

我国磁层物理研究进展*

刘 振 兴

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要 我国磁层物理是在赵九章倡导下从1959年开始发展起来的,40多年来,我国磁层物理有了很大进展.文章对我国磁层物理研究的主要成果作了概述,主要内容包括:磁层顶边界层的瞬时重联研究,磁层顶的不稳定性和反常输运过程研究,磁层亚暴过程研究,磁尾动力学过程研究,极光加速区非线性波和粒子加速研究,行星磁层研究,最后是磁层物理发展趋势的展望.

关键词 磁层,磁层顶边界层,磁场重联,磁层亚暴

ADVANCES IN MAGNETOSPHERIC PHYSICS IN CHINA

Liu Zhenxing

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Instigated by Zhao Jiu - Zhang, research on magnetospheric physics started in China in 1959. A brief review is presented of its development over the past forty years. The main topics are: transient reconnection at the magnetopause boundary layer, instabilities and abnormal transport of plasma in this layer, magnetospheric substorms and storms, dynamics of the magnetotail, nonlinear waves and particle acceleration in the auroral region. Finally, future prospects are reviewed.

Key words magnetosphere, magnetopause boundary layer, magnetic reconnection, magnetospheric substorm

1 引言

磁层是天体周围被空间等离子体包围并受天体磁场控制的区域.按这一定义,凡是具有磁场(包括星体的固有磁场或感应磁场)都有磁层.磁层物理包括地球磁层物理和行星磁层物理,地球磁层是地球周围被太阳风包围并受地球磁场控制的区域.1957年人造卫星上天以来,首先对地球空间进行了探测,并发现了地球磁层.70年代后,对其他行星展开了探测,探测结果表明,太阳系中的9颗行星都有磁层,太阳也有磁层,称为日球层.目前,除冥王星外,其余8颗行星都进行过探测.

磁层物理在空间物理和空间等离子体物理中占有重要地位.从科学上来说,磁层是一个理想的天然等离子体物理实验室,通过对磁层的探测和研究,可以了解宇宙的一些基本物理过程.从应用来说,地球磁层的探测和研究对空间活动的安全保障和对人类生存环境的维护有重要应用价值.

地球是太阳系中唯一存在人类的行星,地球磁层是当前人类空间活动和空间开发利用的主要空间区域,是人类生存环境的保护层.由于地球磁层所处的特殊位置,因而将地球磁层从

* 国家自然科学基金资助项目

1999 - 07 - 08 收到

行星磁层中分出来,重点进行探测和研究.本文主要是评述地球磁层研究的进展.

2 磁层物理学研究的发展

2.1 国际上磁层物理研究的发展

1957年10月,人造卫星第一次发射成功,使磁层物理学的研究进入了新的纪元.磁层物理学是随着空间探测技术的发展而迅速发展起来的.自卫星发射以来,磁层物理学的发展大致可分为以下几个阶段:

2.1.1 磁层的发现阶段(50年代末至70年代初)

这期间先后发射了大量的科学卫星,对地球磁层不同区域进行了普遍的探测.1958年,美国范阿伦(Van Allen)根据“探险者”1号的探测数据,首先发现了地球辐射带,或称范阿伦带.1959年提出了磁层这个名词.此后,先后探测到了太阳风、磁层顶、磁尾、地球舷激波、等离子体片、环电流、等离子体层顶等,对地球磁层的位形和结构有了大致的了解,逐步建立起了地球磁层的定态模型.

2.1.2 太阳风-磁层-电离层的耦合研究阶段(70年代初至80年代中)

这个阶段是有计划的探测阶段,先后实施了两个重要的磁层探测计划:一是1976—1979年实施的国际磁层研究(IMS)计划,IMS计划的主要目标是研究太阳风与磁层的耦合及磁层亚暴过程;另一是1981年实施的动力学计划(DE),这个计划的主要科学目标是研究磁层与电离的耦合过程.这两个计划大大地推动了地球磁层研究的发展.

