

近代物理讲座

第十二讲 日地空间物理学

肖 佐

(北京大学地球物理系)

一、概 况

太阳通过其电磁波辐射及带电粒子的发射向周围的广阔空间输送能量,就日前探测所知,其影响已达数十个天文单位。从地球上看来,这一空间领域包括地球的外层大气以及行星际空间。行星际空间并非真空,地球大气虽然愈远愈稀薄,但并不是自然地融合到行星际介质中去的。太阳提供的能量和空间介质的相互作用,使这一广阔的空间领域发生着各种各样复杂的物理过程,构成了一门新兴学科——日地空间物理学。广义地说,由于所涉及的空间范围实际上远超出日地之间的区域,因而近年来也有人把它称为日球层物理学,即太阳影响所及的行星际空间物理学。

太阳辐射的 99% 以上是电磁波谱的可见光部分,它们在日照半球加热地面和海洋,通过对流、辐射与低层大气相互作用,并在地球自转和重力等因素的影响下,形成特定的气球温度分布及大气环流体系,发生各种天气过程。

太阳辐射的电磁波谱的远紫外及 X 射线只占总辐射的 10^{-4} 以下,这个能量比例数值看起来很小的一部分能量,却对地球大气从 60 至约 1000km 范围内的部分起着控制性的作用,它使大气分子电离而形成地球电离层,并且由于不同大气组分和不同谱段相互作用,以及不同高度大气的不同运动形式,导致整个电离层又分成若干个不同的区域。

太阳还要向外发射带电粒子,这些由电子和正离子组成的带电粒子流叫做太阳风,其流

速在地球轨道附近约为 300—1000km/s。太阳风所携带的总能量只是太阳可见光部分的 10^{-7} 以下,它在离地球十几个地球半径之处和地球的磁场相互作用。被地球磁场阻挡的太阳风在地球周围形成一个巨大的空腔。在日地连线的向日一侧,这空腔的外边界距地球约为 15 个地球半径;而在背日一侧,则象一个彗星尾巴那样长长地延伸出去。这一空腔称为磁层。其外边界就是地球大气和行星际介质(极稀薄的行星际气体)的分界面。磁层中带电粒子的分布和运动主要受地磁场及电磁作用控制,这里储存、转换并传递来自太阳风的动量、能量和质量,形成一系列特有的空间物理过程,其中许多现象的机制现在还不十分清楚,是日地系统中很重要的一环。现已证实,某些行星(例如木星)也具有与地球磁层类似的结构。

地球磁层以外,直到太阳风影响所及的边界,统称为日球层。其中太阳风及其所携带的太阳磁场是主要的介质。也可以说,地球磁层是日球层中由于地球及其磁场与太阳风相互作用而形成的一个特定结构。日球层以外是恒星际气体。

地面上就可以感知许多发生于上述空间领域内的物理过程。日全食时看到的日冕,象火焰一样向外伸展达好几个太阳半径,向空间抛射出大量物质,这就是太阳风。太阳在某些情况下喷射的带电粒子流速度特别高(达 1000 km/s),当这些高速流和地球磁场相互作用时,造成地磁场的扰动,极光的强烈活动,电离层也受到扰动并使无线电通讯中断,甚至使输电线路和输油管道发生故障。这说明日地空

间物理现象也是和人类生活密切相关的。

本文简要介绍日地环境概况和空间物理在理论上的研究方法，暂不涉及有关的空间探测技术。最后，概括说明空间物理研究的实际意义和当前的主要研究课题。

二、太阳和地球大气

1. 太阳象一个巨大的高温气体团，半径为 $6.96 \times 10^8 \text{m}$ ，质量约为 $1.99 \times 10^{30} \text{kg}$ ，其质量几乎是整个太阳系质量的 99.8%。太阳有一个大约 27 天左右的自转周期，这使得许多日地物理现象具有 27 天左右的周期性，常表明这些物理现象是由太阳上某特定区域的活动引起的。

太阳辐射输出约为 $3.86 \times 10^{26} \text{W}$ ，其能量来源是太阳上氢原子聚合成氦原子的热核反应。投射到地球上的能量只占极小的一部分。日地平均距离叫做天文单位，通常以 AU 表示，用以衡量天文上的某些距离。

