

# “火星快车”下视雷达对火星电离层探测简介<sup>\*</sup>

王明远<sup>†</sup> 平劲松 张素君 严豪健

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

**摘要** 火星是近年来深空探测的热点,对火星电离层的观测和研究是火星探测的主要内容之一.欧洲航天局2003年发射了火星探测器“火星快车”,它所搭载的下视雷达 MARSIS(火星地表和电离层探测雷达)为火星电离层探测提供了大量数据,文章简单介绍了利用 MARSIS 探测火星电离层的基本原理,探测数据的结构和利用这些探测数据进行电离层研究的现状.

**关键词** 火星地表和电离层探测雷达<sup>1)</sup>(MARSIS),“火星快车”(MEX),电离层,火星

## Detection of the Martian ionosphere by MARSIS onboard Mars Express

WANG Ming-Yuan<sup>†</sup> PING Jin-Song ZHANG Su-Jun YAN Hao-Jian

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

**Abstract** The first Martian mission of the European Space Agency, Mars Express, was launched on 2 June 2003. During its normal scientific phase, a low frequency topside radio wave sounder (MARSIS) on board Mars Express probed the Martian ionosphere and collected a vast amount of data. We provide a brief review of the fundamental principles of Martian ionosphere detection based on MARSIS, the structure of the data, and current research results obtained from the data.

**Keywords** MARSIS, MEX, ionosphere, Mars

### 1 引言

在20世纪60年代,国际上开始了对太阳系内各类星体的探测.近年来先后对月球、火星、小行星、太阳系其他行星、彗星等天体进行了全方位、多手段的探测,对它们的地质和地貌特征、化学成分、物理性质和空间环境进行了深入的研究,从而开始了行星系统的形成和演化过程的研究.这些观测和研究是人类寻求解决地球生命起源这一基本问题的另一个途径.火星作为太阳系中一颗拥有诸多与地球相似特征的重要类地行星,对它的现状和演化过程的研究,可以为认知和探索地球环境的变化趋势提供珍贵的参考信息;也可以通过研究火星上的水和生命在过去、现在的存在状况,探索维持生命存在和延续的物理条件,从而为人类开辟新的生存空间提供参考<sup>[1]</sup>.

近几年中,人类进行火星探测的计划主要有以下几个:1996年的MGS(Mars Global Surveyor)<sup>[2,3]</sup>,

1997年的Mars Pathfinder<sup>[4,5]</sup>,2001年的Mars Odyssey,2003年的MEX(Mars Express,又称火星快车)<sup>[6]</sup>,以及同年发射的Mars Exploration Rover Mission<sup>[7]</sup>上的火星车Opportunity和Spirit.这些探测工作获得了大量的科研数据,涌现出一系列的新发现,为人类认识和了解火星做出了巨大贡献.

2003年发射的火星快车是欧洲航天局(European Space Agency,ESA)的第一个火星探测计划,它首次携带下视雷达对火星的电离层进行了深入的探测,获取了丰富的数据,本文将就此进行简要介绍.

<sup>\*</sup> 中俄火星联合探测计划“YH-1”项目;国家高技术研究发展计划(批准号:2008AA12A209,2008AA12A210)、国家自然科学基金(批准号:10973031)资助项目;中国科学院重要方向项目(批准号:KJCX2-YW-T13-2)

