
- 当满足共振条件 $\omega = l \cdot \Omega_b$, 准线性理论下

$$\Delta W = p_{\parallel 0}/m_0 \sum_l (l/z_l \cdot J_l(z_l)) \cdot f(l\Omega_b) \cdot \cos(l\varphi_b + \phi)$$

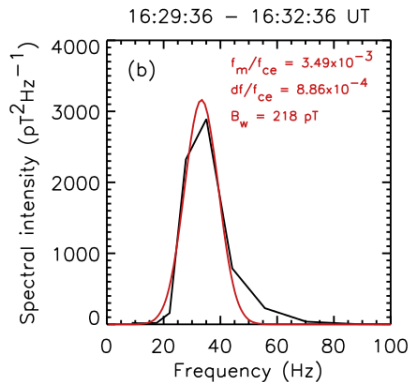
$$(\cot^2 \alpha = W/MB_{e0} - 1, W = p^2/2m_0)$$

$$D_{ww} = p_{\parallel 0}^2/m_0^2 \sum_l (l/z_l \cdot J_l(z_l))^2 \mathcal{F}(l\Omega_b)$$

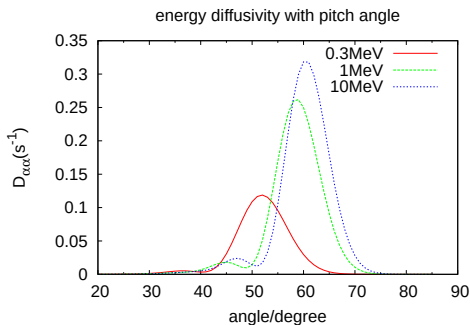
$$\text{其中 } z_l = z_m \cdot k_{\parallel l}, \omega_{\text{lower}} \leq l\Omega_b \leq \omega_{\text{upper}}$$

Then we can get $D_{\alpha\alpha}$ and D_{EE} from D_{ww}

准线性理论得到的扩散系数

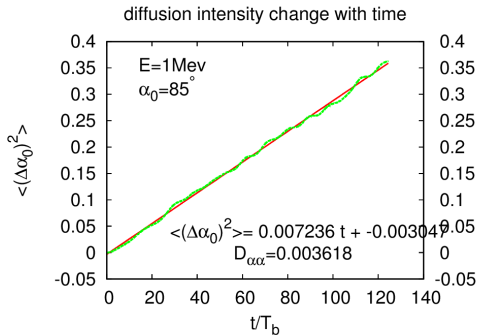
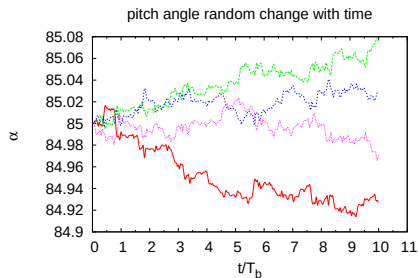


Horne,[2007] 使用的磁声波能谱



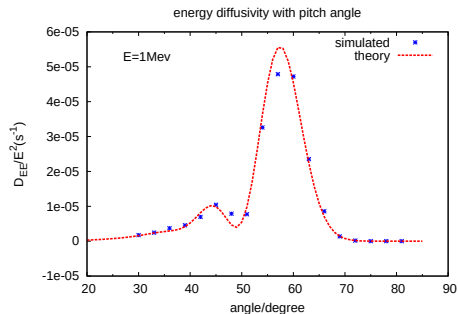
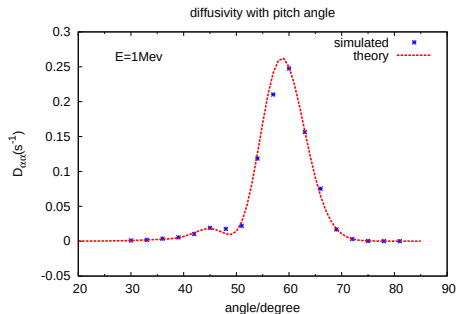
理论计算得到的投掷角扩散系数

使用测试粒子方法模拟投掷角随机散射及扩散系数 $D_{\alpha\alpha}$



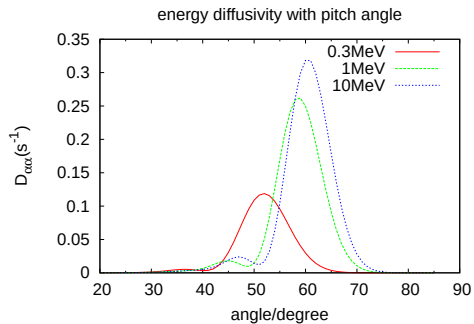
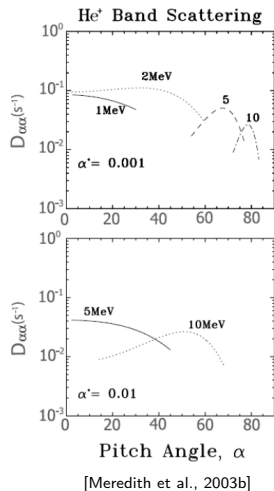
- 取多个磁赤道投掷角相同的电子，弹跳运动初相位 $\varphi_b \in [0, 2\pi]$
- 每只波的初相位也随机分布，则粒子投掷角随机散射

对比模拟得到的扩散系数与准线性理论结果



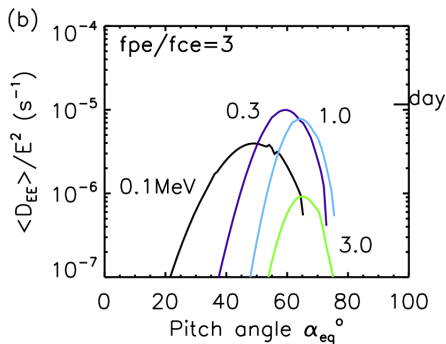
- 和理论比较吻合

对比 EMIC 与磁声波对电子投掷角的扩散系数

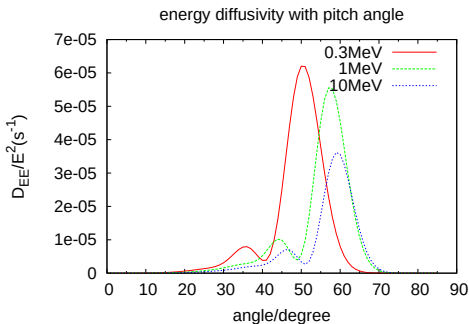


— 磁声波扩散投掷角的能力与 EMIC 波相当

对比磁声波对电子的弹跳共振和回旋共振造成的能量扩散系数



[Horne et al., 2007]



— 弹跳共振也能够显著加速高能电子

- 磁声波与电子的弹跳共振也能显著扩散辐射带高能电子投掷角以及加速电子, 因而弹跳共振也是一种重要的波粒相互作用
- 展望
 - 1 考虑真实的离散频谱的磁声波的弹跳共振
 - 2 考虑 EMIC 波和磁声波共同散射高能电子投掷角来损失粒子