$1\text{AU} = 214.9R_{\odot} = 1.496 \times 10^{11} \text{m}$ ，
这里 R_{\odot} 表示太阳半径。

对太阳内部尚无任何直接的观测资料，从光学观测方面来看，一般将太阳大气分为三层，最下面一层称为光球层，大部分可见光的辐射发自这一层，其厚度约 300km。具有相同尺度并发出等量辐射的黑体温度约为 6000K，故通常把太阳光球层等效为一个 6000K 的黑体。

光球层以上直至七、八千公里高度内的太阳大气对可见光是透明的，但发出许多强烈的谱线，称为色球层。其温度随高度逐渐上升，至色球层顶时，温度可达 10^6K 的数量级。这以上是太阳大气最热和最外部的一层，称为日冕。日全食时的照片显示出日冕可伸延到 4—5 个 R_{\odot} 甚至更远。

太阳的电磁波辐射包括了从长波段的无线电波到米波段的射电，直至 γ 射线的所有频段，其辐射强度则随波长而不同，由于太阳上常发生许多称为活动现象的过程，这时某些频段的辐射可能有剧烈变化，故一般谈辐射情况指不太活动时的太阳，或叫宁静太阳的辐射。包括

红外在内的可见光部分辐射强度占总辐射的绝大部分。紫外及射电部分以及 X、 γ 射线所占份额极少。

波长 3000\AA 以下的短波辐射几乎全部被地球大气所吸收。在 $0.3-1 \mu\text{m}$ 范围内，地球大气是透明的。1— $24 \mu\text{m}$ 范围内有某些大气分子的吸收带，只在某些窄波段透过地球大气，如 $8-14 \mu\text{m}$ 和 $3-5 \mu\text{m}$ ，构成所谓红外窗。24— $300 \mu\text{m}$ 的太阳辐射全部被地球大气吸收。0.3 cm—15m 波段是无线电窗。15—30m 范围的辐射通过大气时受电离层影响很大，波长大于 30 m 的太阳射电辐射则被电离层反射回空间。在 1AU 附近的太阳总辐射值是 1353W/m^2 ，称为太阳常数。

前面提到的太阳风，是宁静太阳的日冕气体不断向外膨胀而造成的连续的带电粒子的发射。在 1AU 处，这种带电粒子流以超音速通过地球，风速一般为 $300-700 \text{km/s}$ ，粒子数密度为 $5-10/\text{cm}^3$ ，相当于通量为 $1.6 \times 10^8/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ，太阳风的温度大约为 10^5K ，太阳风还携带着太阳磁场。太阳风的主要组成是质子和电子，有时出现高速太阳风，速度达 1000km/s ，这种高速流与日冕中称为冕洞的结构有密切关系。

太阳活动有某些周期性，人们早就注意到太阳上存在黑斑，即太阳黑子，其相对面积和数目都以 11 年的周期而变化。当黑子数目达到极大时，太阳上各种活动以及粒子和 X 射线辐射均较强烈，然而相对来说，可见光部分却变化不大。

太阳上还会出现一些突然的爆发现象，例如：(1)某些小区域的亮度突然增强，伴随着可见的 H_{α} 谱线的增强，称为太阳耀斑；(2)X 射线辐射的突然增强，称为 X 射线耀斑；(3)一股股地发射出较密的质子及电子流，形成太阳风中的高速流，前已提及，这与日冕中某些温度较低、密度较低的部分(冕洞)有关；(4)能量很高，但很稀薄的质子和电子流的发射，称为太阳质子事件。上述几种现象有时互相关联，而且常在黑子数大时，即太阳活动峰年时发生比较频繁和强烈。这些爆发现象总以不同的方式在几

