

- [8] 李荫远、范海福、贾寿泉,《中国科学》, 1期(1973), 96; 外文版 *Scientia Sinica*, **16** (1973), 130.
- [9] S. K. Kurtz, *Laser Handbook*, Vol. 1, 923, edited by F. T. Arechi, F. O. Schulz-Dubois (1972).
- [10] R. Liminga, S. C. Abrahams, *J. Appl. Cryst.*, **9**(1976), 42.
- [11] E. H. Turner, *J. Appl. Cryst.*, **9**(1976), 52.
- [12] 中国科学院物理研究所磷酸锂晶体研究小组,《物理学报》, **24** (1975), 91.
- [13] 中国科学院物理研究所磷酸锂晶体研究小组,《物理》, **1**(1972), 28.
- [14] 李荫远、范海福、贾寿泉,《物理》, **2**(1973), 1.
- [15] S. Matsumura, *Mat. Res. Bull.*, **6**(1971), 469.
- [16] H. Arend et al., *Mat. Res. Bull.*, **7**(1972), 869.
- [17] 中国科学院物理研究所晶体学室相图与相变研究组,《物理学报》, **26** (1977), 199.
- [18] 朱 镛、张道范、成希敏,《物理学报》, **26** (1977), 115.
- [19] 麦振洪,《物理学报》, **24**(1975), 385.
- [20] 杨楨、程玉芬、牛世文、李荫远,物理学报, **24**(1975), 6.
- [21] E. Sailer, *Phys. Stat. Sol.*, (a) **4**(1971), K173.
- [22] 李铁城、许政一,《物理学报》, **26** (1977), 500.
- [23] 张安东、赵世富、谢安云、许政一,《 α -LiIO₃ 的电导机制和低温电性质》, 待发表.
- [24] 赵世富、顾本源、张安东、许政一,《静电场作用下 α -LiIO₃ 单晶的光衍射增强现象的弛豫行为和“低温冻结”》, 待发表.
- [25] E. Fatuzzo, S. Coppo, *J. Appl. Phys.*, **43**(1972), 1457.
- [26] 李铁城、于淦,《中国科学》, 2期(1978), 150; 外文版 *Scientia Sinica*, **20** (1977), 742.
- [27] A. W. Warner et al., *J. Acoust. Soc. Amer.*, **47**(1970), 791.
- [28] 李荫远、李铁城、许政一,《 α -LiIO₃ 离子迁移极化的进一步讨论》, 待发表.
- [29] V. O. Martirosyan, et al., *Phys. Stat. Sol.*, (b) **72** (1975), 441.
- [30] 古元新等,《X射线形貌法观察空间电荷缀饰的 α -LiIO₃ 单晶的缺陷》, 待发表.
- [31] 顾本源、许政一、赵世富、张安东,《静电场作用下空间电荷对 α -LiIO₃ 单晶中准用期层状缺陷的缀饰——光衍射增强现象》, 待发表.
- [32] 易孙圣、梁敬魁,《物理学报》, **27** (1978), 314.
- [33] 顾本源、毛镇道、成希敏、谢安云,《物理学报》, **26** (1977), 293;《物理学报》, **26** (1977) 第5期插页.
- [34] 杨楨、牛世文、程玉芬,《静电场作用下 α -磷酸锂单晶中子衍射增强的异常现象》, 待发表.
- [35] 中国科学院原子能研究所 α -磷酸锂研究小组,《物理学报》, **25**(1976), 129.
- [36] 梁敬魁、易孙圣,《物理学报》, **27** (1978), 126.
- [37] L. Sedlakova et al., *Phys. Stat. Sol.*, (a) **22** (1974), K223.
- [38] L. Sedlakova et al., *Phys. Stat. Sol.*, (a) **27** (1975), 309.
- [39] 杨楨、程玉芬、牛世文,《物理学报》, **27**(1978), 226.
- [40] 许政一,《物理学报》, **27**(1978), 700.
- [41] 许政一、李铁城、顾本源,《静电场作用下 α -LiIO₃ 中子衍射增强现象的理论解释》, 待发表.
- [42] 杨华光、李晨曦、顾本源,《静电场对 α -LiIO₃ 单晶喇曼光谱的影响》, 待发表.
- [43] G. Donnay, R. Barton Jr., *Carnegie Institute Washington Yearbook*, **65**(1965—1966), 299.
- [44] e.g. D. K. Smith et al., *J. Electrochem. Soc.*, **111**(1964), 78.
- [45] e.g. G. Heiland, H. Ibaeh. *Solid State Comm.*, **4**(1966), 353.
- [46] A. R. Von Hippel, *Dielectrics and Wave*, 1954.
- [47] W. Otaguro et al., *Phys. Rev.*, **B4**(1971), 4542.
- [48] H. Fröhlich, *Theory of Dielectrics*, (1949), §12.

