

空间物理学导论I

John (1900/07)

五、无碰撞激波

1. 基本定义

激波的基本定义：一个从超声流到亚声流转变的不可逆（熵增加）波。

流速与声速的比率成为马赫数 M 。上游 $M > 1$ ，下游 $M < 1$ 。激波马赫数指激波参考系中上游的马赫数。

舷激波的位置（离地球中心的距离）

$$R = K / (1 + \epsilon \cos \theta)$$

K 约为 $25R_E$ ， ϵ 约为0.8， θ 为径向矢量与太阳方向的夹角。

阿尔文马赫数：上游沿激波法向流速与上游阿尔文速度之比 $M_A = \frac{u_n (\mu_0 \rho_u)^{1/2}}{B_u}$

声马赫数：上游流速与上游声速的比率 $M_{cs} = u_n \left(\frac{\rho_u}{\gamma p_u} \right)^{1/2}$ 。

2. 守恒关系

$$\text{质量: } [\rho u_n] = 0$$

$$\text{法向动量: } \left[\rho u_n^2 + p + \frac{B^2}{2\mu_0} \right] = 0$$

$$\text{切向动量: } \left[\rho u_n \mathbf{u}_t - \frac{B_n}{\mu_0} \mathbf{B}_t \right] = 0$$

$$\text{能量: } \left[\rho u_n \left(\frac{1}{2} u^2 + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} \right) + u_n \frac{B^2}{\mu_0} - \mathbf{u} \cdot \mathbf{B} \frac{B_n}{\mu_0} \right] = 0$$

$$\text{磁场法向分量连续: } [B_n] = 0$$

$$\text{电场法向分量连续: } [u_n \mathbf{B}_t - B_n \mathbf{u}_t] = 0$$

R-H关系

接触间断面	$u_n = 0, B_n \neq 0$	密度跃变任意，压力和其他量连续
切向间断面	$u_n = 0, B_n = 0$	压力和场改变，静态压力平衡
旋转间断面	$u_n = B_n / (\mu_0 \rho)^{1/2}$	在各向同性等离子体中，场和流改变方向，大小不变
激波	$u_n \neq 0$	穿过间断面伴随着压缩和耗散
平行激波	$B_t = 0$	磁场不受激波影响
垂直激波	$B_n = 0$	等离子体压力和磁场增加

接触间断 斜激波	$B_t \neq 0, B_n \neq 0$	密度跃变任意，压力和其他量连续
快激波		压力和场强增加，磁场和激波面法向夹角增加
慢激波		压力增加，磁场强度降低，磁场偏向激波面的法向
中间激波		磁场在激波面处旋转180度，只在各向异性等离子体中存在密度跃变

3. 平行激波和垂直激波

严格平行激波：上游磁场平行于激波法向，即 $\mathbf{B}_u = B_n \hat{n}, \mathbf{B}_{ut} = 0$ 。得到 $\mathbf{B}_{dt} = 0$ 。场的方向不随激波改变，总磁场不随激波改变。磁场对激波不起作用。

严格垂直激波：上游场垂直于激波法向， $B_n = 0, \mathbf{B}_u = \mathbf{B}_{ut}$ 。跃变条件 $u_{un} \mathbf{B}_{ut} = u_{dn} \mathbf{B}_{dt}$ 。穿过激波存在非零质量流 $\rho_n u_{un} = \rho_d u_{dn} \neq 0$ 。压缩比 $r = \frac{\rho_d}{\rho_u}$ 在高马赫数极限下 $r = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}$ 。

准平行激波和准垂直激波的性质

加热机制：看课本

六、太阳风和行星磁层相互作用

1. 行星磁场

地球磁场具有偶极子场的特性，偶极矩大约为 $8 \times 10^{15} \text{ T} \cdot \text{m}^3$ 即 $30.4 \mu\text{T} \cdot R_E^3$ ，与地球自转轴大约有 11° 夹角。