2009-08-11收到初稿,2009-09-21收到修改稿

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email:mywang@shao.ac.cn

1) MARSIS的中文译名尚未最后确定

## 2 火星电离层概况

根据目前已有的和有限的的数据,对火星的上层大气物理状况已经有了基本的认识.火星的电离层是一个高度较低、“发育不全”的电离层,它的结构直接受到火星内禀磁场变化的影响.在火星内禀磁场强的地方,其电离层受到严密的保护;而在火星磁场弱的地方,太阳风则直接作用于它的电离层.根据太阳风对火星电离层影响的强弱差异,在 300—500km 之间形成火星电离层顶这一特殊结构<sup>[8-10]</sup>.在这一高度范围内的中性大气几乎全部由氧原子组成,密度为  $10^7-10^6\text{ cm}^{-3}$ <sup>[11]</sup>.然而,这一高度范围内的电离层并不是由本地氧原子光化电离产生的,而是由低高度的  $\text{O}_2^+$  离子向上扩散时产生的<sup>[12]</sup>.电离层顶部等离子体标高约为 38km.在 200km 附近,大气标高和中性粒子的平均自由程大致相同,这是火星外大气层(外逸层)的基础.电离层上层峰值电子密度为  $(1.5-1.7)\times 10^5\text{ cm}^{-3}$ ,峰值高度在 125—135km 之间,中性大气标高约为 10km;电离层下层峰值电子密度约为  $4\times 10^4\text{ cm}^{-3}$ ,峰值高度在 90—110km 之间.在 80km 以下,大气层中的电离部分已经可以忽略不计.同时,电离层的峰值高度随太阳天顶角的增大而增大,峰值密度随太阳天顶角的减小而迅速增加.这些事实表明,在 160—180km 以下的火星电离层,其主要部分很接近光化学平衡,是一个 Chapman 层;在此高度以上的电离层的物理过程,就需要考虑动力学过程和热层的耦合效应<sup>[13,14]</sup>.这是火星日间电离层的基本概况.而关于火星夜间电离层的情况,由于缺少足够的观测,人类对其了解甚少,还需要进一步的观测.

上述有关火星电离层特性的数据来源于星一地无线电掩星观测.然而,由于地球与火星之间空间几何构型和探测器轨道设定的限制,星一地火星大气掩星观测得到的火星大气的科学数据主要分布在纬度  $65^\circ$  以上的高纬度地区和极地上空;太阳高度角也限制在约  $48^\circ-132^\circ$  的范围内<sup>[15]</sup>.同时,由于掩星方法本身的局限性,反演所得到的廓线密度不能研究大气层的高频变化,且没有水平分辨能力. MEX 携带的星载下视雷达正可以弥补这些缺陷.因此,对火星电离层的昼夜变化特征和火星大气层与太阳风的相互作用进行探测被设定为 MEX 的主要科学任务之一<sup>[6]</sup>,火星地表和电离层探测雷达(Mars advanced Radar for subsurface and ionosphere

sounding, MARSIS)成为 MEX 计划的主要科学任务载荷之一<sup>[16]</sup>.

## 3 MARSIS 简介

### 3.1 MARSIS 的科学目标

MARSIS 是一个多频率合成孔径下视雷达,它在地下探测时发射的是大带宽的线性调频信号,只是在电离层探测时发射扫频信号.

MARSIS 火星地表探测的主要科学目标是探测火星壳层上部分的固态水和液态水分布<sup>[17]</sup>.确定火星上的水含量是火星水文、地质、气候和可能的生物演化方面的关键问题.研究过去和现在的火星全球水总量,水的传输和它的物理存储机制,液态水和冰在火星地形变化上的作用,表面液态水和冰的稳定性,可以反映出火星气候情况和火星可能存在的生态系统演化过程中的水文历史<sup>[18]</sup>.

此外, MARSIS 还包括以下 3 个二级目标:地表以下的地质探测、表面构造探测、电离层探测.第一,探测火星表面以下的三维地质结构的特征和分布;第二,获得火星表面信息;第三,利用 MARSIS 探测电离层和包括电离层在内的火星上层大气与太阳风的相互作用特征.用雷达研究电离层可获得全球覆盖的电离层电子密度分布,太阳和太阳风对电离层的影响等统计结果<sup>[18]</sup>.

