日冕磁场与等离子体综合探测望远镜

屈中权^{1*}, 黎辉², 钟悦¹, 梁昱¹, 宋智明¹, 章海鹰³, 张红鑫⁴, 陈耀⁵, 田晖⁶, 程鑫⁷,
夏利东⁵, 李波⁵, 陈波⁴, 闫晓理¹, 刘睿⁸, 申成龙⁸, 封莉², 侯俊峰⁹, 李昊¹, 李臻⁷,
李少英¹

1. 中国科学院云南天文台, 昆明 650216;
2. 中国科学院紫金山天文台, 暗物质与空间天文重点实验室, 南京 210034;
3. 中国科学院南京天文光学技术研究所, 南京 210042;
4. 中国科学院长春光学精密机械和物理研究所, 长春 130033;
5. 山东大学(威海)空间科学学院, 威海 264209;
6. 北京大学地球和空间科学学院, 北京 100871;
7. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023;
8. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;
9. 中国科学院国家天文台, 北京 100101

*联系人, E-mail: zqqu@ynao.ac.cn

收稿日期: 2018-08-29; 接受日期: 2018-09-27; 网络出版日期: 2019-04-04

国家自然科学基金(编号: 11527804, 11078005, 19973016)资助项目

摘要 太阳物理研究亟待解决的重大核心问题包括了太阳爆发、日冕加热和太阳风加速等机制. 揭示这些现象背后的发生和发展规律将为空间灾害性天气预报和相关天体物理研究提供精确有效的模型. 建议设计的日冕磁场和等离子体综合探测望远镜(COronal Magnetism and Plasma ASsembled Scopes, COMPASS)由口径为1.26 m大型日冕磁场探测望远镜(COronal Magnetism Probing Telescope, COMPT)、口径为0.30 m中型二维成像光谱日冕仪(Two-dimensional Spectroscopic Diagnosis Coronagraph, TSDC)以及安装在COMPT上的0.09 m的口径小型Lyot日冕仪(COMPASS-SC)组成. COMPT主攻高度范围0.05–0.65太阳半径(R_{Sun})内矢量磁场和热动力学参量精确测量, TSDC聚焦在(0.10–1.50) R_{Sun} 高度范围内对日冕等离子体的各项物理参量进行诊断以及提供全方位日冕结构和演化监测, 而COMPASS-SC为COMPT提供其积分视场观测区域定位以及大视场日冕演化监测. 这一组3台日冕仪功能互补互联, 集中测量(0.05–1.50) R_{Sun} 高度范围的矢量磁场和热动力学参量分布及其演化. 由于其创新性设计, COMPT建成后不仅将成为国际上最大口径的折射式望远镜, 也将成为第一台具有高偏振测量精度的多条谱线同时偏振成谱成像的日冕仪, 而TSDC首次将白光偏振成像和谱线二维(线偏振)成像光谱测量功能集于一身. 本文首先概括了COMPASS的科学需求和国外仪器的发展态势, 然后从总体设计思想和理念、光机电初步设计等方面对COMPASS进行介绍, 并特别阐述了围绕科学目标而做出的创新性仪器设计.

关键词 天文望远镜, 太阳物理, 日冕磁场

PACS: 47.27.-i, 47.27.Eq, 47.27.Nz, 47.40.Ki, 47.85.Gj

引用格式: 屈中权, 黎辉, 钟悦, 等. 日冕磁场与等离子体综合探测望远镜. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 059606

Qu Z Q, Li H, Zhong Y, et al. COronal Magnetism and Plasma ASsembled Scopes (COMPASS) (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 059606, doi: [10.1360/SSPMA2018-00304](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00304)

1 引言

自1814年夫琅禾费(Fraunhofer)发现太阳吸收光谱线以来, 太阳物理研究已经跨过了漫长的2个多世纪, 而在1908年海尔(Hale)^[1]发现太阳磁场的存在并对其进行了初步探测以后, 太阳观测仪器在不断发明和改进, 重大突破也离我们越来越近. 可以预计, 这些重大突破可能在以下方面展开: (1) 证认太阳各种尺度剧烈爆发现象的成因; (2) 揭示日冕加热机理; (3) 诊断太阳风加速机制; (4) 理解太阳磁场的起源.

阻碍以上所列(1)–(3)项取得突破的主要原因是太阳观测的瓶颈——日冕磁场的测量. 太阳物理研究表明^[2], 所有的能量长时间大规模积累和突然释放都是磁场的非势分量位形变化的结果, 而磁能的爆发式释放则是通过磁重联来实现的. 因此, 一方面, 日冕磁场的精确测量将会为我们揭开通常互相关联的日珥爆发(Prominence Eruption, PE)^[3–5]和日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)^[6–11]等影响日地空间天气的大尺度爆发的谜团. 另一方面, 太阳物理学家相信, 磁能不仅供给大尺度爆发所需要的能源, 而且也对日冕加热^[12–15]和太阳风加速^[16,17]起着至关重要的作用. 由于磁场的存在, 使得日冕中波动模式更加丰富^[18], 且这些波动也被认为是加热日冕的主要能量载体之一.^[12–14]

在缺乏日冕磁场常规测量信息的情况下, 太阳物理学家经常采取的办法是以光球矢量磁场测量结果加上一定的假设(如磁场旋度为零的势场, 线性或非线性无力场等)来外推出日冕磁场的构型^[19,20]. 毫无疑问, 这种外推可以帮助我们去理解爆发过程和可能的机制, 但是由于假设的可靠性和适应性(高 β 的光球和低 β 的日冕物理状态差别极大), 外推结果都存在一些不确定因素^[21]. 由于科学研究发展依赖于实证, 因此, 日冕磁场精确测量始终是困扰太阳物理工作者的问题.

自从里奥(Lyot)^[22]于1930年发明日冕仪以来, 尽管日冕的常规测量得到广泛的应用, 但迄今为止, 日冕矢量磁场的常规测量还是一个尚未解决的大难题. 最近, Parker Solar Probe已经成功发射, 最终将抵达日心距9.8个太阳半径(R_{Sun})处实地直接探测延伸日冕的磁场, 具有划时代的意义. 但是, 其测量的空间覆盖有限, 且进行的是延伸日冕的磁场观测, 此外预计观测持续时间只能到2025年. 因此, 包括太阳在内的天体磁场

常规测量还是主要依赖于辐射偏振遥感测量.

尽管磁重联理论自20世纪50年代以来经过不断演进成为大家公认的太阳大气中不同尺度爆发现象供能机制^[23–25], 根据运动特征和形态演化作为证据的事例也积累得越来越多^[26–29], 但是在这些例证中磁重联过程本身的磁场演化图像并不是从观测中获得. 因此, 日冕磁场测量成为太阳物理学亟待解决的问题.

日冕磁场的探测是根据观测区域的辐射特性, 尤其是辐射的偏振特性进行分析反演得到磁场信息的^[21]. 这是因为如果粒子带有净电荷或具有一定的磁矩, 处于磁场中产生的辐射就会受其影响. 宏观上, 自由带电粒子会产生回旋辐射, 可以通过射电观测提取磁场信息^[30]. 而微观上, 磁场可以使原子或离子的能级退简并而产生分裂. 如果各子能级具有不同的极化特性, 那么能级之间束缚-束缚跃迁产生的辐射就会呈现偏振特性, 其辐射强度光谱特征也与无磁场存在的情况下不同, 这就是塞曼效应^[31]. 一般来说, 在可见光和红外波段, 我们正是利用这一特性来诊断天体磁场的; 另一方面, 由于日冕光学薄的原因, 与光学厚度成正比的磁光效应的影响往往可以忽略.

日冕磁场测量是一个极其困难的任务. 不同于光球磁场的测量, 日冕磁场测量有其特殊性, 这些特殊性造成的困难之大使得迄今为止还没有真正成功的日冕矢量磁场测量. 但是随着理论和技术的发展, 我们对这些困难并非束手无策. 下面列举出在光学和红外波段进行日冕磁场常规观测面临的困难和可能的应对之策.

(1) 日冕磁场通常很弱. 这意味着由塞曼效应产生的偏振信号很弱, 导致探测到的信噪比很低. 通过以下两个途径可以使此种情形得到很大改善: 一是通过增大望远镜口径提高探测到的信号强度; 二是降低噪声, 包括了选择高海拔地区良好的台址来降低地球大气散射和对仪器杂散光进行充分抑制, 以及利用偏振光学开关^[32,33]来降低大气视宁度变化以及仪器制造非完美性产生的噪声. 为了获得足够的偏振测量精度, 还需要定时输入标准的偏振信号作为校正源对测量进行偏振校正.