球坐标下：

$$\begin{aligned} B_r &= 2Mr^{-3} \cos \theta \\ B_\theta &= Mr^{-1} \sin \theta \\ B &= Mr^{-3} (1 + 3 \cos^2 \theta)^{1/2} \end{aligned}$$

直角坐标下：

$$\begin{aligned} B_x &= 3xzM_z r^{-5} \\ B_y &= 3yzM_z r^{-5} \\ B_z &= (3z^2 - r^2)M_z r^{-5} \end{aligned}$$

M_z 为沿 z 的磁矩。

磁力线方程

$$\begin{cases} r d\theta / B_\theta = dr / B_r \\ d\varphi = 0 \end{cases}$$

可得 $r = r_0 \sin^2 \theta$ 。 r_0 是原点到磁力线与赤道面交点的距离。通常以行星半径归一的 L 和磁纬 λ 表示

$$r = L \cos^2 \lambda$$

令 $r = 1$ ，得到不变维度，即磁力线与地球表面相交点的纬度

$$\Lambda = \cos^{-1}(1/L)^{1/2}$$

广义行星磁场用偶极子描述不够精确，可用Legendre展开。

2. 磁层顶距离

太阳风施加给磁层顶的压力：绝热流的伯努利积分 $\frac{u^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} = \text{const}$ ，考虑到磁层顶的速度为零有 $\frac{p_s}{p} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)}$ ，激波的影响 $K = \frac{p_s}{\rho_\infty u_\infty^2} = \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \frac{1}{\gamma[\gamma - (\gamma-1)/2M_\infty^2]^{1/(\gamma-1)}}$ 。磁层有效多方指数经验值约为5/3，太阳风马赫数在1 AU处大约为6。

假定太阳风压力和磁层压力处于平衡状态：

$$K\rho_\infty u_\infty^2 = \frac{(aB_0)^2}{2\mu_0 L_{mp}^2}$$

B_0 是行星赤道面磁场， L_{mp} 是以行星半径为单位的磁层顶距离。对于地球， $a = 2.44$

$$\begin{aligned} L_{mp}(R_E) &= 8.53a^{1/3} (K\rho_\infty u_\infty^2)^{-1/6} \\ &= 107.4(n_{sw} u_{sw}^2)^{-1/6} \end{aligned}$$

第一行括号内的单位为纳帕斯卡，典型的太阳风动量为2.6 nPa，磁层顶根据观察在大约10 R_E 处。 n_{sw} 是质子数密度， u_{sw} 是太阳风速度（单位km/s）。

3. 磁层腔形状

计算磁层腔形状时需要确定磁鞘中压力的分布。

只考虑法向压力，可能是泪珠状。Beard得到的磁层向日侧形状，在极区上空的磁层顶比赤道区的磁层顶更接近地球。不足：没有考虑切向压力，忽略了磁层内部电流对磁场的贡献。可用于处理水星磁层。

切向压力将动量传输给等离子体，并使其向磁尾方向移动。产生切向压力：粒子从磁鞘向磁层的扩散、磁层中运动引起的边界层波动、磁鞘粒子的有限回旋半径、行星际磁力线与行星磁力线反向重联。这些过程将磁通量和等离子体由磁层向阳侧传输到背阳侧，可改变磁层的形状。

磁尾的极限宽度：假定尾瓣是半圆形的，其磁通量为 $F_T = \frac{\pi R_T^2}{2} B_T$ ，利用磁尾的磁压与太阳风的热压和磁压相平衡，磁尾的渐进半径 $R_T^2 = 2F_T / (\pi^2 \mu_0 p_{sw})^{1/2}$ ，其中 p_{sw} 包含热压和磁压。

八、等离子体与非磁性物体的相互作用

类月：由绝缘物质组成，能直接吸收碰撞到它身上的等离子体。没有舷激波，磁场以极快的速度将等离子体扩散到弱导电的星体外表层中，上游磁场方向几乎不改变。等离子体与星体相互作用形成尾迹。