### 3.2 MARSIS 电离层探测的基本原理

当频率为  $f$  的雷达信号在其传播途径上要经过等离子体振荡频率为  $f_p$  的电离层时,若  $f < f_p$ ,则信号不能够穿过此部分电离层;若  $f > f_p$ ,信号将穿透此部分电离层继续传播;  $f = f_p$  时,信号将被反射.其中等离子体振荡频率为  $f_p = 8980\sqrt{n_e}\text{ Hz}$ ,  $n_e$  为电子数密度.

对于一个水平分层的电离层,当不同频率的雷达信号垂直入射电离层时,电离层每一层的分界面都能很好地反射频率等于该层等离子体振荡频率的雷达信号.这说明,在电离层水平分层的假设下,可以通过记录雷达信号发射到信号回波返回之间的时间差来推断不同分层的电子数密度.当雷达信号的频率大于最大的等离子体振荡频率  $f_p(\text{max})$  时,信号将穿透整个电离层,进一步下行探测火星的地表及地表以下的结构.当雷达信号的频率等于探测器所在位置处的等离子体振荡频率  $f_p(\text{local})$  时,信号的电磁辐射将引发本地等离子体的共振,产生雷达接收器可以探测的谐波信号.这就是 MARSIS 探测

火星电离层的基本原理,如图1所示。

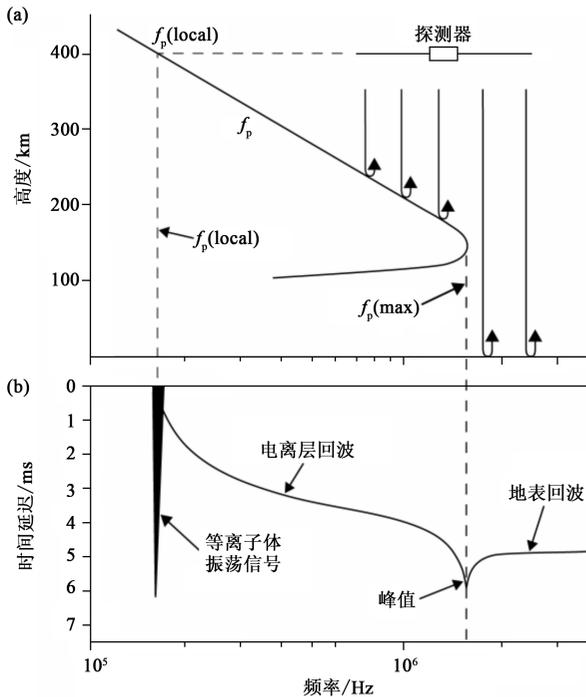


图1 (a) 电子密度剖面及雷达工作原理示意; (b) 理想情况下MARSIS回波信号示意(引自文献[15])

在MARSIS电离层测量中,使用上述雷达信号测量电离层反射点的垂直距离,得到距离与频率的对应关系(具体方法见本文4.1节)。测量时,探测器的频率范围从0.1MHz到5.4MHz,共160个频率,频率级差为10937Hz。探测器从低频到高频发射一系列正弦脉冲信号。对每个频率信号,探测开始时天线发出正弦脉冲,且脉冲持续时间为91.43 $\mu$ s;脉冲发射结束后从第58.57 $\mu$ s起,天线开始探测回波;回波探测分为80个窗口,每个窗口也持续91.43 $\mu$ s,共7314.3 $\mu$ s;最后经过227.7 $\mu$ s的空闲,完成一个频率的探测。这样,探测器依次遍历各个频率,得到一帧电离图数据,历时1.23s。两次扫频之间的时间间隔为7.38s。MARSIS的时间历程如表1所示。

表1 MARSIS扫频工作的基本参数

$\Delta t_0$	脉冲延迟时间	91.43 $\mu$ s
$R_0$	垂直分辨率	13.71km
$\Delta t_1$	两相邻脉冲间隔时间	7.692ms
$\Delta f_B$	带宽	10937Hz
$\Delta f_{\min}$	最小频率	0.1MHz
$\Delta f_{\max}$	最大频率	5.4MHz