(2) 日冕辐射强度不但微弱, 而且其强度随高度急剧减小^[34]. 通常, 在宁静区从日面边缘开始辐射强度从日心辐射强度的几十万分之一到约2个 R_{Sun} 处的亿分之一. 如果对高度差别大的空间点在同一探测器上

同时成像, 基于滤光器或干涉仪的观测应对该问题的解决方案常常是采用一块衰减度从中心到边缘逐渐减小直至消失的渐变减光片. 而当我们采用积分视场单元(Integral Field Unit, IFU)的观测模式时则是采取按高度范围将IFU前端分区, 在离太阳圆面边缘较低层次接收辐射的单元具有较小的通光口径从而导致较高的空间分辨率, 而在较高层次的单元具有较大的通光口径从而导致较低的空间分辨率. 将对应不同高度的光纤信号分区导入不同的光谱仪进行色散后由不同的探测器接收. 因此, 这一方案不需要减光板, 而不同区域信号采集可做灵活处理. 值得注意的是, 对于剧烈爆发活动, 其亮度可以增加2个量级, 这有利于时间分辨率的提高.

(3) 日冕处于低 β 状态, 物质与磁场相互“冻结”^[2,21]. 如若对具有很高表观速度的爆发现象进行观测, 高时间分辨率日冕磁场的测量是必需的, 否则其探测到的偏振信号将是在一个偏振调制周期内诸多不断进入和离开视场的物质结构“携带”的磁场所产生的加权平均结果, 而权重的计算具有不确定性. 这一情形对仪器空间分辨率和时间分辨率进行了有效的限制和约束. 一般来说, 观测对象的特征速度乘以曝光时间应该与每一个像元对应的空间尺度大小相当.

(4) 日冕物质由于密度很低, 物质对辐射传播往往是光学薄的. 我们测量到的信号可能是沿观测方向的诸多偏振辐射源叠加的结果. 这是观测资料解释面临的一个问题^[21]. 因此, 我们获得的信息是一种视向加权平均结果, 而权重的确定很难. 此类问题在光球和色球测量中也会遇到, 但日冕面临的问题更为突出. 首先想到解决此类问题的方法就是多视角同时测量^[35], 但目前在地面上无法实现. 其次, 我们可以区分日冕分布较为均匀且变化较为缓慢的背景磁场测量和特征体(如冕环、冕流、日珥和日冕物质抛射)磁场观测. 这样我们可以通过不同时间的测量, 假定背景磁场具有长得多的演化时标从而分离特征体磁场和背景磁场的各自贡献来探测. 特征体证认(如冕环尺度大小及其数目)既可在光学波段, 也可根据空间极紫外(EUV)仪器观测结果来进行. 另外一种间接的方式便是输入一定的磁场位形(势场, 或者无力场)和大气模型结合产生理论偏振信号, 然后与观测到的偏振信号进行比对来核实该磁场位形反映真实位形的有效性^[36].

(5) 产生日冕偏振的机制多, 这为反演观测到的偏

振数据获取精确矢量磁场带来一定的困难. 特别地, 日冕中线偏振产生的主要来源来自各向异性散射. 此外, 对我们使用的禁线而言, 原子偏振^[21]也是产生辐射线偏振的重要机制. 与光球和色球情形相反, 由于日冕磁场较弱, 由塞曼效应产生的线偏振弱到可以忽略. 一般来说, 线偏振信息可以用来导出磁场矢量在天空平面的取向^[21,37]. 另一方面, 有两个主要机制导致束缚-束缚跃迁辐射产生圆偏振, 即磁场产生的塞曼效应和受散射影响的原子偏振. 由于我们已经获得它们之间确定的关系, 因此沿观测方向的磁场分量(纵场分量)相比位于天空平面内的横向分量更容易确定^[21]. 此外, 还可以根据射电观测和阿尔芬波观测等手段来获取磁场强度大小的信息^[21,30]. 因此, 在必要时, 可以借助这些手段确定出磁场强度大小, 通过偏振测量获得的纵向磁场和磁场在天空平面投影方位角来定出横向磁场大小和磁倾角.

虽然日全食提供了日冕磁场测量最佳机会, 但是由于日全食过程过于短暂导致曝光时间不能过长, 而由于后勤问题又限制了望远镜口径, 所以很难获得信噪比足够强的圆偏振信号. 尽管如此, 我们于2013年11月在非洲加蓬成功地对日冕绿线进行了线偏振成谱成像观测^[33]. 对像元分辨为2"的资料分析表明, 由于产生线偏振的机制较多, 日冕偏振轮廓形状可以具有非常丰富的多样性, 日冕局部区域小尺度范围内线偏振方向的空间分布也可以呈现出复杂性. 同样地, 线偏振强度大小的分布也具有不规则性. 这表明日冕结构和产生偏振的物理量场分布可以是一种具有高度结构化的分布.

就我们目前所知, 首先尝试用日冕仪进行日冕磁场强度测量的是Lin等人^[38]. 他们首先利用NSO(美国国立太阳天文台)0.4 m日冕仪通过禁线Fe XIII 1074.7 nm对0.15 R_{Sun} 高度的日冕辐射进行了偏振测量. 其偏振调制完成时间高达70 min, 只获得信噪比极低的圆偏振信号, 由于没有完成所有斯托克斯参量(I , Q , U , V)测量, 在无法考虑原子偏振影响下反演出磁场强度达到33 G. 4年后, 他们在0.46 m口径离轴式引导光学系统的SOLARC上安装了光纤束光谱偏振仪(OFIS)用相同的谱线测量了活动区之上高度到100"附近区域的偏振信号, 反演出场强等高图以及天空平面的方位角, 得出磁场强度在此高度约为4 G的结论^[39]. 但是值得注意的是, 该测量不仅空间分辨率仅为20", 而且积

分时间仍然长达70 min. 此外, 偏振改正前的圆偏振信号由于仪器附加偏振等原因竟然与辐射强度信号特征相同. 因此, 这些测量虽然可贵但离日冕磁场精确测量还有相当长的距离.

综上所述, 日冕磁场精确测量特别是常规测量还没有真正开始. 这对于我们建造一台具有日冕矢量磁场测量功能的大型日冕仪来说既是一种挑战也是一个机遇.

2 国内外同类仪器的研究现状和发展趋势

普通日冕仪的使用已经有80多年的历史, 做出了诸多重要发现, 作为常规非偏振观测的仪器在全球都有分布. 在我国云南天文台丽江观测站安装了一台日本的小口径日冕仪NOGIS. 这台仪器将为我国日冕仪观测积累经验. 由山东大学(威海)、中国科学院长春光学精密机械和物理研究所以及云南天文台合作研制的70 mm口径内掩式Lyot日冕仪于2018年10月在云南天文台丽江观测站获得日冕绿线图像, 为我国进一步发展日冕仪打下了良好基础. 在国际上, 具有线偏振测量功能的日冕仪也有若干台, 其中以口径为0.2 m的Lyot日冕多通道偏振仪(Coronal Multi-channel Polarimeter, CoMP^[40])科学产出最为丰富^[41-43]. 该日冕仪可在3条谱线Fe XIII 1074.7 nm, 1079.8 nm和He I 1083.0 nm中进行选择观测. 对于每条谱线, 利用透过带中心波长可调滤光器在谱线轮廓上数个波长位置相继成像. 该仪器视场高度覆盖范围(0.05–0.40) R_{Sun} , 空间覆盖为4.5"/像素. 常规观测采用Fe XIII 1074.7 nm谱线, 这是因为它最适合于磁场诊断^[44-47]. 因此, 这是一台可以通过Lyot滤光器来进行二维成像光谱测量(Two-Dimensional Imaging Spectroscopy, TDIS)的日冕仪. 在选定的谱线波长覆盖范围内波长采样点数目为三点或五点, 相应的时间分辨率分别为30和50 s. 显然, 要精确测量日冕物理参量, 这样的光谱分辨率远远不够.

由于以上所述测量日冕磁场的困难, 迄今为止没有常规的日冕矢量磁场测量. 但是, 随着技术特别是计算机技术的快速发展, 原来难以突破的瓶颈在慢慢松动而逐渐失去其制约作用.

口径达到4 m的美国DKIST(原名ATST^[48])特别致力于太阳大气高空间分辨率的测量. 目前所知, 它将是唯一一台可以分时测量光球、色球和日冕磁场及其他

物理参量的大型地面太阳望远镜. 其对日冕磁场测量的空间分辨本领虽然远小于光球和色球的测量(0.03"), 然而依靠其强大集光本领仍然可达到0.5", 而且其测量区域比一般日冕仪观测区域更靠近日面边缘. 这可能是未来进行日冕矢量磁场常规测量的第一台仪器. 但是, 由于其长方形视场较小($\sim 3.0' \times 4.0'$)使得它很难适合于对日冕大尺度活动的诊断, 而更适合于对小尺度日冕结构的精细分析. 由于采用离轴设计, 其偏振测量精度很难高于 $5.0 \times 10^{-4} I_c$ (连续背景辐射强度). 因此, 该台仪器在探测日冕磁场方面既有突出的优点也有明显的不足.

与DKIST测量日冕磁场空间覆盖过小相比, 由美国高山天文台(HAO)的Tomczyk等人^[49,50]提出的COSMO系列日冕探测器则具有大得多的视场, 适合于全局性的日冕物理研究. 这组望远镜由1.5 m口径Large Coronagraph (LC), 0.15 m口径的Chromosphere and Prominence Magnetometer (ChroMag)以及0.2 m口径的K-Coronagraph (K-Cor)组成. 其中K-Cor已经投入使用, ChroMag已经完成原理样机实验, 预计2019年完成研制, 而COSMO-LC停留在设计完成阶段.