小时至几天之内影响地球，造成空间环境的某些改变，引起对无线电通讯、导航、空间飞行等的干扰。

2. 粗略地说，地球大气应是由地球表面连续向外扩展的。地球的重力将这一层大气维持在它的周围，形成愈往外愈稀薄的垂直结构。但是，由于除了重力作用之外还有其它各种因素（主要有：太阳的电磁和微粒辐射同大气相互作用造成大气成分的分解和电离；大气不同成分与太阳辐射的不同作用；地球表面热状况与大气的相互作用；地球磁场的存在对电离成分运动的影响等），造成地球大气随高度、时间、太阳活动情况的变化，引起大气内部的各种物理和化学过程。为了研究方便，按照这种变化和过程的特点将大气按高度区分成不同的层结，分层方法主要有：(1)按大气热状况划分：(a)对流层，在12至13km以下，温度随高度下降，对流运动强烈，天气过程主要发生在这一层；(b)平流层，12—30 km，没有大气的垂直对流，但有水平流动，温度随高度重新又增加；(c)中层，30—80 km，在30—50 km处由于太阳紫外辐射作用而形成臭氧含量极大的层，造成一个温度的极大，然后又重新随高度减小；(d)热层，从约85km开始，直达数百公里，温度上升至约1000—1500K；(e)外层(逃逸层)，是地球最外部的一个层结，这时气体已相当稀薄，分子很少互相碰撞，以热速度运动的原子如果具有脱离地球引力所必须的运动速度，就可以不受碰撞地逸出地球大气，进入行星际空间。这当然是一种粗略的估计。事实上，在这样的高度，气体是电离的，运动要受到磁场的约束。(2)按大气的电离状况划分：(a)中性大气，大体上包括中层以下的大气；(b)电离大气，60—80km以上的全部地球大气，这部分在1000km以下称为电离层，特点是未电离的中性成分比例较大，粒子间的碰撞频繁，带电粒子与中性成分之间的碰撞对其运动有很大影响。而在1000km以上，大气完全电离且极为稀薄，地球磁场对运动过程起主要控制作用，称为磁层。电离层对无线电波传播有很大的影响。

三、日地空间的电动力学简单介绍

1. 电磁波在电离层中的传播

从可见光波段直到长波(波长数km)的一个很宽频带内的电磁波，广泛地被用来进行通讯、雷达定位、导航、遥测等。在大部分情况下，电磁波都以地球大气作为传播介质。当电磁波进入电离气体时，传播介质和电波的相互作用与中性气体作为介质时的情况有本质的不同，因而对电磁波在电离层中的传播需要进行专门的研究，也需要对电离层本身的结构及变化进行观测、研究和预报。

在真空中，麦克斯韦方程组表达为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{1}{c} \left(4\pi \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right), \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \quad \mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}, \quad (1)'$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi Q. \quad (3)$$

由于真空中没有传导电流， $\mathbf{J} = 0$ ，对(2)式取旋度，并将(1)式代入，很容易得到电磁波满足的波动方程：

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \frac{\mu_0 \epsilon_0}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (4)$$

电磁波的传播相速度 $v_p^2 = \frac{c^2}{\epsilon_0 \mu_0} = c^2$ ，而在别的介质中， ϵ_0 和 μ_0 可以不是1，则波传播的相速度 v_p 可以不等于光速 c 。

电离层中存在电子和正离子，一般由于带正、负电荷的粒子数目相等，所以从宏观上看，电离层是电中性的，由于电离层中同时还存在着未电离的中性粒子，带电粒子要和中性粒子产生碰撞。

电磁波在电离层中传播时，在电磁波的电场作用下，电子将产生热运动以外的附加运动，运动方程为

$$m \cdot \frac{d\mathbf{v}}{dt} = e\mathbf{E} - m\nu\mathbf{v}, \quad (5)$$

式中右侧分别代表电场力和一个等效阻尼力，这里 ν 是电子和中性分子的平均碰撞频率， m

是电子质量。我们引入一个极化矢量的概念，即由于振荡电场而引起的电子运动形成了以同一频率而振荡的极化矢量。电子和离子分开一个距离 r ，而 r 是振荡的。我们这样做时，需要假设离子由于质量远大于电子而静止不动。如果定义单位体积的总电极化强度为 $P = N_e e r$ ， N_e 称为电子数密度，代表单位体积内的电子个数，则上述效应等效于一个电流

$$J = \frac{\partial P}{\partial t} = N_e e \frac{\partial r}{\partial t} = N_e e v.$$