实际上,在1200km以下,MARSIS探测电离层的操作方式有两种:连续方式和交叉方式。连续操作

方式是指:从探测器高度降到1200km以下开始,一直到它的高度重新升高到1200km为止,对电离层进行连续的探测。这种方式提供了一个连续的电离层扫频探测序列,在水平方向上得到很好的空间分辨率。在连续扫的频率序列中,没有留出地表及地表以下扫描探测的时间,这种方式相对较少使用。常用的方式是:在探测器绕行火星一周的过程中,从探测器飞行高度下降至1200km开始进行电离层观测;若观测过程中,探测器的太阳天顶角接近或者大于90 $^\circ$ 时,即探测器位于火星夜半球时,MARSIS进行地表及地表以下的探测;当探测器重新进入日半球,直到它高度升高至1200km为止,再次进行电离层观测。此种方式称之为交叉操作方式。然而上述交叉方式并不是绝对的,MARSIS的探测模式几经调整,上述是其最常见的操作方式。

MARSIS进行火星电离层探测,不仅有助于了解电离层本身的特征和变化规律,还在火星地表以下部分的探测中起着非常重要的作用。电离层电子密度信息可以用来解释和优化地表以下的探测结果。虽然当探测器发射的雷达信号频率大于 $f_p(\max)$ 时,信号可以穿透电离层进行地表和地表以下的探测任务,但是电离层仍然会给信号带来明显的衰减、色散以及信号失真。电离层造成的信号改变与电离层的等离子体振荡频率相关,通过分析火星电离层的结构信息,特别是电子密度的变化,可以对电离层影响进行建模和改正<sup>[19]</sup>。另一方面,从MARSIS地表或地表以下探测的回波中,可以分离出火星电离层的总电子含量(total electron content, TEC)和中性大气标高,这不仅是首次对火星电离层总电子含量及其分布进行探测,而且探测结果中还包含了火星夜间电离层的大量信息,丰富了对火星电离层结构的了解<sup>[20]</sup>。

### 3.3 MARSIS 电离层探测数据示例

MARSIS于2005年5月10日开始进行电离层的探测工作,至今已获取了大量的电离图。在理想情况下,可以获得如图1(b)所示的三种信号:(1)探测器所在位置等离子体振荡产生的等离子体谐波信号 $f_p(\text{local})$ ;(2)水平分层的电离层反射雷达信号所得的回波信号,从 $f_p(\text{local})$ 到 $f_p(\text{max})$ 可以看到渐变的电离层回波轨迹;(3)地表反射雷达信号所得的地面回波信号,从雷达信号穿透电离层的 $f_p(\text{max})$ 开始到最大信号频率处可以看到地面回波信号。在电离层回波和地面回波的交汇处,以 $f_p(\text{max})$ 为中心频率出现了一个尖锐的突起,它形成的原因是在