与DKIST一样, COSMO-LC也是一台创新性的仪器, 具有诸多优点. 比如, 采用折射式望远镜可以比反射式望远镜更有效地消除杂散光^[50]. 为此, 主镜采用单一透镜而非复合透镜便是为了避免复合镜中多个面多次反射可能产生杂散光, 再结合后面的光学部分特别是Lyot光阑将杂散光控制在 $5/1000000$ 背景辐射强度以内. 这是该台仪器最突出的优点. 而单透镜产生的色差补偿则是通过在光轴上前后移动焦面挡板和组合成像透镜来实施, 这样能使COSMO-LC在530–1100 nm宽波段范围内选择观测谱线或连续谱. 另外一个特点就是, 在物镜成像焦面, 挡板大小会随着季节的改变而能做出相应调整.

由于COSMO-LC具有以上优点, 我们将其作为参考, 充分吸取其设计经验. 然而, 值得指出的是, COSMO-LC并非完美的设计, 仍然存在以下不足.

(1) 观测模式只有二维成像光谱测量(TDIS). 由于COSMO-LC只采用透过带中心波长扫描的方式得到选定谱线内的各个波长采样点的图像, 因此其获得观测区域的二维光谱并非实时, 从而严重影响了时间分辨本领. Lyot滤光器在透过带带宽小于0.25 Å时, 光子收集效率不到10%. 这不仅限制了光谱分辨率, 而且在

进行磁场测量时使其时间分辨率进一步降低. 这是因为, 在波长扫描过程中每一个透过带中心波长采样时, 偏振数据采集都需要进行至少3次不同偏振态组合测量以获得全部4个斯托克斯参数, 而每一调制偏振态的测量都需要长时间曝光来获得足够精确的偏振测量数据. 由于在日冕中辐射强度随高度急剧减小, 这一情况在高度覆盖范围大的情况下尤为严重. 所以COSMO-LC尽管视场大适合于日冕全局性分析研究, 但很难适合对爆发活动的磁场和其他物理量进行足够高时间分辨率的精确观测;

(2) 在COSMO-LC设计中没有考虑偏振光学开关来抑制地球大气产生的噪声. 如上所说, 一个观测区域的偏振测量必须经过3个不同时段对应的3个调制偏振态测量才能完成, 因此COSMO-LC无法消除在不同时刻地球大气辐射吸收差异对偏振测量产生的影响. 这一影响可达到 $10^{-3}I_c$ (背景辐射)量级, 这对于偏振测量精度需要达到 $1.0 \times 10^{-4}I_c$ 或更高精度的观测来说是必须重视的问题.

本文提出的日冕磁场与等离子体综合探测望远镜(COronal Magnetism and Plasma ASsembled Scopes, COMPASS)中的大型日冕磁场探测望远镜(COronal Magnetism Probing Telescope, COMPT)参考了COSMO-LC, 吸取其长处, 着重克服以上所列主要困难, 在其他方面还做出了进一步的改进. 特别地, 由于增加了多谱线同时实时斯托克斯成谱成像功能, 特别适合于具有较小日心张角视场的活动物理机制探测, 因此成为一台功能超过后者的创新性太阳观测设备. 由于采用了简化偏振光学开关, 其偏振测量灵敏度和精度将超越COSMO-LC. 另一方面, 在众多目前使用的日冕仪中, 还没有一台能同时具备白光(线偏振)成像和日冕谱线二维(线偏振)成像光谱测量的仪器, 而COMPASS组合中口径为0.3 m的二维光谱诊断日冕仪(Two-dimensional Spectroscopic Diagnosis Coronagraph, TSDC)将具备这一独特的功能.

3 COMPASS科学目标和观测目标

日冕是各种活动和波动现象产生的载体, 具有复杂的结构. COMPASS的科学目标就是揭示各种活动现象产生的机制, 找到太阳风加速和日冕加热的成因, 监测各类活动现象演化过程中的磁场位形, 记录各种

活动现象的发生和发展过程, 为空间灾害性天气预报和预警服务^[51]. 因此, COMPASS要实现的具体科学目标如下.

1) 揭示日冕加热和太阳风加速的机制. 这里面包含了如下问题的解决:

(1) 不同日冕结构、太阳风关键加速区中磁场强度的空间分布与时间演化情况如何?

(2) 不同日冕结构中传播的低频扰动的物理本质及其对日冕延伸加热和太阳风加速的贡献多少?

(3) 重离子的热动力学(热力学和宏观动力学)参数如何分布, 其对应的物理状态在日冕加热和太阳风加速机制中的作用有多大?

2) 揭示日冕物质抛射(CME)的成因. 特别地, 日冕磁能是如何储存和释放, 爆发机制为何. 要解决这一问题, 必须正确回答如下提问:

(1) 导致CME爆发的日冕结构具有什么样的磁场结构和热动力学性质如何?

(2) 日冕爆发活动的触发机制是什么?

(3) 爆发时日冕结构中磁场能量如何向动能和热能转化?

3) 揭示日冕激波的形成原因, 掌握其演化规律, 获得磁重联的决定性观测证据, 找到日冕激波和磁重联加速粒子的规律. 具体来讲, 就是要精确测量相关的物理参量并给出下面物理过程的具体准确描述:

(1) 激波上下游、各重联区域的磁场和粒子密度、温度, 有关湍动能谱;

(2) 激波和重联加热导致的少数离子电离过程、电离态变化;

(3) 射电暴源区(与MUSER^[52]等已有或拟建的射电日像仪联测)的磁场和等离子体性质、激波或者重联有关的磁场形态与演化.

4) 测算太阳向日球层空间输出的磁通量以及太阳风的物质质量, 这些输出随太阳活动周变化的规律. 这一测算和规律的寻找依赖于我们对整个低日冕的等离子体热动力学参数(密度、温度、宏观运动速度)和矢量磁场长时期的准确观测.

5) 根据以上发现的机制和规律, 建立从源头上有效提升预警空间灾害性天气的模型. 这一模型将是长期精确观测经过统计分析和物理分析的结果.

以上科学目标的建立规范了观测目标从而对仪器及其功能提出了详细的要求.

为了实现以上科学目标, COMPASS由大型COMPT和中型TSDC两台日冕仪以及挂载到COMPT镜筒上的小型日冕仪(Small Coronagraph, SC)组成. COMPT将在高度范围 $(0.05-0.65)R_{\text{Sun}}$ ($0.8'-10.4'$) 内进行所有斯托克斯参量成谱成像测量以获得观测区域的矢量磁场 $\mathbf{B}(B, \theta, \varphi)$ 和其他物理量(如视向速度 v_{los})信息, TSDC不仅对 $(0.1-1.50)R_{\text{Sun}}$ 高度范围内的等离子体进行热动力学参量的诊断, 监测日冕活动, 还将具有线偏振测量功能, 用以给出所覆盖的高度范围内磁场在天空平面投影的指向. 为了实现以上的科学目标, COMPT的二维光谱测量有两种方式, 分别由两种仪器实现, 对应这两种观测方式的转换由 45° 镜进出光路控制. 其一就是基于IFU的多谱线实时扇形视场斯托克斯成谱成像, 用于揭示各种现象后面的物理机制, 另一种就是基于可调滤光器(或干涉仪)实现 360° 环形视场二维成像光谱测量, 用于全局性观测. COMPT和TSDC两者结合, 运用前者给出的 $(0.05-0.65)R_{\text{Sun}}$ 高度范围内矢量磁场结构以及后者探测到的 $(0.10-1.50)R_{\text{Sun}}$ 范围内磁场在天空平面投影的指向和

宏观运动信息约束, 可以将矢量磁场外推至 $1.50R_{\text{Sun}}$ 高度. 线偏振测量的另外一个功能就是可以提高冕环等特征体与背景的对比度, 更容易辨识特征体的结构特性^[53]. 而COMPASS-SC的功能相对简单, 主要功能是为COMPT提供导行和日冕形态监测, 在可能的情况下增加K镜运行状态下的长狭缝低色散光谱观测功能.