将这样的等效电流代入(1)式，并注意(6)式，我们就可以得到电离层中的波动方程，其传播的相速度为

$$v_p^2 = \frac{c^2}{\epsilon'}, \quad (6)$$

其中(已令 $\mu = 1$)

$$\epsilon' = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + \nu^2)} - i \frac{4\pi\sigma}{\omega}, \quad (7)$$

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi N_e^2 e^2}{m}, \quad \sigma = \frac{N_e e^2 \nu}{m(\omega^2 + \nu^2)}, \quad (8)$$

ω_p 叫做等离子体频率， σ 定义为电离层的电导率。如果碰撞频率远小于电波频率 ω ，则有

$$\epsilon' = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}. \quad (9)$$

显然，当 $\omega = \omega_p$ 时， $\epsilon' = 0$ ， $v_p = \infty$ ，这时电磁波不能向前传播，而发生全内反射。当 $\omega > \omega_p$ 时，电磁波可以通过电离气体而在其中传播， $\omega < \omega_p$ 时，电磁波不能透入电离气体。

由上述分析可以看到：(1) 传播介质的特性与电磁波频率有关，故电离层对电磁波是色散介质，当 $\omega \leq \omega_p$ 时，电磁波不能在电离层中传播，另外，色散特性使脉冲波发生畸变；(2) 碰撞使电波的能量耗散。从微观角度看，电子把从电磁波得到的能量转移给中性粒子，加热了中性粒子；(3) 上述推论中没有计及地磁场的存在，当考虑地磁场时，电离层表现为各向异性介质，关系式变得很复杂，电波一波分裂为两条按不同路径传播的波，波的偏振面发生旋转，在实际应用中，300kHz 以下的长波其频率低于电离层最底部的 ω_p ，射向电离层的电波完全返回，形成地面和电离层底之间的波导式传播，中波

段和短波段受电离层影响强烈，特别是短波可在不同高度被电离层反射，多次反射使短波可以实现全球传播，波的能量有损失，电离层中的不均匀结构及其随机运动造成短波讯号的衰落及不稳定现象，太阳上某些突然爆发引起电离层骚扰，影响远距离短波通讯，严重时会使短波通讯完全中断。对更高的频率的电波，则基本上能透过电离层，而不受其影响，特别对1000 MHz 以上的频率，电离层影响甚微，故卫星通讯使用这样的频段，但不同尺度特别是小尺度的电离层不均匀结构仍产生讯号强度的涨落(或称“闪烁”)。另外，当电波功率很强时，足以影响介质的特性，使之反过来作用于电波，这种非线性的相互作用对现代大功率雷达及未来空间太阳能发电的对地传输将产生实际的影响。

2. 单一带电粒子在电磁场中的运动

日地空间中的绝大部分区域充满着带电粒子和电磁场，研究单一的带电粒子在电磁场中的运动规律是认识许多地球物理现象的基础，其基本概念可从带电粒子的运动方程导出。

电磁场中单一带电粒子的运动方程可写为

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = e \left(E + \frac{1}{c} v \times B \right) + f, \quad (10)$$

这里 f 是电磁场以外的力，例如重力、气压梯度力等； B 和 f 为零时，电场使粒子加速； E 和 f 为零时，粒子加速度为

$$\frac{dv}{dt} = \frac{e}{mc} v \times B,$$

加速度垂直于粒子速度 v ，故运动过程中粒子不会获得或损失能量，如果初始时刻 $v \perp B$ ，则粒子只作圆周运动。使向心力和洛伦兹力相平衡，可得

$$\begin{aligned} \frac{v^2}{r_c} &= \frac{e}{mc} v B, \\ r_c &= \frac{m v c}{e B}, \end{aligned} \quad (11)$$