空 间 物 理 学

陈 哲 明

认识空间和征服空间是人类由来已久的愿望。空间是一个规模宏大的天然物理实验室。它包含着数目巨大的各种分子、原子、离子,具有不同能量的质子和电子,从极低频到 γ 射线这样宽广的频谱的电磁波、各种类型的磁流波和声重波,太阳和银河宇宙线、微流星、气溶胶以及磁场、电场和重力场。在空间,存在着波的激

物理

发、波-粒相互作用、粒子沉降、光化与电离反应,大气热力动力过程等重要的物理现象。对这些复杂的物理现象的研究,构成了近代自然科学理论研究的一个重要方面;空间物理学成为近代天体物理学、高能物理学、等离子体物理学、力学、原子和分子物理学、地球物理学以及其它自然科学基础学科的交汇点,成为一门进展迅

速的新兴边缘学科。

一、空间环境

我们知道，地球大气自下而上地划分为对流层、平流层、中层、热层及外层(图1)；又按其电离状况划分为电离层和磁层。中层以上直至行星际空间就是通常所说的空间环境。

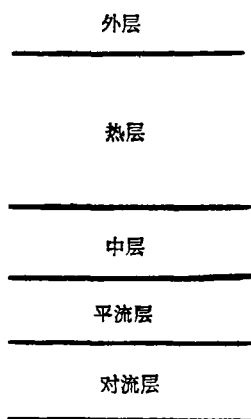


图1 大气的分层

1. 高温稀薄的真空环境

人类生活在大气海洋中，海平面大气密度的标准值是 $\rho_0 = 1.225 \times 10^{-3}$ 克·厘米⁻³。密度随高度而指数下降，在空间的绝大部分高度上，大气是处于高度稀薄的真空状况的，例如，在250公里，大气密度比地面值要小十个量级。

海平面大气温度的标准值是15℃，往上递减到大约12公里处的220K(-53℃)，这一层大气称为对流层，这是与人类活动关系密切的一层，风、云、雷、雨等天气现象发生的地方。再往上升，温度基本不变，随后持续上升，在这种情况下，大气稳定度高，称为平流层。平流层顶在50公里，温度达270K。经过数十年研究，已经肯定：造成平流层相对增暖的原因是臭氧对于太阳紫外辐射的吸收效应。中层直接位于平流层之上，其中温度呈现随高度增加而递减的趋势，在中层顶(85公里)温度最低，为190K。中层的低温是由于水汽和二氧化碳红外辐射冷

却所造成。由中层顶往上，温度持续上升，但到300公里左右，上升速率变得极缓慢，300公里以上近于500—2000K。由100公里左右到大约1000公里，就是通常所谓的热层。热层的高温主要是由于氧对太阳远紫外辐射吸收加热所造成。热层的温度随太阳、地磁活动而变化，在太阳活动高年的白天可达2000K。

在20—50公里之间，大气中臭氧的混合比最大，称为臭氧层。臭氧含量虽少，(换算到标准温压条件下仅有3.5毫米厚度。)但它对生物的生存有决定性意义。臭氧吸收了大部分太阳紫外线，保护了地面的生物免受紫外线伤害。近年发现臭氧似有减少的趋势，已引起了国际上的极大注意。

2. 电离层

一个世纪以前就有人根据地磁观测，预言高空存在一个导电的层次。本世纪初，为了解释横跨大西洋的无线电传输实验，又有人提出了高空导电大气层次——即电离层——的概念。后来从实验上证实了它的存在。