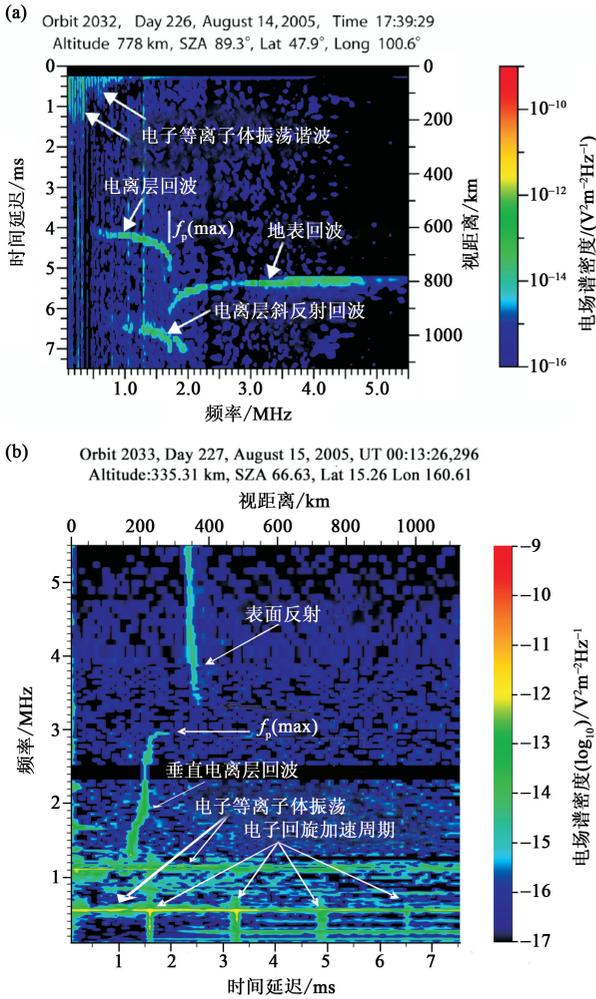


图 2 (a)电离图示例一<sup>[15]</sup>; (b)电离图示例二

$f_p(\max)$ 处电磁波的群速度相对于增加的距离而言较小<sup>[15]</sup>.

MARSIS 观测到的真实电离图与理想情况有所不同,如图 2 所示.在图 2(a)中,可以清楚地看到,除了前述三种信号外,还出现了电离层的斜反射回波信号.在图 2(b)中,没有接收到地面反射信号,但却出现了另外一种非常强的信号,电子回旋加速周期产生的周期性信号.这种信号是电离层中带电子在磁场中做周期性的圆周运动,即电子的自旋导致的.通过测量此种信号的周期,可以获得探测器所在处的磁场强度.

## 4 MARSIS 数据的电离层研究现状

### 4.1 火星顶部电离层的电子密度廓线

从 MARSIS 电离层探测数据中得到火星电离层信息的关键是,将探测数据中的电离层回波转换

成电子密度廓线.探测器所发出的雷达信号在电离层中传播的过程,是雷达信号在等离子体媒介中的传播过程,假设一定高度范围内的电离层是均匀的等离子体,忽略中性碰撞的影响,根据色散方程,容易得到等离子体中电磁波的群速度  $v_g$ :

$$v_g = c \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}}, \quad (1)$$

其中  $f_p$  为等离子体媒介的振荡频率,  $f$  为电磁波的频率,即雷达信号的频率,  $c$  为真空中的光速<sup>[21]</sup>.

按照等离子体振荡频率不同对电离层分层,并对每一层中雷达信号的传播时间  $dt$  积分,可得到从探测器发出雷达信号到电离层对该雷达信号的垂直反射回波被探测器接收到的时间延迟  $t_{\text{delay}}$ ,

$$t_{\text{delay}} = 2 \int_0^{z_{\text{refl}}} dt = 2 \int_0^{z_{\text{refl}}} \frac{dz}{v_g}, \quad (2)$$

即时间延迟  $t_{\text{delay}}$  和雷达信号频率  $f$  有如下函数关系:

$$t_{\text{delay}} = \frac{2}{c} \int_0^{z_{\text{refl}}} \frac{dz}{\sqrt{1 - (f_p/f)^2}}, \quad (3)$$

其中  $z$  是沿信号传播方向从探测器到积分点之间的距离,  $z_{\text{refl}}$  是在信号反射点的  $z$  值,即为信号反射点到探测器的距离,如图 3 所示.在(3)式中,除了前述基本假设外,探测器信号及反射信号都是沿探测器天底方向传播的,即为垂直反射.