表1前两列列举了COMPASS科学目标和观测目标, 最后一列给出相应的仪器选择和对功能的要求. 表中LC表示COMPT, 而MC为TSDC. B 代表视向磁场强度, φ 为其在天空平面的方位角, v_{los} 为宏观视向速度, T 为等效动力学温度, ρ 则表示粒子数密度, 而每个物理量后面参数为测量该物理量需要达到的灵敏度. 表中各参数测量灵敏度是根据科学需求以及可能达到的望远镜性能指标参数(见表2)来确定的. 一般来说, 观测者会期待灵敏度越高越好, 但是这个灵敏度受望远镜设计以及目前技术能力的限制. 比如3 G的磁场灵敏度是根据偏振信号与磁场测量关系式以及偏振测量能达到的精度来决定的^[21], 而视向速度测量灵敏度的确定依据波长位移与视向速度之间的多普勒位移关系式

表 1 COMPASS的科学和观测目标, 仪器及其功能^{a)}

Table 1 Scientific and observational objectives, instrumental requirements and functions^{a)}

科学目标	观测目标	物理量测量要求*
(1) 日冕加热和太阳风加速的机制	冕洞区与高速太阳风, 日冕波动性质和物理参数, 日冕磁场和速度场, 宁静区、活动区上方与伴随太阳风等区域	LC, B : 3 G v_{los} : 1.5 km/s MC, φ : 5° v_{los} : 2.0 km/s Log T : 0.2 K
(2) CME的成因	日珥和冕腔结构, 等离子体热力学参数(密度、温度、速度场), 矢量磁场 B 结构位形, 高温结构	LC, B : 3 G v_{los} : 5.0 km/s Log T : 0.2 (K) Log ρ : 0.3 (m^{-3}) MC, φ : 5° v_{los} : 5.0 km/s
(3) 日冕激波的形成原因	CME驱动激波和日冕重联区域, 等离子体热力学参数, 矢量磁场 B 结构位形	LC, B : 3 G v_{los} : 5.0 km/s Log T : 0.2(K) Log ρ : 0.3 (m^{-3}) MC, φ : 5° v_{los} : 5.0 km/s
(4) 磁通量和太阳风物质和能量输出随太阳活动周变化规律	全球磁场和密度, 太阳风速度的中长期测量	LC, B : 3 G v_{los} : 5.0 km/s Log ρ : 0.3 (m^{-3}) Log T : 0.2 (K) MC, φ : 5° v_{los} : 5.0 km/s
(5) 预警空间灾害性天气的模型	背景日冕和太阳风和CME	同上

a) * 物理量加“:”后面的参数为对该物理量测量需要达到的灵敏度

表 2 COMPT主要光学技术设计指标(有效口径: 1260 mm; 焦比: f/6)

Table 2 Main optical design parameters of COMPT (effective aperture: 1260 mm; focal ratio: f/6)

参数	积分视场光谱测量	二维成像光谱测量
视场	张角 45° 扇形, $(0.05-0.65)R_{\text{Sun}}$	环形 $(0.05-0.65)R_{\text{Sun}}$
空间分辨率	$2''/\text{像元}[(0.05-0.45)R_{\text{Sun}}]$ $3''/\text{像元}[(0.45-0.65)R_{\text{Sun}}]$	$0.8''/\text{像元}[(0.05-0.65)R_{\text{Sun}}]$
一次曝光空间采样点数	~ 88800	$\sim 4\text{ K} \times 4\text{ K}$
光谱分辨率	$6700@530\text{ nm}$ $18000@1083\text{ nm}$	$8000@1074\text{ nm}$
光谱覆盖范围	$500-1100\text{ nm}$	
杂散光抑制	$10^{-6}B_{\odot}(0.05R_{\text{Sun}})-10^{-7}B_{\odot}(0.65R_{\text{Sun}})$	
偏振测量精度	1.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
探测器分辨率大小	$6\text{ K} \times 6\text{ K SCMOS}$	$4\text{ K} \times 4\text{ K CCD}$

以及能达到的光谱分辨率来决定的.

从表1不难看出, COMPT与TSDC的密切配合互补是实现科学目标的保证, 也是克服以上列举的日冕磁场测量难题的一种必需的选择. COMPT在 $(0.05-0.65)R_{\text{Sun}}$ 高度范围内获得矢量磁场和热动力学参数, 而TSDC在 $(0.10-1.5)R_{\text{Sun}}$ 高度范围内获得热动力学参数. COMPT可以为TSDC偏振测量定标, TSDC如果能提供有关磁场方位角和宏观运动速度, 则可以为基于COMPT的矢量磁场外推提供有效的约束从而使外推结果更为可靠. 这种外推不同于从高 β 光球外推到低 β 日冕磁场, 而是都处于低 β 状态下具有天空平面方位角和运动速度约束的外推. 日冕物质宏观运动速度作为约束的依据正是处于低 β 状态下磁场和日冕物质的冻结效应^[21].

为了实现以上观测目标, 尤其是日冕磁场测量, 恰当的谱线选择是一个需要解决的重要问题^[44-47]. 对COMPT的积分视场光谱测量(Integral Field Spectroscopy, IFS)观测模式, 我们需要利用其可以对多条谱线较高光谱分辨率测量的优势, 选择一定波长范围覆盖使得其包含两条或更多条谱线, 这无疑是提高测量效率的一个重要手段. 这是因为, 一般来说, 适当的成对谱线同时测量不仅使得我们可以得到矢量磁场信息, 还可以利用成对谱线辐射强度比技术获得关于日冕电子密度的信息^[54]. 需要指出的是, 适合日冕测量的谱线必须具有如下特点: 其波长和朗德(Landé)因子的乘积足够大, 辐射强度足够强使得偏振测量可以达到足够的精度^[44-47]. 根据以上判据, 基于滤光器或干

涉仪的二维成像光谱测量(Two-Dimensional Imaging Spectroscopy, TDIS)首选磁场诊断的波段为 $1074.5-1083.5\text{ nm}$. 这里面不仅包含了适合于日冕磁场测量的Fe XIII 1074.7 nm , 还包括了与其组成线对的Fe XIII 1079.8 nm , 此外还有形成温度较低的适合日珥观测谱线He I 1083.0 nm . 对需要多台探测器的积分视场光谱测量IFS, 首选Fe XIV 530.3 nm , Fe XIII 538.6 nm 与Fe II 534.5 nm , 其中日冕绿线 530.3 nm 用于磁场测量, Fe II线可用于较低温度等离子体诊断. 而对TSDC, 其观测波段选择较为简单, 一条光路为白光成像, 另一条光路则为了TDIS观测, 所选谱线分别为日冕绿线, 日冕红线以及H α . 一般来说, 它们的形成温度有较大的差异, 可能对应不同高度区域测量, 但日冕的H α 辐射主要来源于散射或来自耀斑环的直接辐射. 对于单纯的热动力学参量诊断, 对不同的观测对象都有诸多谱线供选择^[44-47,49].

4 COMPASS初步设计方案和主要技术指标

COMPASS将是具有强大功能的综合性观测仪器. 它由相互关联的日冕仪构成. 一台口径达到 1.26 m 的大型折射式日冕仪COMPT, 承载实现积分视场光谱测量IFS和二维成像光谱测量TDIS任务. 在目前阶段, 两种功能实现方式是根据用户的选择进行交替分时观测, 用于高度范围 $(0.05-0.65)R_{\text{Sun}}$ 范围内的矢量磁场和热动力学参量的综合精确测量. 在未来, 如果光子流量

足够分配, 那么实现两种观测模式转换的 45° 镜可采用偏振分束棱镜替换来实现两种观测模式的同时实施. 另外一台是口径为 0.3 m 的大视场中型日冕仪TSDC, 用于高度范围 $(0.05\text{--}1.50)R_{\text{Sun}}$ 内日冕等离子体物理性质的诊断以及全局性监测日冕大尺度爆发现象. 这两台仪器互补互联, 对实现以上制定的科学目标而言缺一不可. 以下分别叙述COMPASS主要的两台日冕仪COMPT和TSDC的设计思想以及初步设计方案. 这些方案将在未来进行进一步的优化直到通过方案验收.

4.1 COMPT的初步设计

COMPT的建造具有十分明确的科学目标, 为了实现这些科学目标而建立起来的COMPT设计思想如下:

(1) 科学目标指导下的观测目标制定, 后者决定了望远镜的功能以及功能实现的途径.

(2) 设计人员和科学目标制定小组的沟通, 认清制约因素. 这些制约包括时间分辨率的限制、矢量磁场测量的高度限制以及IFS测量时活动体日心张角的空间范围大小等.

(3) 观测目标对仪器参数设计和谱线选择的约束.

(4) 为了实现科学目标, COMPT需要进行IFS和TDIS分时测量. 他们的结合可满足不同科学目标的要求. 与TSDC的综合探测可以使矢量磁场信息延伸到 $1.50R_{\text{Sun}}$ 高度. 这对于大多数大尺度活动观测和诊断具有不可或缺的重要意义.

对致力于日冕磁场测量的COMPT, 其设计理念建立在保证高精度高灵敏度偏振测量的实现之上. 为了实现这一占主导地位的观测目标, 日冕仪设计围绕减

少杂散光、理论上仪器不能产生附加偏振以及采用双光束分析来进行. 值得指出的是, IFU的使用有效地抑制了光学链中光谱仪之前的杂散光, 这是因为其数值孔径对入射光的限制和光纤传输光信号的特性所致. 另一方面, 对于像太阳这样具有可分辨面源的观测目标而言, 一次性获得二维视场中所有空间点的多条形成温度不同的谱线光谱是太阳物理学家热切期待的观测目标. 目前, 使用积分视场单元(IFU)是必然选择. 因此, 一对IFU与偏振测量的结合便成为追求多条谱线同时测量且要求高色散高时间分辨率偏振测量的最佳选择. 这一选择决定了COMPT的结构形式. 然而, 由于相比普通测量多出一个维度(二维空间加一维色散), 其二维空间采样点数目比起滤光器或干涉仪型观测的单波长点的成像(二维空间加零维色散)要少得多. 因此, 大视场的滤光器或干涉仪型仪器将作为IFU观测的有益和必要的补充.