电离层介质由电子、正负离子和中性粒子所组成，在宏观上呈电中性状态。电离层电子浓度随高度的分布明显地划分为几个区域，分别称为D层、E层和F层。

D层是电离层的低层，它的电子浓度最大值出现在70—90公里，浓度最大值在 10^3 至 10^4 个厘米⁻³之间。D层中的主要电离源包括Ly- α 线(波长1216埃)，远紫外线，太阳X射线和宇宙线。Ly- α 线使D层的主要成分NO电离(该气体的一次电离位为9eV，相当于1377埃；远紫外和X射线造成O₂和N₂电离(一次电离位对应的波长分别为1026埃和795埃)。

E层是目前了解得最多的一个层次，它的最大电子浓度为 10^5 个厘米⁻³，出现在100—120公里高度。E层电子浓度白天大、夜间小，有十分明显的昼夜变化规律。

近年来用探空火箭携带质谱计，对低电离层(D、E层)进行了实测，经过直接探测，认出了大量离子成分(表1)，由此可以看出，电离层结

表1 低电离层中已经测出的离子成分

名称	质量数	名称	质量数	名称	质量数
N ⁺	14	Sc ⁺	45	O ₂ ⁻	32
O ⁺	16	NO ₂ ⁺	46	Cl ⁻	35,37
H ₃ O ⁺	19	NO ⁺ · H ₂ O	48	CO ₂ ⁻	60
Na ⁺	23	Cr ⁺	52	HCO ₃ ⁻	61
Mg ⁺	24,25,26	Mn ⁺	55	NO ₂ ⁻	62
Al ⁺	27	H ₃ O ⁺ · (H ₂ O) ₂	55	O ₂ ⁻ · (H ₂ O) ₂	68
Si ⁺	28	Fe ⁺	56,54	CO ₂ ⁻	76
N ₂ ⁺	28	Ni ⁺	58,60	CO ₃ ⁻ · H ₂ O	78
NO ⁺	30	HNO ₂ ⁺	63	NO ₂ ⁻ · (HNO ₂)	93±1
S ⁺	32,34	H ₃ O ⁺ · (H ₂ O) ₃	73	CO ₂ ⁻ · (H ₂ O)	
O ₂ ⁺	32,34	HNO ₂ ⁺ · (H ₂ O)	81	NO ₂ ⁻ · (HNO ₂) · H ₂ O	111±1
H ₃ O ⁺ · H ₂ O	37	H ₃ O ⁺ · (H ₂ O) ₄	91	CO ₂ ⁻ · (H ₂ O) ₂	
K ⁺	39,41	H ₃ O ⁺ · (H ₂ O) ₅	109	NO ₃ ⁻ · (HNO ₃)	125±1
Ca ⁺	40	H ₃ O ⁺ · (H ₂ O) ₆	127		

构成分是多么复杂。电离层是一个规模巨大、反应繁多的空间实验室。

F层的最大电子浓度为 10^6 个厘米⁻³，出现在 300 公里左右。在夏季白天 F 层又分裂成较低的 F₁ 层和较高的 F₂ 层。F₂ 层是电离层中经常出现的主极大层，又是远距离短波无线电通讯所依靠的主要反射层。太阳微粒辐射的短期增强会引起 F₂ 层暴，一次电离层暴持续数小时至好几天，可使电波传播受到严重干扰。

3. 辐射带和磁层

地球辐射带的存在是人造地球卫星上天以后的一个重要发现。最初发现辐射带的是探险者 I、III 和 IV 号以及 Sputnik II 号卫星。探险者 I 号的近地点是 354 公里，远地点是 2555 公里，目的是探测宇宙线强度。卫星发射后，计数器成功地测出了宇宙线强度，但当卫星沿轨道升入 700 公里以上的高度时，计数器的讯号突然中断。开始把它解释为电子线路出了故障。但奇怪的是当卫星回到 700 公里以下时，讯号又重新出现了。负责这项试验的范艾伦 (Van Allen) 正确地预见到这可能是在 700 公里高度以上有着较大通量的粒子辐射，它能造成计数器的饱和与截止。以后的卫星探测证实了这一推测，发现地球周围存在着由很高通量的带电粒子所组成的空间——地球辐射带。