2.1.3 磁层物理过程的进一步了解阶段(80年代中至90年代末)

从80年代中期以来,国际空间物理学界就准备进行日地系统整体过程的研究,于1992年至1996年实施由国际空间局协调组(IACG,由美国宇航局、欧洲空间局、原苏联和日本的空间局组成)组织协调的国际日地物理计划(ISTP)和国际能量传输计划(STEP).ISTP原计划发

射10颗核心卫星,其中探测磁层的卫星有8颗.由于Cluster(包括4颗卫星)1996年6月4日发射时失败,目前在磁层中运行的ISTP卫星有6颗.主要科学目标是对磁层中的一些关键科学问题进行研究,如磁层边界层的结构和动力学及磁尾能量流和非线性动力学效应等,预期会有一些突破性进展.

2.1.4 行星磁层探测和研究的发展

自70年代初期以来,国际上开始进行行星探测,先后对金星、水星、火星、木星、土星、天王星和海王星的磁层进行了探测,发展了行星磁层物理学.

2.2 我国磁层物理研究的发展

我国磁层物理学探测和研究的发展,是从1957年(国际地球物理年)后在赵九章先生的组织和领导下发展起来的,赵九章先生是我国空间物理学的开拓者和奠基者.在国际地球物理年期间,建立了北京地磁台和宇宙线观测台.

在赵九章教授的亲自主持下,1959年,我国正式成立了磁层研究组(当时称为磁暴研究组).在地球辐射带、太阳风和磁层的相互作用及磁暴理论和形态方面开展了一些研究,为以后我国磁层研究的发展奠定了基础.1960年,赵九章在论述国际地球物理动态的基础上,首先指出了我国磁层物理的研究方向.1963年,赵九章系统地评述了太阳风、空间磁场和高能粒子探测的发展^[1],提出了我国磁层研究的主要科学问题,他的这些研究推动了我国磁层物理的发展.在1960年至1965年期间,赵九章领导的磁层研究组取得了一些重要的研究成果,包括:地磁扰动期间史笃默捕获区的变化,带电粒子在磁场中的运动,磁暴期间辐射带结构、投掷角、通量强度和辐射带位置随磁暴强度的变化,太阳风粒子穿入磁层的机制.赵九章对这些研究作了系统的评论(Staff Member, Joint Section of Aeronomy, 1965),并在国际会议上作了报告.上述科学问题,至今仍是磁层物理中的重要课题,当时的这些研究工作,为以后我国磁层物理研究的发展奠定了基础.

80年代以来,我国的磁层物理研究有了很物理

快的发展,现已形成了一批水平较高的科研队伍和科研机构.先后承担了几个重要的研究项目,如1982—1985年中国科学院的重点项目“太阳风-电离层和高层大气的耦合”,1983—1990年中国科学院重大项目“太阳22周峰年日地整体行为研究”,1993—1997年国家自然科学基金委员会“八五”重大项目中的“太阳风扰动向磁层的传输”等.另外,80年代以来我国磁层物理界开展了广泛的国际交流和合作,特别是1993年中国磁层物理界与欧空局 Cluster 科学数据系统(CSDS)建立了合作关系,在我国已是欧空局 CSDS 的正式成员.通过上述重大研究项目和广泛的国际合作,推动了我国磁层物理研究的发展.

3 我国磁层物理研究的新进展

1994年,刘振兴和濮祖荫对我国磁层物理研究的进展作过较全面的评述^[2].本文着重介绍近十多年来我国磁层物理研究取得的主要进展.

3.1 磁层顶边界层瞬时重联研究

目前认为,磁场重联是太阳风能量向磁层传输的主要机制之一.近10多年来,我国在磁场重联研究方面取得了很大的进展,我国学者提出的多X线重联(MSR)模型和涡旋诱发重联(VIR)模型,在1994年国际磁层顶物理学术讨论会上与国外学者提出的爆发单X线重联(BSXR)一起被评论为当今瞬时重联(通量传输事件)的3个基本模型.