基于以上表述的观测目标, 设计思想和理念, 以及技术上实现的可能性, 我们初步制定出主要的光学技术设计指标. 根据这些指标得出光学设计图样, 而结构设计围绕实现光学设计指标进行, 电控设计则是实现观测功能的另一个必须的支撑, 而数据处理和分析是得到科学产品的最后环节.

表3是根据以上制定的观测目标和观测对象的特性得出的COMPT的主要光学技术指标方案. 至于挂靠在COMPT镜筒上的COMPASS-SC由于是常见的小口径(9 cm)监视用小型日冕仪, 在本文中不再给出详细的描述. 在以下表2和3中, $B_{\odot}$ 表示太阳圆面中心辐射强度, 而 R_{Sun} 则是太阳半径大小. 对COMPT, 在 530 nm

表3 TSDC主要光学技术设计指标(有效口径: 30 mm ; 焦比: $f/6.3$)

Table 3 Main optical design parameters of TSDC (effective aperture: 30 mm ; focal ratio: $f/6.3$)

参数	白光(线偏振)测量	TDIS
视场	环形, 高度 $(0.10\text{--}1.5)R_{\text{Sun}}$	环形, 高度 $(0.10\text{--}1.5)R_{\text{Sun}}$
空间分辨率	$1.18''/\text{像元}$	$0.94''/\text{像元}$
工作波长	$(720\pm 20)\text{ nm}$	$530.3\text{ nm}, 637.4\text{ nm}, 656.3\text{ nm}$
线偏振测量精度	3.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}
杂散光抑制	$10^{-6}B_{\odot}(0.1R_{\text{Sun}})\text{--}10^{-8}B_{\odot}(1.5R_{\text{Sun}})$	
探测器分辨率	4096×4096	2048×2048
法-珀干涉仪通光口径	150 mm	
法-珀干涉仪观测波长范围	$530\text{--}660\text{ nm}$	
法-珀干涉仪透过带	$<0.060\text{ nm}$ (530.3 nm)	$<0.075\text{ nm}$ (637.4 nm)

处, 光谱分辨本领达到6700, 对于线宽达到0.3 nm的这条日冕谱线, 在谱线范围内有效的波长采样点可以达到9个点以上. 在1083 nm处, IFS的光谱分辨本领为18000, 而TDIS的分辨率设为8000, 与COSMO-LC相同. 对于TDIS, 其像元空间分辨率可以达到0.8". 这一分辨率在磁场测量时会显得过高, 因此, 我们可以采取2×2或者3×3像元并合(Binning)的方式来降低空间分辨率来提高时间分辨率.

图1给出了COMPT的光学初步设计图样. 上部分为总的光学设计图. 为简洁起见, 只画出了2台光谱仪, 下部分则为物镜焦面到IFU前端的放大图. 根据各部分实现的光学功能对一条完整光学链进行划分, 整个日冕仪由4个部分组成. 第一部分为主物镜到Lyot光阑的引导光学系统, 它实现太阳大气的成像, 在主透镜焦面上利用内掩体将光球和色球的像吸收处理, 留下日冕进入到下一段光路. 在此焦面上, 有两块视场光阑(内掩体)切换, 分别对应TDIS光路的环形光阑和对应IFS的扇形光阑, 后者与IFS光路中的K镜联动进行空间旋转扫描以获得更大张角的扇形视场甚至环形视场扫描. 在这段光路中, 一组透镜(图中Lens 1–6)将主透镜(图中标注Objective Lens)本身的像成像在Lyot光阑(图中标注Lyot Stop)位置处. Lyot光阑将主透镜边缘的衍射杂散光档掉, 成为Lyot型日冕仪. 在Lyot光阑之后是整个光学链的第二部分, 即偏振测量系统, 它由两个部分组成. 其一为偏振校正系统(在图中下部分标注Polarimetric Calibration Package), 在需要偏振改正时移入光路, 分别提供标准的线偏振和圆偏振信号, 通过测量得到仪器的穆勒矩阵用于校正^[55]; 其二为偏振分析器, 由一块消色差1/4波长延迟的波片、可变相位延迟液晶波片(LCVR)以及立方偏振分束棱镜构成. 光束经过后者之后分裂成振动方向正交的两个线偏振光束, 其中一束传播方向平行而另外一束垂直于主光轴. 这两束光同时测量构成偏振光学开关^[32,33]操作的基础. 对波片起始位置以及围绕主光轴转动角度进行优化, 可以获得合理的偏振测量效率的分配^[56]. 为了提高偏振测量灵敏度同时又要考虑不降低时间分辨率, 我们需要进行简化偏振光学开关操作^[33]. 这一任务由通过外加合适的交变电压使得LCVR在两个延迟量0°和180°之间相互转换来完成. 这样的操作使出射的两束光偏振状态(由斯托克斯 I , Q , U 和 V 描述)组合交换. 这两束光将根据用户的需求进行IFS和TDIS分时测量.

这一选择是通过与棱镜出射光束传播方向夹45°的反射镜进出光路实现的. 当棱镜反射支路的45°镜移出光路以及棱镜透射支路45°镜移进光路时, 观测者进行IFS测量, 反之进行TDIS测量. 对TDIS光路, 作为整个望远镜光学链条中的第三部分由一组成像透镜(图中标注Lens 13–17)构成, 为了防止不同日冕视场通过Lyot滤光器或干涉仪后波长漂移以及带宽不一致, 这条光路设计成像方远心光路. 第四部分则由一块前置截止滤光片、可调Lyot滤光器(或干涉仪)组成, 日冕成像在4 K×4 K CCD芯片上. 如前所述, TDIS实现二维空间加上一维色散功能是通过调节滤光器透过的中心波长方式进行. 因此, 为了获得足够的光谱分辨率, 必须进行中心波长点密集扫描, 且在每一个透过带都要进行3个偏振态组合的测量, 因此其时间分辨率远低于IFS测量. 鉴于此, 在COMPT早期观测阶段, 以IFS为主, TDIS为辅. IFS由于其强大的功能, 其光学链条比起TDIS要复杂得多. 这种复杂性源于前面提到的IFU视场较小, 空间采样点数目 $n \times m \times a$ (n 为光谱仪数目, m 为每台光谱仪包含的狭缝个数, a 为每条狭缝包含的光纤数目, 而每一根光纤对应一个空间采样点)较少. 为了对准静态日冕现象进行观测获得高度(0.05–0.65) R_{sun} 环形区域或者更大张角扇形视场内所有空间点多条谱线实时偏振成谱成像, 需要实施空间扫描以构成一个无缝拼接的更大视场. 满足这一要求的最佳积分视场为扇形. 这一视场的确定可通过放置一个扇形视场光阑于IFU前端焦面位置之前实现. 该条成像光路也设计成像方远心光路, 将前端光学系统的瞳成像在IFU前端光纤端面, 可以有效抑制杂散光和把所有接收到的光能输入到光纤. 在到达IFU前端表面之前, 由3块平面镜组成的一组K镜(图中标注K-Mirrors)被用于承担扇形视场扫描的任务, 其扫描方式如图2所示. 在此, 我们将K镜通常用于像场消旋的作用反其道而行之. 所需要的日冕局部扇形视场被IFU接收后, 连续的二维像面被IFU前端微透镜阵分割成二维点阵, 光信号由与微透镜阵光学耦合的光纤传输到积分视场光谱仪前端, 在这里光纤束被重新编织排列成多条狭缝, 通过多台光谱仪系统进行色散, 最后被多台6 K×6 K SCMS接收转换为数字强度信号. 由于一对IFU包含数万根光纤需要进行色散, 每台光谱仪必须承载大数目的光纤. 这一要求由于较小的光谱分辨本领、每次测量较小的光谱范围(<9 nm)以及较

图 1 (网络版彩图)COMPT的光学初步设计

Figure 1 (Color online) Preliminary optical design for COMPT.

高的探测器分辨本领而使设计成为可能. 目前, 初步设计出的每台光谱仪承载相互平行的6条狭缝进行同时色散, 而每条狭缝可包含1000根光纤. 这样, 一台光谱

仪可以对多达6000根光纤出射的辐射进行色散, 成为一台高效率的光栅光谱仪. 综上所述, 沿IFS光路, 第三部分由成像系统和K镜构成, 而第四部分则是由IFU

图 2 (网络版彩图) IFS 扇形视场扫描示意图

Figure 2 (Color online) IFS Spatial scanning mode of sector-shaped field of view using K-mirrors.