辐射带是地球磁场捕获空间带电粒子的产物。我们知道：带电粒子在外磁场作用下的运动轨迹，是一条螺旋线，即运动可以分解为沿磁力线的移动和围绕磁力线的迴旋。磁场强度越大，迴旋半径越小。地磁场具有近似偶极子的特性，在两极区磁场强度大、在赤道区小。带电粒子在这种磁场作用下的运动形态为，在两个反射点（称为镜点，相对较接近极区）之间作往返螺旋式振荡运动。显然，这种运动形态使带电粒子被局限于一定的空间范围，或者说被地磁场所捕获而形成辐射带。

通常把辐射带分为内、外两部分，内带位于 600 至 10000 公里高度，主要成分是质子和电子；外带位于 10000 至 60000 公里，主要成分是电子。内、外带之间并无截然界限，整个辐射带可看作一个由具有不同特征的粒子组成的巨大捕获区。粒子的空间分布与能量有关，高能粒子离地球较近。除了天然辐射环境之外，还有高空核爆炸产物被地磁场俘获造成的人工辐射带，它的主要成分是电子。

辐射带质子的能量是不高的，只有几个兆到几十个兆电子伏特。这是空间的一般的辐射环境。当大的太阳耀斑爆发时，伴随有大量的高能粒子发射，可能对宇航飞行造成危害。由于高能粒子的主要成分是质子，这种爆发现象又称为太阳质子事件。所涉及到的粒子能量在

10 MeV至 10 BeV之间,其中能量大于 0.5 BeV的称为相对论事件. 太阳质子事件是太阳剧烈活动的产物,一般伴随着太阳射电暴、X射线暴、电离层骚扰以及地面宇宙线变化.

约束在地磁场中的粒子,除了上述成分之外,还有一部分能量较低的等离子体. 从探测发现的顺序来看,发现辐射带在先,探测等离子体特征在后,其原因之一在于等离子体的探测一般比辐射带的探测更为困难些.

日地空间充满着等离子体,在接近地球一边的等离子体空间是电离层,在接近太阳一边的等离子体空间是日冕、太阳风;两者的交界处就是范围广大的充满着各种能量和密度的等离子体空间——地球磁层(图 2).

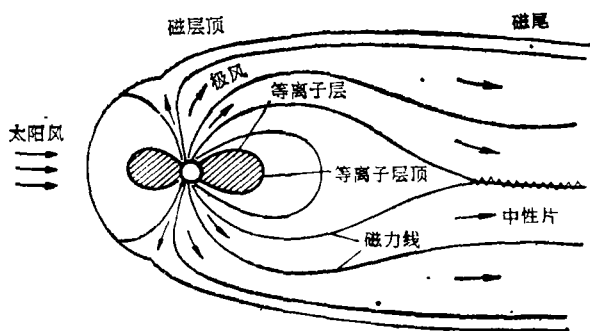


图 2 磁层

磁层是太阳风和地磁场相互作用的产物. 在向阳面,太阳风等离子体以超音速前进,被地磁场阻遏后,在两者之间形成一个激波面;在背阴面,太阳风的作用使磁力线向后延伸很长形成磁尾. 磁尾是由相反方向的开启磁力线所组成的,指向相反的磁力线在赤道附近决定了一个“中性片”,中性片两边是密度较高的等离子体空间,称为等离子体片.

磁层的接近地球部分是“等离子体层”,它是随地球共转的,这一层的顶部称为“等离子体层顶”,是外部的热而稀薄的等离子体和内部的冷而浓密的等离子体的分界面. 在此界面上有着许多重要的波动和输运现象.

两极区的磁力线延伸向行星际空间,在这里带电粒子可以由地球向空间逃逸——极风. 极风在大气成分的演化方面有重要作用.

磁层以外,就是太阳风等离子体和它所携带出的行星际磁场了. 行星际磁场由大尺度的螺旋场和小尺度的起伏场迭加而成,磁场的极性在连续几天以内以一种极性为主,过后几天又以相反的极性为主,相反极性的界面就是‘扇形边界’. 扇形结构与地磁、宇宙线、辐射带和一系列天气现象有密切关系.