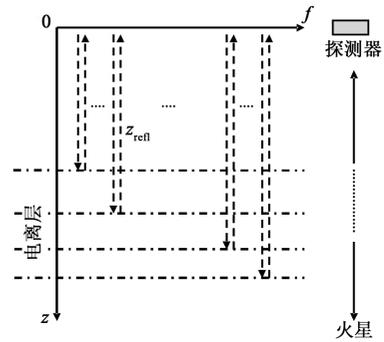


图 3 电离层中雷达信号反射示意

关于(3)式解法的讨论很多; Budden 于 1961 年提出了基于 Abel 积分方程的解析解; Jackson 于 1969 年在电离层水平分层的假设下给出了层叠算法; 在 20 世纪 60 年代, Titheridge 等提出用多项式表述实际距离  $z$  与等离子体振荡频率  $f_p$  之间的关系,并据此给出(3)式的解; Zou 等对 Jackson 和 Titheridge 的方法进行比较,指出在火星电离层分析中,层叠算法的结构明显优于多项式方法.本文在此不进行具体公式推导,只给出基于层叠算法得出的(3)式的解<sup>[22]</sup>:

$$t_{\text{delay},j} = \sum_{i=0}^j \Delta t_{\text{delay},i,j} = \sum_{i=0}^j \frac{1}{\alpha_j} \ln \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - (f_{s,i}/f_{s,j})}}{1 + \sqrt{1 - (f_{s,i}/f_{s,j})}} \cdot \frac{1 + \sqrt{1 - (f_{s,i-1}/f_{s,j})}}{1 - \sqrt{1 - (f_{s,i-1}/f_{s,j})}} \right], \quad (4)$$

其中电离层被划分为多个分层,  $z_{j-1}$  是第  $j$  段电离层分层的起始点,  $\alpha_j$  是第  $j$  段电离层分层的指数常数. 下标  $j$  用来指定每一个雷达脉冲信号的频率和它相应的延迟时间. 对于每一个  $t_{\text{delay},j}$ , 相应探测信号的频率为  $f_{s,j} = f_p(z_j)$ .  $\Delta t_{\text{delay},i,j}$  是第  $j$  个雷达脉冲信号的频率经过第  $i$  段电离层分层的延迟时间,  $0 \leq i \leq j$ . 注意, 式中当下标  $i$  为 0 时, 表示的是探测器所在位置处的相应物理量. 由于  $f_p(z_0)$  已知, (4) 式可以组成含有  $j$  个未知数  $\alpha_j$  和  $j$  个方程的方程组, 解方程组即可.

根据(4)式计算, 可以得出电子数密度与测量点高度的对应关系. 根据已知的火星电离层情况, 在火星电离层水平分层的假设下, 可用 Chapman 模型来描述火星电离层的部分情况. Chapman 层的电子密度廓线可用公式表示如下:

$$n_e = n_0 \exp \left[ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{h - h_0}{H} - \text{Ch}(x, \chi) \exp \left( -\frac{h - h_0}{H} \right) \right) \right], \quad (5)$$

式中  $h$  为对应电子数密度测量点的高度 (且  $h = Alt_{sc} - z$ ,  $Alt_{sc}$  为探测器高度),  $H$  为中性大气的标高,  $n_0$  为电子数密度的最大值,  $h_0$  为电子数密度达到最大时的测量点高度,  $\text{Ch}(x, \chi)$  为 Chapman 函数 (这里  $x = (h + R_M)/H$ ,  $R_M$  为火星半径,  $\chi$  为 MEX 的太阳天顶角). 用 Chapman 模型对电子密度-高度的测量数据进行拟合, 拟合参数为  $n_0, h_0, H$  [23, 24].

根据拟合结果, 统计电子密度廓线的峰值高度和密度与  $\chi$  之间的关系如图 4 所示. 当  $\chi$  接近  $90^\circ$  时, Chapman 函数的估计将偏离测量数据, 而  $\chi < 85^\circ$  时, 由 Chapman 函数可以得到合理的估计值 (中性大气标高约为 10km), 如图 4 所示.