r_c 称做粒子的回旋半径，回旋运动的角频率

$$\omega_c = \frac{v}{r_c} = \frac{e B}{m c}. \quad (12)$$

当有电场力和其他外力作用于粒子时，如果外力并不大到使粒子偏离近似的圆轨道，则粒子

除作回旋运动外，其回旋中心缓慢地作“漂移”运动。见图 1。

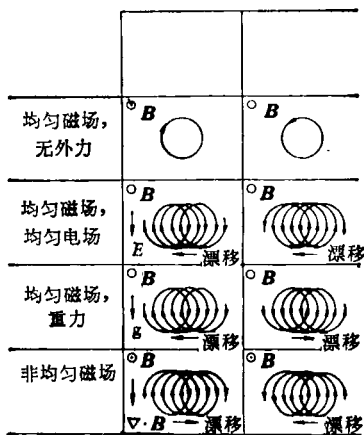


图 1 电磁场中带电粒子的运动

地球磁场可近似看作偶极磁场，这是非均匀磁场，带电粒子在地磁场中理想的运动方式如图 2 所示。实际运动轨迹是绕磁力线的回旋运动加沿磁场方向的漂移，由于在这种运动方式下有几个物理量满足守恒定律，故带电粒子沿地磁力线运动时，在靠近磁极的某点被“反射”，该点称为磁镜点。这有点类似于受控热核反应研究中某种以磁场约束带电粒子的装置（磁镜装置）。

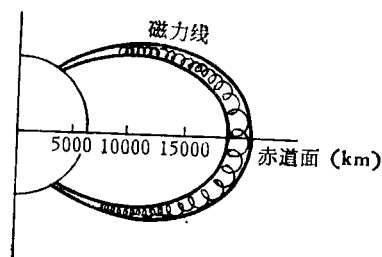


图 2 地球磁场中带电粒子的运动示意图

3. 磁流体动力学的概念

由电子和正离子组成的宏观电中性的电离气体又叫做等离子体，其基本特征是既是导电的，又是流动的，把等离子体处理为连续介质时，把流体力学和电磁学方法结合起来，即用所谓的磁流体动力学的方法是一种较好的处理方式。

物理

这时，磁场中导电流体运动受到洛伦兹力 $\frac{e}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ ，与电场力 $e\mathbf{E}$ 相比较， $\frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 可等效于一个电场，故可写出这种情况下普遍的欧姆定律：

$$\mathbf{J} = \sigma \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right). \quad (13)$$

方程(13)与麦克斯韦方程组一起构成了电动力学方程系。另外，还有流体的运动方程：

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \rho \mathbf{G} + \frac{1}{c} \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \nabla p \quad (14)$$

以及流体连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0. \quad (15)$$

再根据需要，加上状态方程或能量方程，就构成了最理想情况下磁流体力学的封闭方程系，由这一方程系可导出如下几个基本结论：(1) 磁场冻结规律：导体横穿磁力线运动时，要在导体中产生感生电动势。如果导体是理想的，即 $\sigma \rightarrow \infty$ ，那么即使极小的电动势也要产生极大的电流，这在物理上是不可能的。这意味着理想导体不能横截磁力线而运动，或说理想导体在磁场中运动时穿过它的磁通量不会发生变化，换句话说，磁力线总是跟着等离子体一起运动的，就好象磁场“冻结”在流体中，数学上可以证明这种冻结场的存在；(2) 磁场扩散规律：实际等离子体不可能是完全理想的导体，电导率不会等于无穷大，因而磁场也不可能完全冻结在流体中。我们说有一部分磁场穿过等离子体而扩散。由麦氏方程组及普遍的欧姆定律可以得到

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \frac{c^2}{4\pi\sigma} \nabla^2 \mathbf{B}. \quad (16)$$

这就是电磁流体中磁场随时间变化的方程。当 $\mathbf{v} = 0$ ，即流体处于静止状态时，(16) 式成为典型的扩散方程， $\eta = \frac{c^2}{4\pi\sigma}$ 称为磁扩散系数。由(16)式，当 $\mathbf{v} = 0$ 时，磁场在电离介质中由一处扩散到另一处所需的时间的数量级 $t \approx \frac{4\pi\sigma l^2}{c^2}$ ，这里 l 是所考虑的空间尺度，对许多宇宙空间的问题，由于 l 很大，即使 σ 不大，扩散时间也

很长；(3) 磁压力：流体运动时，单位体积流体受到洛伦兹力的作用， $F = \frac{1}{c} J \times B$ ，而

$$\nabla \times B = \frac{4\pi}{c} J,$$

故

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{4\pi} \nabla \times B \times B \\ &= \frac{1}{4\pi} (B \cdot \nabla) B - \nabla \left(\frac{B^2}{8\pi} \right), \quad (17) \end{aligned}$$