和相应的积分视场光谱仪构成。

从图1中可以看到, 整台日冕仪光学元件的重量分配集中在前后端, 这是COMPT的一个结构特点. 在设计中, 我们参考COSMO-LC的设计, 充分考虑了这一特点可能对望远镜弯程产生的影响, 初步采用Serrurier桁架结构^[57]. 它是由4个相同的等腰三角形子桁架结构构成的, 两两平行, 为正交对称结构. 该结构被广泛运用于天文望远镜中^[58,59]. 考虑到主镜受热径向应力影响会引入偏振测量误差, 主镜镜室结构采用了径向自适应热补偿设计. K镜旋转驱动系统采用了双电机反向力矩冗余消除设计. 对于主焦面光阑位置的热量及杂散光, 在主焦光阑挡板位置采用锥形挡板设计, 锥形挡板将多余视场的光沿径向分散到周边结构上冷却吸光, 挡板内部通过冷却液高效制冷. 图3给出了COMPT的结构设计. 它采用的是传统的叉臂赤道式支撑机架, 同时, 在预留一定长度范围抵消IFU光缆扭转应力的前提下, 将光缆通过极轴引出, 这样便于我们尽可能减小望远镜拖拽光纤束造成的不良影响. 在其背上将放置COMPASS-SC用于监控, 此外还要使用一套光电导行系统.

COMPT观测圆顶采用常见的半开放式随动圆顶, 望远镜观测室地面与光谱房地面处于同一水平位置以尽量减少IFU光纤束可能产生的扭绞(图4).

COMPT的电控设计实现以下的功能:

图 3 (网络版彩图) COMPT 的结构设计

Figure 3 (Color online) Mechanical structure design of COMPT.

图 4 (网络版彩图) COMPT 和观测圆顶结构示意图

Figure 4 (Color online) Designed dome structure installing COMPT.

(1) 日冕仪跟踪和指向功能;

(2) 偏振校正和偏振测量. 除了控制偏振校正系统的进出光路, 系统包含的各偏振元件进出光路, 还有偏振测量元件如波片转动的起始位置和步长, LCVR的电压控制. 此外, 还包含偏振分析器单元的恒温控制;

(3) IFS和TDS观测模式转换. 目前通过45°镜进出和主焦面处视场光阑变换实现;

(4) 日冕仪不同波段测量的调整. 这一个步骤是通

过转动光栅以及选择不同的前置滤光片, 结合前面所述补偿色差部分移动来完成;

(5) 双K镜同步扫描;

(6) IFS测量时多台探测器对应的不同高度光纤分区数据同步采集, 以及TDIS观测时两台CCD数据同步采集;

(7) 接收来自大视场CAMPASS-SC的指向指令;

(8) 数据归档和处理;

(9) 环境监测;

(10) 遥控观测;

(11) 观测圆顶控制.

图5给出了实现以上功能的电控设计系统框图, 其中光电导行和K镜扫描为闭环控制系统.

4.2 TSDC的初步设计

TSDC将首次在地面实现对内冕和日冕物质抛射的高时间分辨率日冕禁线(Fe XIV 530.3 nm和Fe X 637.4 nm)和色球H α 等谱线成像光谱观测和高时空分辨率的白光偏振亮度成像观测, 从而为内冕物理性

质、CME物理特性及内冕中的运动学特征的研究提供高质量的第一手资料. 其观测数据可以用于内日冕、CME的物理性质的研究以及灾害性空间天气预报. 在地面实现成像和光谱观测, 其功能等效于一台地基白光日冕仪和一台地基日冕诊断光谱仪. 这在国际上尚属首次.

表3则是TSDC相应的技术指标方案. 与COMPT相同的是, TSDC也是一台Lyot型日冕仪. TSDC将基于法布里-珀罗(Fabry-Perot)干涉仪来实现二维成像光谱.

TSDC的设计思想是尽可能利用国内的仪器研制经验和国际上先进的技术, 采用结构化和最优化设计以便得到最佳方案. 同时, 考虑到仪器需要进行成像和光谱观测, 采用分光的办法提高仪器的时间分辨率, 保证成像观测和光谱观测的同时性. 承担TDIS测量的法布里-珀罗干涉仪被置于远心光路中以满足其对光线入射角的要求.

图6给出了TSDC的光学初步设计. 在此光学设计中, 光阑采用共轭设计以最大限度地减少仪器内部的杂散光. 考虑到大口径干涉仪系统稳定性, 将包含干

图 5 (网络版彩图)COMPT电控功能框图

Figure 5 (Color online) Designed electronic control system of COMPT.

图 6 (网络版彩图)两维光谱诊断日冕仪(TSDC)光路初步设计图

Figure 6 (Color online) Preliminary optical design for TSDC.

涉仪的成像光谱系统置于库德(Coudé)房中, 使其不随赤道仪转动从而保证其相对地面处于静止状态. 未来将考虑在TDIS测量时也进行线偏振测量, 这可以由改变放置在分光棱镜前可进出光路的消色差波片的快轴方位角即波片旋转来完成. 为了获得辐射强度(I)和线偏振强度(Q , U), 需要进行至少3次测量, 消色差波片的快轴分别处于 0° 和 $\pm 120^\circ$ 方位角.

TSDC的整体结构包括日冕仪本体部分和赤道仪部分. 日冕仪本体部分负责进行所需的科学观测(包括成像和光谱观测), 赤道仪部分则承担日冕仪整体对太阳的跟踪任务, 以保证日冕仪主光轴始终指向太阳圆面中心. 两者在结构上并不是独立的, 而是相互关联. 两维光谱诊断日冕仪总体结构和工作状态如图7和8所示. 在图7中可以看到, 我们再次采用K镜, 但此时它具有通常的功能, 即像场消旋. 图8中的圆顶也为常见的半开放式随动圆顶.

图9画出了TSDC的电控框图. 我们采用工控机做主控计算机, 控制程序运行后等待观测员输入控制命令, 选择工作模式. 主控机得到命令后计算出太阳位置, 发送给运动控制卡, 分解成控制信号后指挥电机运动, 赤经赤纬轴上的高精度编码器会把实际的位置反馈给运动控制卡, 控制卡以给定位置值和检测位置值之差经过PID控制算法, 给出新的电机速度控制信号. 当望远镜到达设定位置后, 通过人工或光电导星将太阳像拉到视场中心, 切入几种跟踪模式.

图 7 (网络版彩图)两维光谱诊断日冕仪TSDC的结构设计图

Figure 7 (Color online) Mechanical design for TSDC.

图 8 (网络版彩图)TSDC圆顶和工作状态图

Figure 8 (Color online) Designed dome for TSDC.

5 讨论和结论

COMPASS是一组三台具有互补功能Lyot日冕仪. 它通过对 $(0.05-1.50)R_{\text{Sun}}$ 高度范围内磁场和等离子体物理状态的准确诊断来揭示发生在日冕空间内的剧烈活动、日冕加热和太阳风加速机制, 通过建模对空间天气源头进行活动爆发预报. 这些都是目前太阳物理

图 9 (网络版彩图)TSDC的电控设计

Figure 9 (Color online) Electronic control for TSDC.

和空间物理亟待突破的重大前沿课题。

除了COMPASS-SC为小口径(9 cm)普通Lyot日冕仪用于配合COMPT观测外, COMPT和TSDC都是具有鲜明特色的日冕仪。总体来说, COMPT中心任务就是致力于常规精确测量日冕磁场, 研究磁场演化及其响应, 特别是聚焦于磁重联过程观测, TSDC观测主要集中在大视场范围内的等离子体物理状态诊断和活动监测。

COMPT初步设计的口径为1.26 m, 建成后将成为世界上口径最大的折射式望远镜。它参考了美国高山天文台(HAO)的Tomczyk等人^[40,49,50]提出的1.5 m口径COSMO-LC的技术方案。相比COSMO-LC, COMPT将偏振分析系统放在焦比更慢的光路里面进行, 从而更有利于高精度偏振测量; 在线性检偏器(偏振立方分束棱镜)前插入可变延迟液晶波片使其产生的相位延迟在 0° 和 180° 之间转换来实现简化偏振光学开关功能, 抑制仪器噪声和降低地球大气的影响从而增加偏振测量灵敏度和精度。我们还通过 45° 镜进出光路实现IFS和TDS之间的转换, 而两种观测具有很强的互补性, 从而极大地增加了该日冕仪的功能。

COMPT与COSMO-LC一样, 采用Lyot型日冕仪引导光学系统。这一选择主要是基于折射式望远镜相比反射式望远镜更容易控制杂散光的影响, 因此成像效果更锐利^[50]。然而, 这一选择也带来一些需要消除的负面影响。最突出的就是色差带来的不同波段主焦面位移。解决这一问题的途径就是针对不同波段观测, 驱动机械结构将主物镜后光路沿光轴方向做相应的平移。

对COMPT来说, 除了原COSMO-LC本身具有的特色和创新外, 我们围绕实现观测目标而作出设计的特色和创新点列举如下:

(1) 中等视场的IFU与大视场的Lyot滤光器(或干涉仪)观测结合。这是为了全面实现科学目标而需要两种仪器功能互补的结果。

(2) 双IFU的应用。这一决定大日冕仪结构的方案基于高灵敏高精度偏振测量的要求, 他们是通过应用我们提出的简化偏振光学开关^[32]来实现这一目标的。运用简化偏振光学开关不仅在不改变时间分辨率的情形下更有效抑制噪声, IFU中包含的传输信号光纤也能更有效地抑制杂散光。这是因为我们计划采用0.12数值孔径的光纤将极大地限制杂散光在光纤内的传播, 从而有效地降低前端产生的杂散光, 而偏振分析在更慢焦比的光路中进行。综合以上措施, 使得我们偏振测量精度将在COSMO-LC的基础上有显著提高。