### 4.2 斜反射现象的分析

在 MARSIS 的许多观测中, 都出现了一个或者多个斜反射的电离层回波. 观察发射斜反射现象的电离图发现, 斜反射的发生是规律性的, 在一个观测弧段中, 斜回波从出现至消失的变化是渐进的. 2005 年, Gurnett 给出固定频率上的回波强度与时间、视高 (视高  $S$  没有扣除色散效应,  $S = h_{sc} - ct_{\text{delay}}/2$ ,  $h_{sc}$  为探测器的高度) 的对应关系 [15], 如图 5(a) 所示. 图中是一段历时 36 分钟连续电离层探测, 斜反射现象发生在协调世界时 (UT) 04:55 至 05:00 之间. 由图中可以发现, 斜反射的回波呈向下的双曲线结构, 这也是大多数斜反射现象会呈现的结构. Gurnett

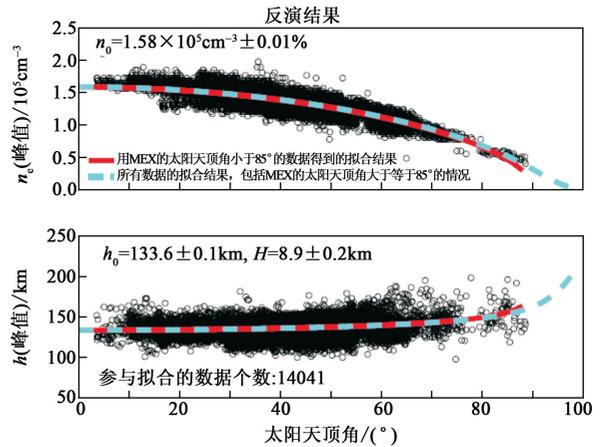


图 4 Chapman 拟合结果 [21].  $n_e(\text{peak})$  为电离层电子密度廓线的峰值密度,  $h(\text{peak})$  为对应电子密度廓线的峰值高度

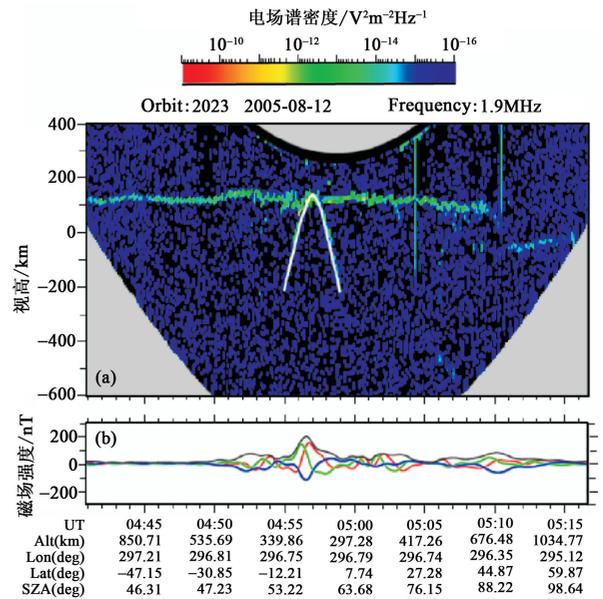


图 5 (a) 斜回波的连续示意图; (b) 同时期磁场矢量及其强度的变化 (引自文献 [25])

指出, 这种现象是由于探测器和未知目标的相对运动造成的, 并通过一定数据的比较肯定这一想法是斜反射的原因之一. 进一步参考发生此类斜反射现象的磁场结构 (图 5(b)), 可得出如下结论: 此类现象通常发生在有垂直开放磁场且电离层出现上凸结构的地方 (如图 6), 即由于该处磁力线开放, 太阳风的带电粒子能够进入电离层并到达电离层的较低部分, 这使得该处的粒子更多地被加热和电离, 升高了电离层的标高. 然而, 这只是其中一部分非垂直电离层反射发生的合理解释. MARSIS 电离图中其他回波的出现缘由仍然在研究中, 太阳活动、太阳风影响及火星地

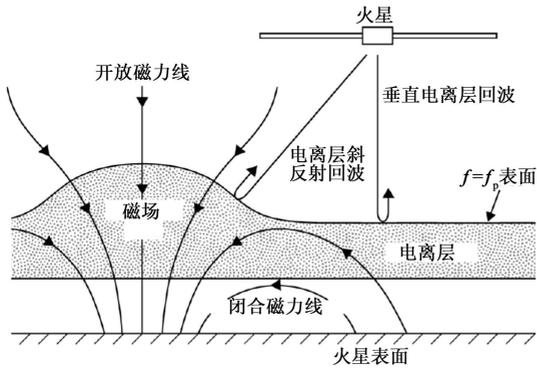


图 6 电离层的凸起结构示意图(引自文献[15])

形地貌都是可能的原因,有待进一步研究.