上式右侧第二项是流体受到的磁场作用力的一部份，与单位体积受到的气体压力 $-\nabla p$ 比较， $\frac{H^2}{8\pi}$ 等效于气体压强，我们把它叫做磁压强。它总垂直于磁力线。而右侧第一项表示沿磁力线方向的力，叫做磁张力。磁压力和磁张力的概念在处理等离子体浸在磁场中时的平衡和稳定问题时非常有用，例如，太阳风和地球磁场相互作用时磁层顶附近太阳风和地球大气的平衡问题。(4) 由磁流体力学方程组出发还导出等离子体中可以存在的各种波动，这对解释日地空间中的一些运动现象也是很重要的。当然，实际问题要复杂得多，在许多情况下，等离子体粒子间的相互作用是重要的，不能用单粒子理论，而流体本身又相当稀薄，不能看作连续介质，这时把等离子体看作由大量微观粒子组成的整体，而用统计物理学的方法对微观量求平均值来描述等离子体的宏观性质是适合的，这就是等离子体动力学。(4) 地球磁层：对地球空间，磁场和带电粒子的测量表明，在约十个地球半径以外，地磁场大大偏离偶极场。向阳面在 $7R_e$ 以外磁场几乎是偶极场的二倍，而在背日面磁场则减弱，磁力线伸长。赤道面上有一薄片几乎没有磁场，叫中性片。这一拖长的尾巴叫做磁尾，磁尾的柱半径约 22 个 R_e ，一直伸展到数百个地球半径以外(图 3)。

这种结构直观上类似于拖着长尾巴的彗星，而实质上地球磁层的形状是由太阳风和地磁场的相互作用形成的。

太阳风流过地球，其动压强 ρu^2 应和地球磁场的磁压强 $\frac{B^2}{8\pi}$ 相平衡。因而地磁场向阳面被

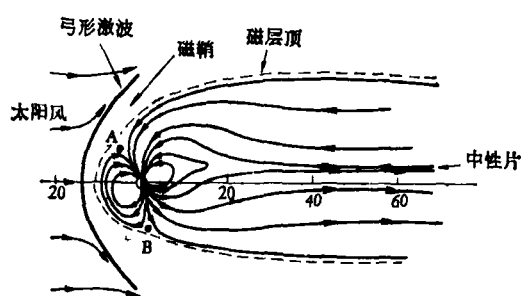


图 3 太阳风和地球磁场相互作用示意图
(A, B 是两个磁中性点)

压缩到平衡状态，磁场加强。太阳风在地球附近是超音速流，被地磁场突然制动，形成了前方的弓形激波。而在背阳侧，太阳风和地磁场的磁流体力学相互作用把地球磁力线拉长，形成磁尾。这种磁场及粒子分布的结构在地球周围形成几个电流体系，沿磁层顶及中性片都有电流，地磁场在几个区域捕获粒子而形成有较多粒子的辐射带，其中粒子的东西向漂移形成环电流，还有高纬度地区沿磁力线的电流等。太阳活动及爆发引起磁层结构及这一系列电流的变动是地磁、电离层扰动的主要原因，有关的各种过程有时极为复杂，定量的解释还有待于做大量的工作。

四、当前日地空间研究的主要课题

(1) 太阳的辐射输出及有关的物理过程

由于太阳和地球大气及行星际气体之间最直接的关系就是太阳的辐射能量与后者的相互作用，因而从太阳常数及其变化的确定，到特定谱段的辐射情况，以及太阳扰动期间 X 射线、射电及太阳风的变化等都需要作进一步的地面及空间观测（包括光学、X 射线、厘米波及米波射电、宇宙线和带电粒子等的连续监测），并在此基础上建立各种太阳爆发和太阳瞬变事件的理论模型。