4. 光学现象

日地空间有着许多奇妙的光学现象,高纬地区在夜间甚至白天都会看到黄绿色或红色的光线、光弧或光幕,辉映天空,光彩夺目,这就是著名的极光. 极光是太阳微粒辐射和地球高层大气相互作用的产物. 极光光谱的主要原子线是中性或电离原子氧或原子氮的谱线,例如中性氧原子的禁线 5577 埃(黄绿色)和 6300 埃(红色). 极光中还观测到 $H\alpha$ 、 $H\beta$ 等不同的谱线.

气辉是高层大气中又一重要光学现象,是太阳短波辐射与高层大气相互作用的产物. 短波辐射进入大气,引起大气原子或分子的激发态,被激发的原子和分子回到正常状态时会放出一定波长的光,这就是气辉. 气辉的发光高度在 70—300 公里之间.

日地空间最主要、对地球上人类活动关系最大的光学现象是太阳电磁辐射,它具有十分宽广的谱段,从 γ 射线、X 射线、紫外线、可见光、红外线、微波、短波直到长波. 虽然太阳谱很宽广,但能量却集中在由紫外到红外的小范围里,其中紫外占 9%,可见光占 40%,红外占 51%.

太阳辐射受到地球大气的强烈吸收和散射,主要吸收成分是 O_3 、 O_2 、 H_2O 、 CO_2 ; 主要散射介质是大气分子和气溶胶. 太阳辐射能的主要部分来自光球面(6000K 黑体辐射),紫外和 X 线则来自色球和日冕.

5. 行星际和行星环境

其它行星可以当作地球上各种现象的改变了比例尺的天然实验室,探测其它行星的大气、

电离层、磁层是研究日地关系、气候变化、行星演化等问题的重要途径。

金星离地球最近,大小也与地球差不多,但它的表面笼罩着浓密的大气和云层。金星大气以 CO_2 为主,压力为地球大气压的一百倍,表面温度高达 750K。金星是一个缺水缺氧的星球,它的浓密云层是由什么物质组成的,至今还不清楚;由地面或飞船探测都表明不是水滴或冰晶,不少人提出云滴是硫酸或干冰,但有待进一步证实。

火星大气清澈透明,地面特征清晰可见,有大流星撞击造成的坑,也有火山和大尘暴。火星地貌最有趣之点是存在着干涸的河床,有人认为这或许是火星历史上曾经存在过液态水的证据。

在木星表面有低温(135K)冻结 NH_3 晶体组成的云层,在其内部是高温高压环境,由氢组成。木星自转快,行星旋转的偏向力对大气环流起决定性作用。木星磁场比地球强,飞船探测发现了辐射带和磁层特征。在木星大气中还发现了生命前期物质。

土星的一颗卫星——土卫六,是近年空间探测的一个重要焦点;它的主要大气成分是 CH_4 ,表面温度为 160K,表面压力比火星高。有人认为土卫六上也有生命前期物质。

二、空间物理学的研究范围和发展趋势

空间物理学的主要研究内容是:行星际物理、磁层物理、宇宙线空间物理、电离层物理、高层大气物理以及高层大气光学等。

1. 磁层物理

磁层物理研究:(1)磁层大尺度电磁场结构和等离子体对流;等离子体层的形成、结构和演变;地磁场和行星际磁场的相互作用过程。(2)磁层等离子体的不稳定性、等离子体波的激发和传播;高能带电粒子的加速、扩散、注入与消失;波和粒子的相互作用。(3)磁层暴的发生、发展、形态与预报;磁层暴的能量贮存与爆发,

物理

环电流的形成和衰减;磁层暴与太阳活动的关系。(4)带电粒子的沉降,极光,电急流,磁层扰动与电离层、大气的相互关系等。

2. 宇宙线空间物理

宇宙线空间物理研究:(1)太阳宇宙线在行星际空间的扩散、加速及其它传播与起源过程;质子事件和太阳活动的相互关系。(2)行星际冲击波的形成及其与福布斯下降和磁扰之间的关系。(3)宇宙线的电离效应和气象效应等。

3. 电离层物理

电离层物理研究:(1)电离层中的能量传输与平衡,电离平衡,光化反应,热层与电离层的相互作用,电离层不均匀结构。(2)电离层扰动与太阳活动、磁暴、磁层亚暴、极光等现象之间的关系。(3)电离层中波的激发和传播等。