3.1.1 多X线重联

1985年,我国学者李罗权和傅竹风提出了多X线重联(MXR)模型^[3].多X线重联与单X线重联不同,多X线重联是被撕裂模不稳定性修正了的两个相互靠近的磁化等离子体之间的磁场重联过程,在两种不同的等离子体的分界面内,可沿着几条重联线(X线)发生重联.多X线重联过程不能达到稳定的重联结构,磁岛可增长至较大尺度.由于撕裂模不稳定性的非线性饱和,磁场重联率下降并停止.结果,当饱和

的磁岛对流出重联区后重联又开始发生,磁岛将是准周期性地重复形成.研究结果还表明,只有当系统的特征尺度长、重联率高和电阻小时多X线重联才会发生.首先将多X线重联理论用来解释通量传输事件(FTEs),该理论可较好地解释FTEs的一些主要观测特性,如FTEs间歇性的出现、能量管的截面积以及FTEs管的磁力线是螺旋式等.另外,还用粒子模拟方法研究了多X线重联过程及其对FTEs的应用.

1991年以来,我国学者用可压缩的MHD方法模拟研究了垂直流场驱动的多X线重联过程,结果表明,在驱动重联过程中,存在着磁岛的聚合过程;在不同的入流驱动下,磁雷诺数存在临界值 R_m^* ,如 $R_m < R_m^*$,等离子体系统逐渐趋于稳定单X线重联;当 $R_m > R_m^*$ 时,间歇性的次级撕裂模产生重复出现的磁岛,而且入流马赫数越大,则产生间歇性次级撕裂模的临界值 R_m^* 越高, M_a 与Alfvén马赫数 M_a^* 之间基本上符合线性关系^[4].

3.1.2 涡旋诱发重联

1986年,我国学者刘振兴等首先提出一种新的磁场重联理论,称为涡旋诱发重联(VIR)理论^[5].此后,刘振兴和濮祖荫等对VIR的动力学特性作了系统的理论和模拟研究,取得了一些重要的结果^[6].涡旋诱发重联的主要论点是:在同时存在流场剪切和磁场剪切的等离子体区,开尔文-亥母赫兹(K-H)不稳定性产生流体涡旋,磁场对流体的响应引起磁力线的扭曲和打结,产生局域的磁场重联,结果在流体涡旋区形成同心的磁涡旋(磁岛).VIR理论揭示了一些新的物理现象和物理过程:

(1) VIR的发展取决于K-H不稳定性和撕裂模不稳定性的相互作用.K-H不稳定性与撕裂模不稳定性的相互作用产生一种新的不稳定性,称为涡旋撕裂不稳定性,这种不稳定性可产生快速的瞬时重联过程.

(2) 当VIR达到准稳态时,磁场、流场、等密度线和等涡度线均呈现相似的涡旋状态,这与多X线重联和单X线重联完全不同.

(3) 在VIR过程中,同心的磁场涡旋和流

体涡旋形成一种新的磁流体结构,称为磁流体涡旋,三维情况下是磁流体涡旋管(MFT).在MFT中存在着场向电流和Alfven波,并沿磁力线传播,磁力线是螺旋式的,VIR是局部区域产生场向电流的一种机制.

(4)在VIR过程中存在着流体涡旋和磁岛的合并过程,说明大涡旋是由小涡旋合并而成的.

根据VIR理论,建立了一个通量传输事件(FTEs)的VIR模型.利用理论和数值模拟方法,对FTEs的形成、结构、运动和信号特性作了较系统的研究.这一模型可解释FTEs的一些主要的观测现象,理论结果与61个观测实例的对比结果表明,理论与观测符合得很好^[7].涡旋诱发重联理论获1993年中国科学院自然科学一等奖和1995年国家自然科学三等奖.

1995年以来,中国学者又对VIR模型和BSXR模型作了对比研究,发现当磁层顶Alfven马赫数 M_a 大于某一临界值 M_{ac} 时,VIR占优势, $M_a < M_{ac}$ 时,BSXR占优势, M_{ac} 大约在0.3—0.6之间.这一结果表明,如初始时FTEs是在日下点附近由BSXR产生,当FTEs向高纬运动时, M_a 逐渐增大,FTEs会演化为VIR的结构形式^[8].