(3) 多狭缝积分视场光谱仪。未来的COMPASS-LC的IFS测量将具有多台光谱仪以容纳数万根光纤进行色散。每台光谱仪承载约6000根光纤, 这6000根光纤被平均分配到6条狭缝中同时进行色散。6条狭缝能同时色散的依据是每次观测的波段范围(如对磁场观测, 我们采用波段530.0–539.0 nm, 以及1074.5–1083.5 nm)不超过9 nm。在表2制定的光谱分辨本领条件下, 这一色散范围只占用不到800像元, 而我们将采用 $6\text{ K}\times 6\text{ K}$ 的SCMOS, 使得在光谱仪色散前加入波段截止滤光片对并排的6条狭缝同时进行色散成为可能。

(4) 一对扇形IFU和一对K镜的同步扫描配合。IFU

采用扇形视场是便于扩大IFS的观测范围, 弥补IFU视场较小的不足之处, 而K镜使像场旋转正是完成扇形扫描的载体. 每一个IFU都由沿观测高度划分的多个IFU子区域构成. 较高的区域采用大集光面积而空间分辨率较低的单元, 高度低的区域则采用小集光面积但空间分辨率更高的单元, 由此来提高观测的时间分辨率.

(5) 偏重于圆偏振测量的偏振分析器. 由于日冕磁场较弱, 观测方向的圆偏振信号很弱. 针对这一情况, 我们在设计偏振调制方案时, 分配给圆偏振测量效率高于线偏振测量效率以便更好地探测到圆偏振信号.

由于圆偏振信号微弱导致信噪比低的原因, 为了在必要的时间分辨率条件下对日冕活动跟踪进行观测, COMPT的高度覆盖范围限制在 $(0.05-0.65)R_{\text{Sun}}$ 内, 这对于观测一些大尺度活动还不够. 因此, TSDC作为COMPT的有益补充被用于大视场等离子体物理参数的诊断和活动监测. 它可将监测物理信息传递给COMPASS-LC以提供有价值的关于可能的日冕活动

爆发局部位坐标. 不仅如此, 如果通过其观测能得到高度范围 $(0.05-1.50)R_{\text{Sun}}$ 内相同谱线(如日冕绿线)线偏振二维成像光谱和等离子体宏观运动信息, 可以为COMPT在其视场之外的矢量磁场外推提供约束, 从而大大拓展矢量磁场在日冕空间的分布信息.

COMPASS将是集中全国太阳物理界之力建造的仪器. COMPT基于美国高山天文台(HAO)COSMO-LC的引导光学设计但采取了进一步优化和功能扩展. COMPT引导光学设计更加规范, 在COSMO-LC基础上提高了偏振测量精度和灵敏度, 并且增加了积分视场光谱测量, 使得可以探测更弱和更准确的磁场, 更重要的是极大地提高磁场测量的时间分辨率. TSDC将首次实现白光线偏振成像和TDIS(线偏振)同时测量功能. 因此, COMPASS建成后将成为国际上功能最强大的日冕观测设备. 美国HAO和法国等国家天文研究机构在日冕仪研制和观测方面积累了丰富的经验, 因此, 与美国、法国以及其他国家相关单位展开国际合作是实施整个项目必不可少的条件.

致谢 南京大学方成院士长期推动我国日冕仪发展和建设, 为此呕心沥血, 针对本文提出了建设性的意见和建议, 在此表示崇高的敬意! 中国科学院国家天文台汪景琇院士大力支持本项目研究, 并且仔细批阅了本文; 美国高山天文台(HAO)的S. Tomczyk博士为我们提供了COSMO-LC的设计资料; George Mason大学张捷教授为推动COMPASS发展贡献了不可或缺的力量; 山东大学(威海)的宋红强博士为COMPASS取名做出了宝贵的贡献; 在此一并表示感谢.

参考文献

- 1 Hale G E. On the probable existence of a magnetic field in Sun-spots. *J Geophys Res*, 1908, 13: 159–160
- 2 Fang C, Ding M D, Chen P F. Physics of Solar Active Regions (in Chinese). Nanjing: Nanjing University Press, 2008 [方成, 丁明德, 陈鹏飞. 太阳活动区物理. 南京: 南京大学出版社, 2008]
- 3 Zhang J, Cheng X, Ding M D. Observation of an evolving magnetic flux rope before and during a solar eruption. *Nat Commun*, 2012, 3: 747, arXiv: [1203.4859](#)
- 4 Su Y, van Ballegoijen A, McCauley P, et al. Magnetic structure and dynamics of the erupting solar polar crown prominence on 2012 March 12. *Astrophys J*, 2015, 807: 144, arXiv: [1505.06826](#)
- 5 Cheng X, Kliem B, Ding M D. Unambiguous evidence of filament splitting-induced partial eruptions. *Astrophys J*, 2018, 856: 48, arXiv: [1802.04932](#)
- 6 Wang J, Zhang J. KUAFU and the studies of CME initiation. *Adv Space Res*, 2007, 40: 1770–1779
- 7 Wang J, Zhou G, Zhang J. Helicity patterns of coronal mass ejection-associated active regions. *Astrophys J*, 2004, 615: 1021–1028
- 8 Zhang J, Wang J. Are homologous flare-coronal mass ejection events triggered by moving magnetic features? *Astrophys J*, 2002, 566: L117–L120
- 9 Feng L, Wang Y, Shen F, et al. Why does the apparent mass of a coronal mass ejection increase? *Astrophys J*, 2015, 812: 70, arXiv: [1509.02246](#)
- 10 Wang Y, Chen C, Gui B, et al. Statistical study of coronal mass ejection source locations: Understanding CMEs viewed in coronagraphs. *J*

- [Geophys Res](#), 2011, 116: A04104, arXiv: [1101.0641](#)
- 11 Wang Y, Zhang J, Shen C. An analytical model probing the internal state of coronal mass ejections based on observations of their expansions and propagations. [J Geophys Res](#), 2009, 114: A10104, arXiv: [0909.5060](#)
- 12 Wu D J, Fang C. Coronal plume heating and kinetic dissipation of kinetic Alfvén waves. [Astrophys J](#), 2003, 596: 656–662
- 13 Wu D J, Fang C. Two-fluid motion of plasma in Alfvén waves and the heating of solar coronal loops. [Astrophys J](#), 1999, 511: 958–964
- 14 Li H, Wang C, Richardson J D, et al. Evolution of Alfvénic Fluctuations inside an Interplanetary Coronal Mass Ejection and their contribution to local plasma heating: Joint observations from 1.0 to 5.4 a.u.. [Astrophys J](#), 2017, 851: L2, arXiv: [1709.03639](#)
- 15 Ji H, Cao W, Goode P R. Observation of ultrafine channels of solar corona heating. [Astrophys J](#), 2012, 750: L25
- 16 Tu C Y, Zhou C, Marsch E, et al. Solar wind origin in coronal funnels. [Science](#), 2005, 308: 519–523
- 17 Tian H, DeLuca E E, Cranmer S R, et al. Prevalence of small-scale jets from the networks of the solar transition region and chromosphere. [Science](#), 2014, 346: 1255711, arXiv: [1410.6143](#)
- 18 Liu R, Liu C, Xu Y, et al. Observation of a Moreton wave and wave-filament interactions associated with the renowned X9 Flare on 1990 May 24. [Astrophys J](#), 2013, 773: 166
- 19 Yan Y, Yu Q, Wang T. Extrapolated vector magnetic field distributions of AR 6659 in June 1991 by boundary element method of constant- α force-free field. [Sol Phys](#), 1995, 159: 115–126
- 20 He H, Wang H, Yan Y. Nonlinear force-free field extrapolation of the coronal magnetic field using the data obtained by the Hinode satellite. [J Geophys Res](#), 2011, 116: A01101
- 21 Casini R, White S M, Judge P G. Magnetic diagnostics of the solar corona: Synthesizing optical and radio techniques. [Space Sci Rev](#), 2017, 210: 145–181
- 22 Lyot B. The study of the solar corona without an eclipse. [J Roy Astronom Soc Can](#), 1933, 27: 265
- 23 Petschek H E. Magnetic field annihilation. [NASSP](#), 1964, 50: 425
- 24 Lin J, Forbes T G. Effects of reconnection on the coronal mass ejection process. [J Geophys Res](#), 2000, 105: 2375–2392
- 25 Chen P F, Shibata K. An emerging flux trigger mechanism for coronal mass ejections. [Astrophys J](#), 2000, 545: 524–531
- 26 Su Y, Veronig A M, Holman G D, et al. Imaging coronal magnetic-field reconnection in a solar flare. [Nat Phys](#), 2013, 9: 489–493, arXiv: [1307.4527](#)
- 27 Xue Z, Yan X, Cheng X, et al. Observing the release of twist by magnetic reconnection in a solar filament eruption. [Nat Commun](#), 2016, 7: 11837
- 28 Li L, Zhang J, Peter H, et al. Magnetic reconnection between a solar filament and nearby coronal loops. [Nat Phys](#), 2016, 12: 847–851, arXiv: [1605.03320](#)
- 29 Yan X L, Yang L H, Xue Z K, et al. Simultaneous observation of a flux rope eruption and magnetic reconnection during an X-class solar flare. [Astrophys J](#), 2018, 853: L18, arXiv: [1801.02738](#)
- 30 Huang G L. Plasma Dynamics and Its Application in Solar Physics (in Chinese). Beijing: Science Press, 2009 [黄光力. 等离子体动力学及其在太阳物理中的应用. 北京: 科学出版社, 2009]
- 31 Zeeman P. On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance. [London Edinburgh Dublin Philos Mag J Sci](#), 1897, 43: 226–239
- 32 Donati J F, Semel M, Rees D E, et al. Detection of a magnetic region on HR 1099. [Astron Astrophys](#), 1990, 232: L1–L4
- 33 Qu Z Q, Dun G T, Chang L, et al. Spectro-imaging polarimetry of the local corona during solar eclipse. [Sol Phys](#), 2017, 292: 37
- 34 Brueckner G E, Howard R A, Koomen M J, et al. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO). [Sol Phys](#), 1995, 162: 357–402
- 35 Schad T A, Penn M J, Lin H, et al. Vector magnetic field measurements along a cooled STEREO-imaged coronal loop. [Astrophys J](#), 2016, 833: 5, arXiv: [1610.05332](#)
- 36 Liu Y, Lin H. Observational test of coronal magnetic field models. I. Comparison with potential field model. [Astrophys J](#), 2008, 680: 1496–1507, arXiv: [0710.3223](#)
- 37 Li H, Degl’Innocenti E L, Qu Z. Polarization of coronal forbidden lines. [Astrophys J](#), 2017, 838: 69
- 38 Lin H, Penn M J, Tomczyk S. A new precise measurement of the coronal magnetic field strength. [Astrophys J](#), 2000, 541: L83–L86
- 39 Lin H, Kuhn J R, Coulter R. Coronal magnetic field measurements. [Astrophys J](#), 2004, 613: L177–L180
- 40 Tomczyk S, Card G L, Darnell T, et al. An instrument to measure coronal emission line polarization. [Sol Phys](#), 2008, 247: 411–428
- 41 Tomczyk S, McIntosh S W, Keil S L, et al. Alfvén waves in the solar corona. [Science](#), 2007, 317: 1192–1196