有大气无磁场：金星、火星。

九、磁层顶，磁尾和磁重联

电流片：一个薄表面，通过这个表面磁场强度或方向会发生显著的变化。从安培定律看，此表面一定带有显著电流。

磁层顶：磁层上边界，把源于地球的等离子体和磁场与太阳风等离子体分开来。其磁场强度由下式决

$$\text{定：} \rho_{sw} u_{sw}^2 = B_{ms}^2 / (2\mu_0)$$

Chapman-Ferraro电流层：微观解释

磁尾：地球磁层背阳面向后延伸的区域。

张开：在典型太阳风参数下， $R_0 = 18R_E, x_0 = 10R_E$ ，得到 $R_* \sim 27R_E, x_* \sim 140R_E$ ，渐近的瓣场强度为 9nT 。

磁场重联：磁重联是方向相反的磁力线因互相靠近而发生的重新联结的现象，在此过程中系统将磁能转换为带电粒子动能，是磁能释放的主要机制。

Dungey循环：描述

重联流体描述，简单了解，坡印廷矢量，入流速度出流速度

粒子运动轨迹：重联区域粒子运动反转。

十、磁层结构

电流体系：磁层顶Chapman-Ferraro电流，Birkeland电流将部分环电流联接到电离层

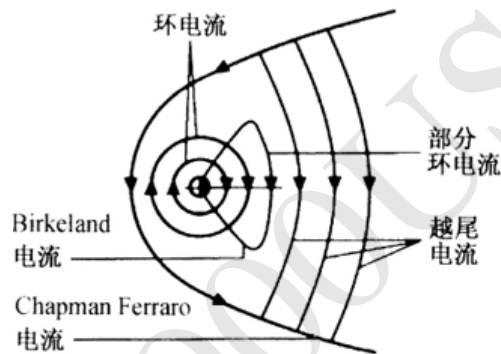


图 10.2 地球磁层内的主要电流类型
从北极向下看的磁赤道面分布, 太阳在左侧

磁层分区：

尾瓣：等离子体密度稀薄，小于 0.1cm^{-3} ，电子和离子谱软，高能粒子少。有尾向的冷离子流。磁力线开放。

等离子体片边界层：有典型密度 0.1cm^{-3} ，有相向运动的离子束。磁力线可能是闭合的。

等离子体片：典型密度 $0.1 \sim 1\text{cm}^{-3}$ ，典型的流体速度很小，磁力线大多数情况下是闭合的。

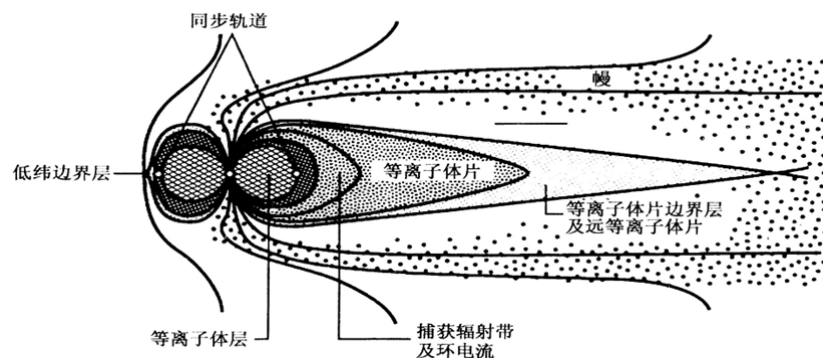


图 10.4 地球磁层等离子体区域在午-夜子午面的分布图
等离子体层占据了辐射带所在空间的大部分区域。通常在等离子体片内边缘和捕获辐射带外边界之间或基本上没有间隙

同步轨道：离地心大约 $6.6R_E$ ，并在地理赤道面。是许多卫星的工作区域。

辐射带：距地面1000 km高度到距地心 $6R_E$

粒子运动，绝热不变量，回旋、弹跳、漂移

十一、脉动与磁流体力学波

脉动：有些波是连续脉动的，具有准正弦的形态，都具有确定的谱峰，这种脉动称为Pc脉动，分为5个亚类。另一类脉动处在相同的频率范围内却包含了许多不同频率的功率谱峰，称为Pi脉动。