1997年以来,中国学者研究了可压缩情况下多电流片系统中的涡旋诱发重联过程,结果表明:多电流片系统中反对称模涡旋诱发重联的增长率要比单电流片和双电流片快得多,且电流片之间距离越近,增长率越大;在可压缩情况下,涡旋诱发重联只有在一定的Alfven马赫数 M_a 范围内发生;发现涡旋诱发重联过程可产生激波^[9].

3.1.3 湍动(无规)重联^[10]

观测结果表明,在磁层顶电流片内经常观测到无规则的小尺度结构.最近,我国学者用二维MHD方法模拟研究了磁层顶电流片区的湍动重联和混沌现象,结果表明,同时存在速度剪切与磁场剪切的MHD系统,若外界不断向该系统输入能量,当磁雷诺数充分大时,可发生湍动重联,形成许多无规的小尺度涡旋和磁岛,在

三维情况下每一个小尺度的磁岛和涡旋对应于一条小尺度的电流管.在此基础上,利用多重尺度法,研究了磁层顶电流片的混沌现象,发现磁岛具有结构不稳定性,磁岛结构出现次谐波分叉,分叉不断进行下去,系统进入混沌状态.在物理上对应磁岛多次分裂,形成许多无规小尺度结构,此即湍动(随机)重联的物理成因.研究结果表明,在中等磁雷诺数条件下,小磁岛可通过合并形成中、大尺度磁岛;反之在大磁雷诺条件下,大、中尺度磁岛又可分裂成为小尺度磁岛.

3.1.4 横向剪切流冲击重联^[11]

前面提到的多X线重联是由电流片两边方向相反的两股均匀横向流驱动产生的,涡旋诱发重联是由场向剪切流产生的流体涡旋诱发的.最近我国学者用二维可压缩MHD方法,模拟研究了向阳面日下点附近区域单方向的横向剪切流冲击引起的瞬时重联过程,取得了一些新结果.研究结果表明,横向流的剪切强度和冲击时间长短对日下点附近磁层顶边界层区的磁场重联过程和结构有重要的影响.发现当横向流均匀时,磁力线不发生弯曲和重联,只是磁层顶向磁层一边运动;当横向流具有弱剪切时,日下点附近磁力线向内弯曲,在磁层顶区产生磁场重联,且随着冲击时间的增长,重联区向磁层一边运动;当横向流剪切较大时,先是在磁鞘一边形成反向磁场区,在这里发生磁场重联并形成磁岛,然后在磁层顶区发生磁场重联,形成类“反K型”重联场结构;当横向流剪切很强时,先后在磁鞘区和磁层顶区发生磁场重联,最后在磁层区也可能发生磁场重联.另外还发现,在这一过程中,不论在磁鞘区和磁层区,都出现磁力线的疏密结构并伴随着波动的传播.

我国学者首次提出外流作用突然停止可能是驱动等离子体边界层能量转换和磁场重联的一种重要机制.研究结果表明,当横向剪切流突然停止后,系统内部出现多种类型的流体涡旋,相应地发生不同类型的瞬时重联.

3.1.5 高纬边界层磁场重联^[12]

高纬边界层(HLBL)区的磁场重联,对背阳侧太阳风向磁层的传输、磁尾的结构和高纬

物理

电离层的扰动都有重要的影响,近几年来 HLBL 区的磁场重联受到国际磁层物理学界的重视.1990 年以来,我国学者将涡旋诱发重联理论推广到 HLBL 区,用二维可压缩 MHD 方法模拟研究了 HLBL 区的瞬时重联过程,取得了一些重要的研究成果.结果表明,行星际磁场 (IMF) 的方向对 HLBL 区的磁场重联有重要的影响.