4. 高层大气物理

高层大气物理研究:(1)高层大气结构与动力学,潮汐波、重力波的激发与传播。(2)扩散、对流、光化过程以及热源、热汇和能量平衡。(3)高层大气与磁层、电离层和低层大气的耦合等。

5. 高层大气光学

高层大气光学研究:(1)气晖光谱,强度与激发机制;气晖与D层化学反应。(2)极光形态、光谱、成因及其变化规律。(3)空间紫外、红外与X射线研究等。

6. 行星际与行星物理

行星际与行星物理研究:(1)太阳风、行星际磁场及其与日地空间物理现象的关系。(2)行星磁层、电离层和高层大气的结构与动力学;大气起源与演化,地外生命的探测等。

空间物理学最近 20 年的发展史大致可分为两个阶段,第一个阶段是近地空间环境的普查探测和各有关物理过程的单因子或少数因子的理论研究;第二个阶段是行星际空间与行星

环境的探测和太阳风-磁层-电离层-大气耦合过程的多因子综合观测与理论研究。

空间物理学近 20 年来的蓬勃发展是与空间探测技术的发展分不开的。在五十年代和六十年代,探空火箭已经在不少国家广泛应用,对数百公里高度以内的大气层进行多项目探测研究,实现了大气物理直接观测范围的突破,越过了对流层和平流层,扩展到中层和热层;火箭光谱测量把当时已知的太阳紫外谱由 2900 埃扩展到 977 埃,测定了太阳 Ly- α 、Ly- β 线以及几十条多次电离原子的辐射吸收线和 X 射线;测定了电离层电子、离子浓度,碰撞频率及其它参数;用计数管、电离室等设备进行了宇宙线观测,用云室对原初宇宙线粒子进行了轨迹照相,还用核乳胶研究了宇宙线粒子的高能和重粒子分量。

五十年代末期,发射了人造地球卫星,卫星和飞船做为一种研究工具的出现,在空间探测方面实现了一次大飞跃,开辟了这一研究领域里的崭新局面,使高空大气直接探测的范围越过了高层大气和电离层,进入了外层大气,发现了辐射带和磁层;利用卫星和飞船,实现了对空间环境各参数的全球规模的实测,为空间物理各分支学科的研究提供了大量极其宝贵的资料。

随着空间探测技术的发展,还对两颗离地球最近的行星——金星和火星,进行了大量的

科学考察,对这两颗类地行星的大气和表面特征有了进一步的了解。七十年代中期以来还进行了外行星探测。这些探测将对天体演化、生命起源、空间开发利用等重大课题的研究产生深远影响。

空间探测发展的另一个方面是人工影响与开发利用空间的尝试。

目前科学界对充分利用空间实验室这一特殊环境以进行物理学基础研究,给予了极大的重视。在零重力环境中,流体无对流运动,这对于研究基本的流体动力学过程,特别是在无对流运动的介质中的过程;对于研究表面现象,气体输运现象、流体分离过程、临界点和相变、热量子效应、化学激光、超流液滴实验、核裂变反应和脉动星物理等都有重要意义。空间的零重力是制造某些新材料的良好环境,可用于生长高纯度大单晶,无结构缺陷光学元件,超纯金属及特殊合金等。空间天然分子离子源可用于自由分子流条件下的散射实验。空间还是进行宇宙线实验的良好环境。

空间是一个巨大的自然宝库,蕴藏着丰富的资源,空间太阳能站和行星采矿等将影响未来技术的发展方向。正在进行的人工局部影响空间环境(例如向电离层注入带电粒子束)的主动实验,将朝向控制空间这一远大目标迈进一步。显然,这些空间活动必将对空间物理学的发展,产生深远的影响。

波 谱 学 发 展 近 况

郑 耀 华

(中国科学院湖北物理研究所)

一、引 言

广义来说,物质与电磁波相互作用,产生各种频率的吸收线、散射线或发射线,称为物质的

谱线,研究谱线的特征及其与物质结构和运动状态关系的科学称为波谱学。图 1 列出物质与电磁波相互作用的一般特征^[1]。

从图中看出,波谱学涉及到电磁波各个波段,联系到物质各个层次和运动状态,范围相当