Alfvén波

快磁声波

慢磁声波

波能来源：磁层顶两侧的流场剪切可以激发表面波，称为Kelwin-Helmholtz不稳定性。这种表面波压缩磁层，扰动产生的压缩波随着横越磁场而衰减或横越磁场传播。太阳风中的激波通过磁层顶产生磁层顶位移，向阳面随时间变化的重联过程。太阳风中的波动通过对流穿过舷激波，把能量带入磁层中。波和粒子相互作用。

十二、等离子体波

双流不稳定性：
$$\frac{\omega_{pi}^2}{\omega^2} + \frac{\omega_{pi}^2}{(\omega - ku_0)^2} = 1$$

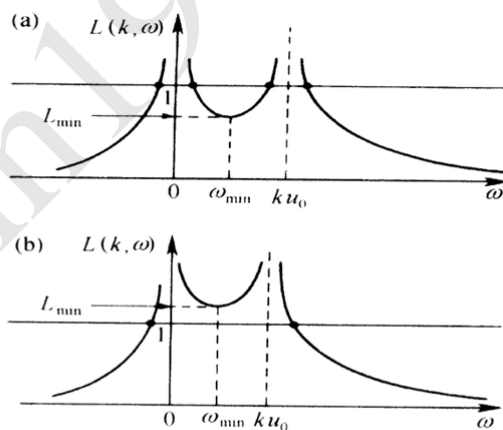


图 12.5 方程(12.46)左边的图示
(a) $L_{min} < 1$ 的情形, 解为四个实根。(b) $L_{min} > 1$ 的情形, 解为两个实根和两个复根

未磁化等离子体，解释电磁波反射：
$$n = \sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}}$$

磁化等离子体中的电磁波：

$\mathbf{k} \perp \mathbf{B}_0$: (1) $\mathbf{E}_1 \parallel \mathbf{B}_0 \rightarrow$ O模 $\omega^2 = \omega_{pe}^2 + k^2 c^2$; (2) $\mathbf{E}_1 \perp \mathbf{B}_0 \rightarrow$ X模 $n^2 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \frac{\omega^2 - \omega_{pe}^2}{\omega^2 - \omega_{UH}^2}$

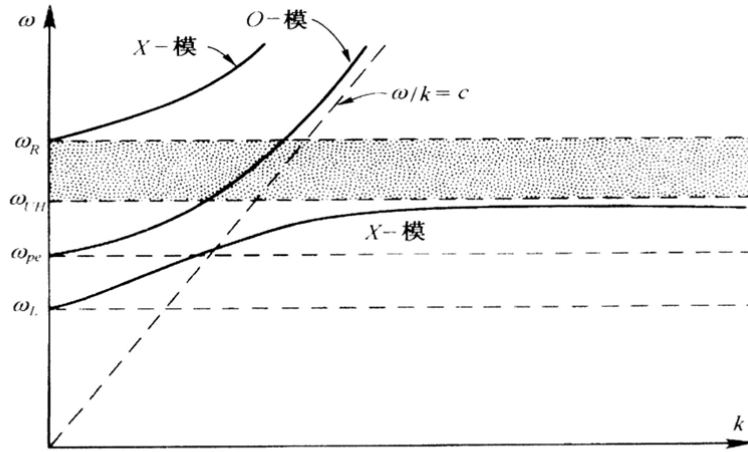


图 12.13 磁化冷等离子体中垂直传播的寻常 O 和异常 X 电磁波的色散关系图
禁止带把两个 X 模频段分隔开

$$\mathbf{k} \parallel \mathbf{B}_0: \text{左旋、右旋 } n^2 = 1 - \frac{\omega_e^2 / \omega^2}{1 \pm \Omega_{ce} / \omega}$$