当 IMF 的 $B_z \approx 0$ 时,HLBL 区的重联主要取决于 IMF 的 B_x 的方向.当 IMF 的 B_x 是太阳向时,北半球的极隙区和南半球的 HLBL 区发生重联;当 IMF 的 B_x 为尾向时,情况刚好相反,南半球极隙区和北半球 HLBL 区发生重联.由此可以得出结论:当地球磁层处于相同的 IMF 扇形结构时,南北半球 HLBL 区的重联结构是不对称的.若 IMF 的 B_z 为北向时,不论 IMF 的 B_x 是太阳向还是地球向,南北半球的 HLBL 区都可发生磁场重联,产生 X 中性线及流体涡旋和磁岛.在 X 中性尾侧,流体涡旋和磁岛向磁尾方向运行.首次提出当 IMF B_z 北向时在 HLBL 区可能出现类似于向阳侧的流量传输事件,但其 B_n 信号在南北半球都是先负后正.在 X 中性线的地球一侧,重联磁力线向太阳方向运动,可以解释当 IMF 北向时极盖区缩小及向阳侧磁层顶向外扩张的原因.研究结果可以解释当 IMF 北向时极区磁层、对流电场、场向电流和白天极光的一些特性.

3.2 磁层顶不稳定性和反常输运过程研究^[13-15]

太阳风的能量、动量和质量向磁层传输的另外一种机制,是磁层顶边界层的粘性作用,这种反常粘性是由磁层顶区的等离子体不稳定性产生的.我国学者对磁层顶区可压缩 MHD K-H 不稳定性作了系统的研究,提出 K-H 表面波可向磁层输运动量和能量.此外,建立了无碰撞等离子体的 K-H 表面波理论,研究了可压缩 K-H 不稳定性的三层模式和磁层顶边界层内 K-H 不稳定性波的特性.

微观不稳定性是引起磁层顶区反常输运的主要原因.我国学者研究了磁层顶下混杂漂移

不稳定性,认为其准线性扩散效应可使磁层顶的厚度类似于磁渗透的反常输运,其准线性扩散系数 D 可达到 $10^9 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.最近我国学者研究了磁层顶区的非线性态及磁岛的结构不稳定性,指出磁层顶随机重联所引起的磁逾渗效应在太阳风-磁层能量耦合中所起的重要作用,并详细地讨论了太阳风-磁层能量耦合函数.上述这些研究成果,推动了磁层顶区的不稳定性和反常输运过程研究的发展.

3.3 磁暴和磁层亚暴研究

磁层物理中的关键问题之一,是磁层能量的转化和释放过程.磁暴和磁层亚暴是磁层能量释放过程的主要表现形式,是引起磁层、电离层和高层大气扰动的主要因素,是日地空间物理中的核心问题.

章公亮等对磁暴形态及磁暴与行星际扰动的相关性作了大量的研究,提出了形态和强度相结合的新的磁暴类型分类和“磁暴类型对行星际扰动组合结构的响应”的概念,对磁暴发生机制及其对行星际条件响应过程的研究起了推动作用^[16].

80 年代以来,我国学者对磁层亚暴作了大量的研究.早在 80 年代初,就提出了太阳风涨落加热等离子体片从而产生磁层亚暴的机制,这与数年后美国学者提出的热灾变模型有相似之处.我国学者还研究了磁层亚暴期间等离子体片边界层的 K-H 不稳定性,这与以后国外提出的亚暴边界层模型有类似点.等离子体片变薄是亚暴增长相和膨胀相期间的一个重要特征.我国学者指出,磁层对流对等离子体片的变薄有重要影响.用二维 MHD 方法模拟研究了磁暴的演化过程,结果表明,在晨-昏电场的驱动下,磁层亚暴可间歇性出现,重现时间为 2-4h.

磁层亚暴是太阳风-磁层-电离层系统复杂的能量耦合过程,等效电路模型有可能抓住物理本质而将问题简化.1988 年,我国学者建立了一个比较完整的模型,计算了亚暴期间场向电流、极光电集流和环电流随时间的变化,计算结果与 AE 指数的观测特性相符,并能区分

直接驱动与卸载两种过程,受到国内外同行的重视^[17].在此基础上提出了更完整的磁层-电离层等效电网络模型,研究磁层-电离层系统对行星际条件的响应,发现当行星际磁场南向分量持续时间较长时,磁暴主相期间可间歇地出现多次磁层亚暴,这对探讨亚暴机制和地球空间对行星际扰动的响应过程有启发作用.