- 42 Bąk-Stęślička U, Gibson S E, Fan Y, et al. The magnetic structure of solar prominence cavities: New observational signature revealed by coronal magnetometry. *Astrophys J*, 2013, 770: L28, arXiv: [1304.7388](#)
- 43 Tian H, Tomczyk S, McIntosh S W, et al. Observations of coronal mass ejections with the coronal multichannel polarimeter. *Sol Phys*, 2013, 288: 637–650, arXiv: [1303.4647](#)
- 44 Judge P G. Spectral lines for polarization measurements of the coronal magnetic field. I. Theoretical intensities. *Astrophys J*, 1998, 500: 1009–1022
- 45 Judge P G, Low B C, Casini R. Spectral lines for polarization measurements of the coronal magnetic field. IV. Stokes signals in current-carrying fields. *Astrophys J*, 2006, 651: 1229–1237
- 46 Judge P G. Spectral lines for polarization measurements of the coronal magnetic field. V. Information content of magnetic dipole lines. *Astrophys J*, 2007, 662: 677–690
- 47 Judge P G, Habbal S, Landi E. From forbidden coronal lines to meaningful coronal magnetic fields. *Sol Phys*, 2013, 288: 467–480, arXiv: [1304.3863](#)
- 48 Keil S L, Thomas R, Rimmele J, et al. ATST: The largest polarimeter. In: Kuhn J R, Harrington D M, Lin H, et al., eds. *Solar Polarization 6*, ASP Conference Series, Vol. 437. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2011. 319
- 49 Tomczyk S, Landi E, Burkepile J T, et al. Scientific objectives and capabilities of the coronal solar magnetism observatory. *J Geophys Res Space Phys*, 2016, 121: 7470–7487
- 50 Gallagher D, Wu Z, Larson B, et al. The COSMO coronagraph optical design and stray light analysis. In: Hall H J, Gilmozzi R, Marshall H K, et al., eds. *Ground-based and Airborne Telescopes VI*, Proceeding of SPIE, Vol. 9906. Edinburgh, 2016. 990654
- 51 Li R, Huang X. Solar flare forecasting model based on automatic feature extraction of sunspots (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 119601 [李蓉, 黄鑫. 一种黑子特征自动提取的太阳耀斑模型. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 119601]
- 52 Yan Y, Zhang J, Wang W, et al. The Chinese Spectral Radioheliograph—CSRH. *Earth Moon Planet*, 2009, 104: 97–100
- 53 Qu Z Q, Deng L H, Dun G T, et al. On the combination of imaging-polarimetry with spectropolarimetry of upper solar atmospheres during solar eclipses. *Astrophys J*, 2013, 774: 71
- 54 Doschek G A, Warren H P, Laming J M, et al. Electron densities in the solar polar coronal holes from density-sensitive line ratios of Si VIII and S X. *Astrophys J*, 1997, 482: L109–L112
- 55 Hou J, de Wijn A G, Tomczyk S. Design and measurement of the Stokes polarimeter for the COSMO K-coronagraph. *Astrophys J*, 2013, 774: 85
- 56 Xu C, Qu Z, Zhang X, et al. Polarimeter with two ferroelectric liquid-crystal modulators attached to the Yunnan solar tower. *Appl Opt*, 2006, 45: 8428–8433
- 57 Serrurier M. Structural features of the 200-inch telescope for Mt. Palomar Observatory. *Civil Eng*, 1938, 8: 524
- 58 Szeto K, Murowinski R G, Roberts S, et al. Gemini multiobject spectrograph: A flexure critical design. In: *Proceedings Volume 3355, Optical Astronomical Instrumentation*. Kona, 1998. 297
- 59 Murdin P, Moore P. Reflecting telescopes. In: Murdin P, ed. *Encyclopedia of Astronomy and Physics*. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2000

CORONAL MAGNETISM AND PLASMA ASSEMBLED SCOPES (COMPASS)

QU ZhongQuan^{1*}, LI Hui², ZHONG Yue¹, LIANG Yu¹, SONG ZhiMing¹,
ZHANG HaiYing³, ZHANG HongXin⁴, CHEN Yao⁵, TIAN Hui⁶, CHENG Xin⁷,
XIA LiDong⁵, LI Bo⁵, CHEN Bo⁴, YAN XiaoLi¹, LIU Rui⁸, SHEN ChengLong⁸,
FENG Li², HOU JunFeng⁹, LI Hao¹, LI Zheng⁷ & LI ShaoYing¹

¹ Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;

² Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China;

³ Nanjing Institute for Astronomical Optical Technique, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;

⁴ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

⁵ Institute of Space Sciences, Shandong University (Weihai), Weihai 264209, China;

⁶ School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

⁷ School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

⁸ School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

⁹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Finding out and identifying mechanisms responsible for coronal eruptions, coronal heating and solar wind acceleration form the cores in solar physics research, and such mechanisms are crucial for us to establish efficient models for predicting the catastrophic space weather and even for sun-like stars. As one important element of the Ground-based Advanced Solar Observatory (ASO-G), the proposed CORONAL MAGNETISM AND PLASMA ASSEMBLED SCOPES (COMPASS) consist of three coronagraphs of different sizes. They are respectively the coronal magnetism probing refractive Lyot coronagraph with an aperture of 1.26 m, called COMPT, improved from American COSMO-LC, a two-dimensional spectroscopic diagnosis coronagraph with an aperture of 0.30 m, named TSDC, and a small Lyot coronagraph with an aperture of 0.09 m attached to COMPT for monitoring. Observations of COMPT focus on the accurate measurement of vector magnetic fields and other physical parameters in a height range of 0.05–0.65 solar radius above solar limb by two observing modes, the integral field Stokes spectroscopy (IFS) realized by a pair of integral field units and corresponding spectrometers as well as two-dimensional imaging Stokes spectroscopy (TDIS) by dual tunable Lyot filters, and the reduced polarimetric optical switching is applied for high precision polarimetry, while observations from TSDC will provide information on the necessary physical parameters of coronal plasma in a field of view with height range from 0.10 to 1.5 solar radii, with help of Fabry-Perot interferometer to carry out the imaging spectroscopy as well as white light polarization imaging. These three coronagraphs form a complementary set. The scientific and observational goals are stated and then the preliminary optical, mechanical and electronic control designs of these coronagraphs are described. Finally the innovative ideas to serve the goals are outlined.

astronomical telescope, solar physics, corona magnetism

PACS: 47.27.-i, 47.27.Eq, 47.27.Nz, 47.40.Ki, 47.85.Gj

doi: [10.1360/SSPMA2018-00304](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00304)