哨声波：频率低于 $|\Omega_{ce}|$ 的右旋波。由闪电放电引起，观测者收到的波的频率随时间逐渐降低，就像哨声一样。

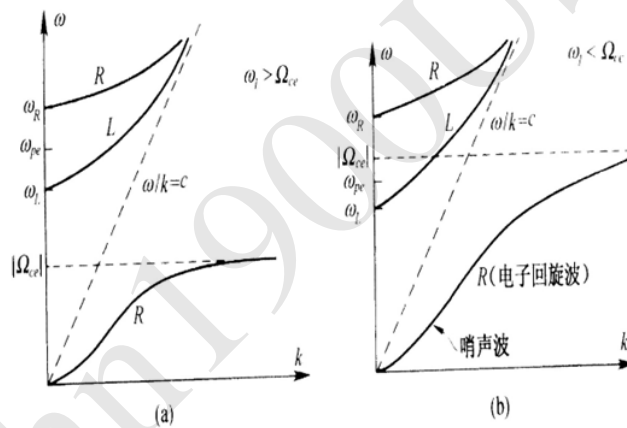


图 12.15 磁化冷等离子体中平行传播的电磁波色散关系图

(a) 左旋截止频率 ω_L 大于电子回旋频率。(b) 左旋截止频率 ω_L 小于电子回旋频率。右旋波有两个“传输带”，被一个“禁止带” $\Omega_{ce} < \omega < \omega_R$ 分开。左旋波只能在 $\omega > \omega_L$ 范围内存在

斜传播：

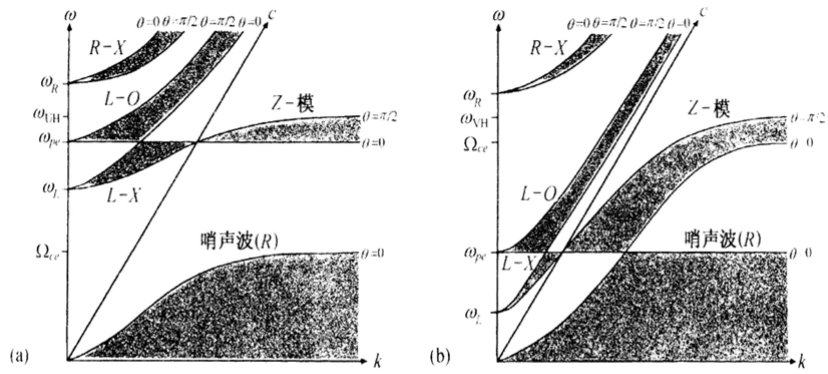


图 12.17 阿普立顿-哈特尔特色散关系图

阴影表示斜传播区域。(a)电子等离子体频率大于电子回旋频率,(b)电子等离子体频率小于电子回旋频率

朗道共振： $\omega = k_{\parallel} v_{\parallel}$ 。一个以波的相速度运动的粒子将感觉到波动电场是一个常数，因此将被此电场加速。速度与相速度快或慢得多的粒子感受到一个平均效应为零的电场。速度和相速度相近的粒子，比相速度快的失去能量，比相速度慢的得到能量。在麦克斯韦分布中，速度慢的粒子更多，粒子从波获得能量，即朗道阻尼。

回旋共振： $\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} = \pm \Omega_{i,e}$ 。与波动垂直电场有关。使粒子投掷角改变，投掷角扩散。

十三、磁层动力学

磁层亚暴：当行星际磁场出现南向分量，由太阳风流入磁层的能量增加时，磁层、电离层内发生的有序事件即为亚暴。亚暴最显著的表现极光，电离层的电流引起地面磁场强扰动。一次亚暴过程的持续时间约为1-3小时。

亚暴由两种过程叠加形成：一种是太阳风的直接驱动，另一种是由驱动过程储存在磁层内的能量的卸载。

增长相、膨胀相、恢复相。

磁暴：当太阳风与磁层的相互作用耦合增强、时间延长，地磁活动增强并将发展成磁暴。

D_{st} 指数：全球赤道H分量扰动的瞬时平均值。

初相：磁场增加，几个小时；主相：强烈扰动的 D_{st} 突然下降，比较短；恢复相： D_{st} 复原，漫长，几天。

十五、外行星的磁层