## 5 结束语

自 2005 年 8 月 MARSIS 开始观测到目前为止, MARSIS 提供了关于火星电离层的丰富数据,促进了人类对火星电离层结构的了解. 随着对 MARSIS 和 MEX 其他载荷观测数据的分析,必将获得有关火星的更多信息.

### 参考文献

[ 1 ] 倪怀玮,郑永飞. 地球科学进展, 2002, 23(4): 516 [Ni H W, Zheng Y F. *Advance in Earth Science*, 2002, 23(4): 516 (in Chinese)]  
 [ 2 ] Albee A L, Palluconi F D, Arvidson R E. *Science*, 1998, 279: 1671  
 [ 3 ] Albee A L. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106: 23291  
 [ 4 ] Golombek M P, Cook R A, Economou T *et al.* *Science*, 1997, 278: 1743  
 [ 5 ] Schofield J T, Barnes J R, Crisp D. *Science*, 1997, 278: 1752  
 [ 6 ] Nielsen E. *Space Sci. Rev.*, 2004, 111: 245

[ 7 ] Bell J F *et al.* *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(E12): 8063  
 [ 8 ] Vignes D *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27: 49  
 [ 9 ] Vignes D, Acuña M H, Connerney J E P *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 2002, 29(9): 1328; doi:10.1029/2001GL014513  
 [10] Crider D *et al.* *Adv. Space Res.*, 2001, 27(11): 1831  
 [11] Fox J L. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, 24: 2901  
 [12] Nagy A, Cravens T. *Solar system ionospheres*, in *Atmospheres in the Solar System: Comparative Aeronomy*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 130, edited by Mendillo M, Nagy A, Waite J H. AGU, Washington D. C., 2002  
 [13] Zhang M H G, Luhmann J G, Kliore A J *et al.* *J. Geophys. Res.*, 1990, 95(B9): 14829  
 [14] Shinagawa H. *Adv. Space Res.*, 2000, 26(10): 1599  
 [15] Gurnett D A, Kirchner D L, Huff R L. *Science*, 2005, 310: 1929  
 [16] Picardi G, Sorge S, Seu R *et al.* *IEEE*, 1999, 5: 2674  
 [17] Carr M H. *Water on Mars*. Oxford: Oxford University Press, 1996  
 [18] Picardi G, Biccari D, Seu R *et al.* *MARSIS: Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding, MARS EXPRESS: The Scientific Payload*, 2004 (这是欧洲航天局关于“火星快车”的一份任务书)  
 [19] Safaenili A, Kofman W, Nouvel J F. *Space Sci.*, 2003, 51: 505  
 [20] Safaenili A, Kofman W, Mouginot J *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 2007, 34: L23204  
 [21] 尹真. *电动力学(第二版)*. 北京: 科学出版社, 2005 [Yin Z. *Electrodynamics (Second Edition)*. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese)]  
 [22] Morgen D D, Gurnett D A, Kirchner D L *et al.* *J. Geophys. Res.*, 2008, 113: A09303  
 [23] Chapman S. *Proc. Phys. Soc., Lond. Sect. A*, 1931, 43: 26  
 [24] Chapman S. *Proc. Phys. Soc., Lond. Sect. B*, 1931, 43: 483  
 [25] Duru F. *Magnetically Controlled Structures in the Ionosphere of Mars*. Thesis in the University of Iowa, 2006