近年来的卫星探测数据表明,磁层亚暴可能发生在近地(6—10个地球半径)磁尾.1992年,濮祖荫等分析同步高度卫星(GEOS2)的资料后发现,磁层亚暴增长相后期,近磁尾出现强的指向地球方向的能量离子梯度,磁力线被拉向磁尾.在此基础上建立了统一完整的近磁尾MHD气球模不稳定,即近磁尾位形不稳定性(NEMTCL)理论,认为增长相后期一旦极区电离层电导率突增,该不稳定性便可在近磁尾内边界附近发生,从而对亚暴膨胀相的触发起重要作用.另外,还论证了当存在地向等离子体流时NEMTCL更容易发展,因此中磁尾重联可通过NEMTCL触发强亚暴.据此将中性线模型和电流中断模型相结合,提出了一个亚暴膨胀相的全球模型.无疑,从全球过程入手是研究亚暴机制的正确途径^[18].

3.4 磁尾动力学研究

磁尾的磁场结构及等离子体的分布、运动和加速过程与磁层亚暴的发生和发展密切相关.早在80年代初,我国学者即对带电粒子在二维中性片磁场中的运动规律进行了系统的理论和数值研究,从粒子轨道理论出发,讨论了磁尾中性片中的粒子在晨-昏电场作用下产生的散射、沉降、加速以及电流系统^[19].论证了晨-昏电场的起伏导致粒子轨道进入混沌状态,使离子受到随机加热.利用二级近似研究了等离子体片边界层内的波-粒子相互作用,提出被热化的各向同性束离子可能是中心等离子体片热离子的来源.利用Tsyganenko磁场模型,把整个赤道附近的磁尾分为绝热区和非绝热区,认为后者与极光带相对应,是磁层亚暴沉降粒子的源区.徐荣栏等最近还建立了一个曲线坐标系,磁尾中性片可表达为它的一个坐标曲面,

该中性片模型的位形随地球轴倾角周年变化而变化,作者们指出,这一模型可适用于整个背阳面磁赤道区,受到国内外同行的注意^[20].

亚暴活动中,远磁尾主要表现为磁重联以及与此有关的等离子体团(磁岛)的形成和运动.我国学者研究了电流片中的流动撕裂模、腊肠模和扭曲模不稳定性^[21],认为流动撕裂模和腊肠模可以在磁尾中出现;远磁尾 B_z 分量的变化可能由这类不稳定性引起,数值模拟结果表明,重联形成的等离子体团向尾向喷发,等离子体团地球一侧等离子体片变薄.亚暴和磁尾重联之间的关系是目前磁层物理学中有待从观测和理论两方面继续研究的前沿课题.

3.5 极光加速区非线性波和粒子加速研究

我国学者对极光加速区中的非线性波进行了较系统的理论研究.这些研究表明,在极光加速区的等离子体系统中,可能存在离子声波、离子声孤波、离子回旋波和离子回旋孤波.作者们在不同等离子体参数下对这些波的特性和相互关系进行了讨论,其中某些理论结果可以解释卫星测到的极光加速区电场的若干特征.另外,对极光千米波辐射和极光嘶声的部分观测结果作了分析,研究了极区沉降电子激发电磁波的理论、极区的磁体流慢激波和极光区的非线性波.