(2) 太阳、行星际介质及其与行星磁层，首先是与地球磁层之间的相互作用

实际上就是研究各种太阳事件（例如耀斑爆发、太阳风高速流）引起的主要地球物理效应

的现象、形态和机制。对行星际介质已经进行了长期的测量,并提出了行星际介质中的波动、激波、电流片、湍流结构及太阳风加速机制等一系列理论课题;在太阳风和磁层的相互作用方面,当前的主要课题仍然是它们之间如何进行能量、动量和带电粒子本身的输运或交换。太阳风冻结着太阳磁场,它和地球磁场之间的相互作用,使这种输运过程变得十分复杂。

(3) 地球磁层、电离层和中性大气之间的关联及相互作用

磁层从太阳风接受的能量怎样贮存和转换,怎样向电离层输送,电离层在连接磁层和中性大气方面起怎样的作用,中性大气中的某些过程(特别是气象过程)是否可通过适当的反馈作用影响电离层和磁层中的电动力学过程。例如,太阳风注入地球磁层的粒子和能量通常对地球极区有很大影响,这部分能量很可能通过电离层向较低纬度输运,从而使从高纬度注入大气的能量和动量有可能影响全球大气环流模型。反过来,极光活动从低层大气向上传播的声重力波、行星尺度波、雷暴电场等引起的可能的环流基本流型的变化,都可能影响电离层和磁层中的过程,这些目前都还不清楚。考虑到磁层接受的太阳风能量和地面接受的太阳可见光及红外辐射能量相差很大,因此,由统计表明地球大气上、下层之间的紧密相关现象,在理论上提出一个引起争议从而值得深入研究的重要问题。

(上接第 761 页)

[4] 胡征、樊昌信, 沃尔什函数及其在通信中的应用, 人民邮电出版社, (1980).
 [5] K. G. 比彻姆, 沃尔什函数及其应用, 科学出版社, (1980).
 [6] 潘少华, 物理, **9**(1980), 272.
 [7] 杨国祯、潘少华, 物理学报, **29**(1980), 1301.
 [8] Barrekette Stroke et al., *Optical Information Processing*, Vol. 2, New York and London, (1976), 87
 [9] James R. Leger et al., *Optical Engineering* **18-**

日地空间物理研究在理论和实践上都具有重要的意义。近 30 年来,空间技术的发展大大促进了空间物理研究,同时也出现了许多新的交叉学科,如空间失重及辐射环境下材料性质及新材料的合成、机械结构强度直至生命过程及生理活动的特点等研究日益深入,形成诸如空间材料、空间机械、空间生命科学等新学科,与空间物理及化学相互交叉。此外,由于稠密大气之外优越的天文观测环境;在实验室不能模拟的广阔无界的等离子体环境,使空间研究本身对天体物理、宇宙学、陨石学、行星“地质”学,以及理论物理的某些分支(如基本粒子)、等离子体物理学的研究均有十分重要的意义;空间物理在实践上对无线电通讯、广播、导航、武器制导、授时等国民经济部门也是重要的。随着人类的空间活动日益增多,空间环境的影响早已提到日程上来,并越来越多地引起关注,这首先要对空间物理进行更深入的研究。在开辟一个人类活动的崭新环境的途中,空间物理学也必将发挥巨大的作用。

参 考 文 献

[1] S. I. Akasofu, S. Chapman, *Solar-Terrestrial Physics*, Oxford University Press, (1972).
 [2] 拉特克利夫著, 吴雷等译, 电离层与磁层引论, 科学出版社, (1980).
 [3] 金尚宪等编著, 等离子体物理学, 原子能出版社, (1981).
 [4] N. A. Krall, A. W. Trivelpiece, *Principles of Plasma Physics*, McGraw-Hill Inc., (1973).

5(1979), 518.
 [10] 霍裕平、杨国祯、顾本源, 物理学报, **24**(1975), 434; **25**(1976), 31。
 [11] 陈岩松、王玉堂、李秀英, 物理学报, **29**(1980), 1307.
 [12] 王玉堂、陈岩松、李秀英, 激光, **8-1**(1981), 30.
 [13] 陈岩松、王玉堂、李秀英, 物理, **9**(1980), 414.
 [14] 杨国祯, 物理学报, **30**(1981), 1340.
 [15] 王玉堂, 光学学报, **4-2**(1984), 164.
 [16] 程路, 物理学报, **31**(1982), 386.