极区沉降电子的加速是受到关注的问题.我国学者对极光沉降电子加速过程进行了较系统的理论研究.在准线性的动力论方程中,考虑了平行电场和等离子体湍流联合加速的作用,解出了沉降电子的分布函数和通量的能谱分布,并计算了能量随时间的变化率.1995年,我国学者提出了一个新的极光粒子加速机制,认为磁层亚暴期间近磁尾赤道区激发的Alfvén波向电离层传播时将非线性演化为行波涌浪,它携带的平行电场可把电子由几个电子伏(eV)加速到1—10keV;电场结构也与S3-3和Viking卫星观测一致^[22].磁层中起源于电离层的离子的存在是近年来磁层探测最重要的发现之一.观测显示上行离子可对磁层亚暴的触发和磁暴环电流的发展起关键作用,其源区

位于极光带电离层.用准线性动力学理论研究了极光区上行离子(H^+ 和 O^+)的加速过程,求解了上行离子的分布函数,结果表明,离子锥分布的形成主要是由波湍流的垂直加速和地磁场梯度力引起的;场向电场是产生束分布的主要因素.氧和氢的能量比率和投掷分布与卫星探测结果相符^[23].考察了不同离子成分在磁层中的分布及其随地磁活动性强弱的变化,所得结果与观测符合甚好^[24].上行离子的非定态分布及其与磁暴和磁层亚暴的因果关系是值得进一步探讨的重要课题.

3.6 行星磁层研究

行星磁层在磁层物理的研究中占有重要地位.通过行星磁层的对比研究,可进一步了解地球磁层.木星磁层是快速旋转磁层的典型代表,我国学者对木星磁层作了一些研究,取得了一些重要结果.刘振兴(1982)建立了一个新的木星磁层的磁盘结构模式^[25].这个模式考虑了磁盘的波状结构及等离子体的转速随径向距离的变化,发现等离子体的旋转能量与热能之比,是影响木星磁盘结构的主要参数,它决定着各物理量的分布和等离子体厚度的变化.木星 I_0 能量管是木星磁层中的重要区域,对木星磁层动力学有重要的调制作用,是木星磁层中粒子的主要源区.对 I_0 能量管中的等离子体湍流和低频段无线电波的激发和功率进行了计算研究,这对讨论 I_0 能量管中粒子的加速是有意义的.到目前为止,木星磁盘模式中均未考虑径向等离子体流的影响.刘振兴和王水(1989)提出了一个考虑径向等离子体流的磁盘模式,并对等离子体片中的大尺度弯曲波进行了探讨.作者指出,木星的波状磁盘结构可能是由于这种大尺度弯曲波引起的.濮祖荫等(1984)对土星磁层顶处的 $K-H$ 不稳定性和磁流体力学表面波进行了研究^[26].结果表明,土星磁层随星体自转以及磁鞘之间的速度差,可在午前、中午、午后的磁层顶区激发不稳定性,计算所得到的波的特性与观测相符.另外,徐荣栏等(1985)对土星环系统中带电粒子振荡运动的稳定性问题作了研究^[27].

近几年来,国际上对火星的探测又掀起了新的高潮.火星在行星的比较研究中占有优势地位.最近我国学者开始对火星磁层进行研究,评述了火星磁层的探测和研究结果,研究了火星磁层的内禀磁场对氧离子分布的影响.

4 磁层物理学发展的展望

当前世界上各空间大国正在制订21世纪前20年的空间物理各分支学科的战略计划.展望21世纪,磁层物理学的发展趋势是:进一步加强磁层与太阳风、极区电离层和高层大气耦合过程的整体研究,开展磁层边界层和磁层多尺度过程研究,开展地球磁层和行星磁层的比较研究,加强磁层亚暴和磁暴的全球过程及其预报的研究,进一步加强磁层课题研究与磁层探测计划的密切配合.

磁层探测的发展趋势是:进一步加强国际合作,发展小卫星技术,开展多卫星的磁层星座卫星探测,开展磁层多尺度的探测,发展轻小型的紫外、X射线和中性粒子成像仪器,开展磁层的成像探测.

我国是一个空间大国,应对国际上磁层物理的发展作出我国应有的贡献.现对2000—2020年我国磁层物理的发展的展望概述如下:

(1) 磁层物理的战略主题

重点研究磁层亚暴、磁暴和磁层粒子暴对太阳活动、行星际扰动和磁层顶边界层动力学响应的全球过程;建立磁层环境的动态模式和物理预报模式;开展地球磁层和行星磁层的比较研究;为空间活动、空间开发利用和地面技术系统的安全保障提出科学依据.

(2) 制订磁层探测计划

根据国际上的发展趋势,科学研究的需求及我国的具体条件,制订出有我国自己特色和切实可行的磁层探测计划.

(a) 实施地球空间双星探测计划(简称双星计划)

我国提出的双星计划与欧空局的Cluster II(包括4颗卫星)相配合,将成为下世纪初国际

上的重要磁层探测计划,力求在 2001—2002 年 23 周太阳峰年期间发射。

(b) 近地磁层成像小卫星计划

主要科学目标是进行近地磁层能量粒子的可视化探测,研究磁层亚暴和磁暴的发生和发展过程及警报和预报。

(c) 太阳风 - 磁层暴联系探测计划

包括 3 颗小卫星,重点研究磁层亚暴、磁暴、磁层粒子暴对行星际扰动的响应过程。

(3) 发展新型探测仪器,包括轻小型、高分辨率的磁强计、等离子体、能量粒子和中性能量原子成像仪。

(4) 建立与卫星探测相配合的地面观测系统。当前主要是实施“子午链”重大工程。

(5) 进一步开展国际合作,参加国际上磁层物理的探测和研究项目,力争在下世纪初使我们的磁层物理研究进入国际先进行列。

(6) 积极建立我国磁层物理的创新体系,提高开放实验室的水平,尽快培养年轻的磁层物理研究人才,为下世纪前 10 年内我国磁层物理的发展建立好的基础。

参 考 文 献

[1] 赵九章.科学通报,1963,11:9—12
[2] 刘振兴,濮祖荫.地球物理学报,1994,37(增刊):538—551
[3] Lee L C, Fu Z F. Geophys. Res. Lett., 1985, 12:105—108
[4] 金曙平,周鸿松.地球物理学报,1995,38:702—709
[5] Liu Z X, Hu Y D. Geophys. Res. Lett., 1985, 15:752—755

[6] Liu Z X, Pu Z Y. Chin. J. Geophys., 1990, 35:1—12
[7] Liu Z X, Zhu Z W, Li F *et al.* J. Geophys. Res., 1992, 97:19351—19361
[8] Fu S Y, Pu Z Y, Liu Z X. J. Geophys. Res., 1995, 100:5657—5663
[9] Chen C, Liu Z X. Physics of Fluids, 1999, 6:1—4
[10] Fu S Y, Pu Z Y, Liu Z X. J. Geophys. Res., 1995, 100:12001—12009
[11] Chen T, Liu Z X. SIMPO, Newslett., 1995, 5(15):3—13
[12] 刘振兴,祝中伟,濮祖荫.地球物理学报,1995,38:141—149
[13] Pu Z Y, Kivelson M G. J. Geophys. Res., 1983, 88:841—852
[14] 涂传治.物理学报,1982,31:1—16
[15] Pu Z Y, Wang X M. J. Geophys. Res., 1997, 102:69—76
[16] 章公亮.中国科学基金,1997,2:91—96
[17] Liu Z X, Lee L C, Wei C Q *et al.* J. Geophys. Res., 1988, 93:7366—7375
[18] Pu Z Y, Korth A, Hong M H *et al.* J. Geophys. Res., 1997, 102:19341—19344
[19] 徐荣栏,古世芬.空间科学学报,1983,3:23—28
[20] 朱明,徐荣栏.空间科学学报,1994,14:269—276
[21] Wang S, Lee L C, Wei C Q. Phys. Fluids, 1988, 31:1944—1948
[22] 宋礼庭.地球物理学报,1995,38:6—15
[23] Liu J G, Liu Z X. Chinese Phys. Lett., 1993, 10(suppl.):258—260
[24] 史建魁,刘振兴.地球物理学报,1996,39:154—168
[25] Liu Z X. J. Geophys. Res., 1982, 87:1691—1694
[26] 濮祖荫.空间科学学报,1988,4:105—111
[27] Xu R L, Harry L F. J. Geophys. Res., 1985, 90:11375—11384