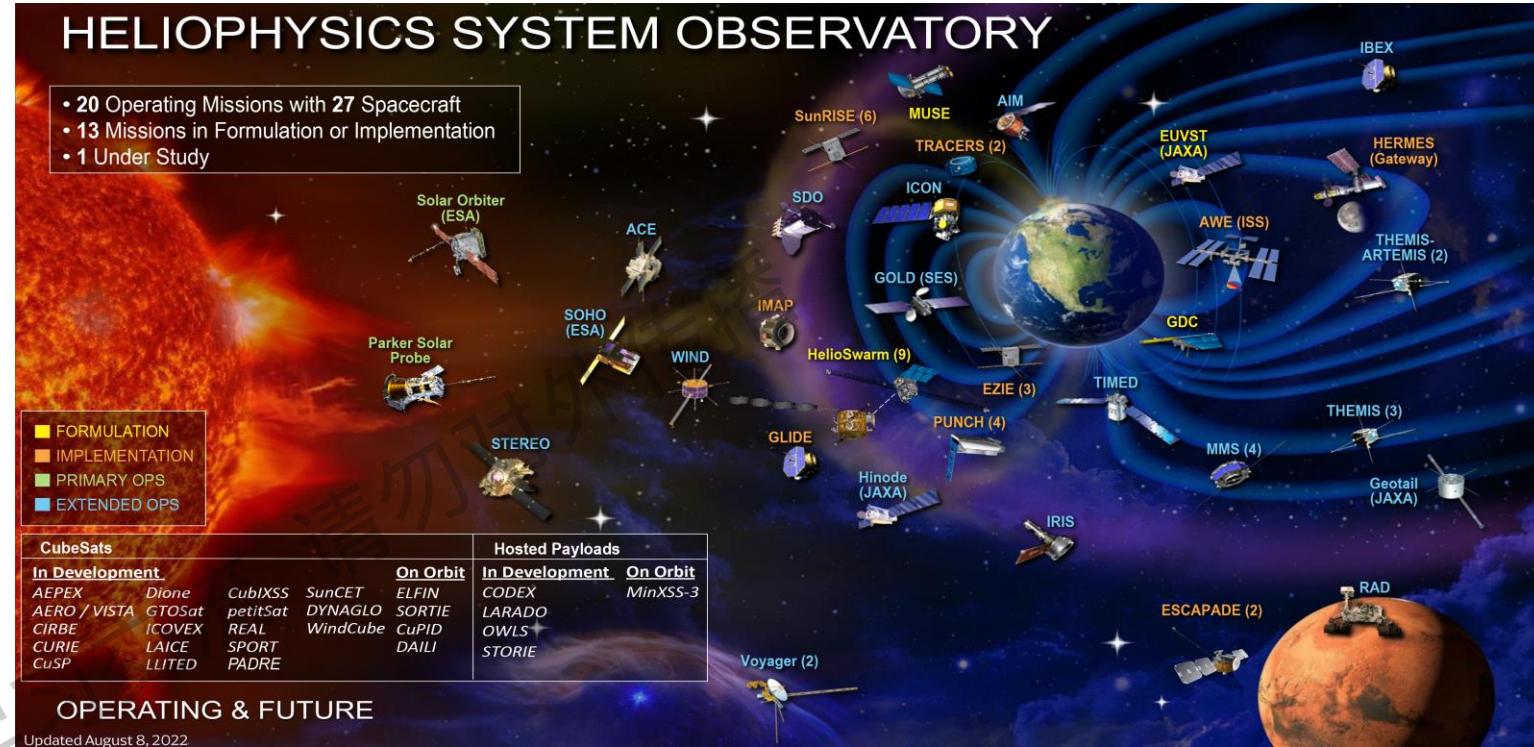


太阳磁场观测技术进展及其空间应用

邓元勇
dyy@nao.cas.cn

仅供学习交流 请勿对外传播

- 目前国际上已经发射了近百颗和太阳相关的卫星
- 但位居国际太阳物理研究先进行列的中国，作为航天技术大国的中国，长期未能实现空间太阳观测零的突破

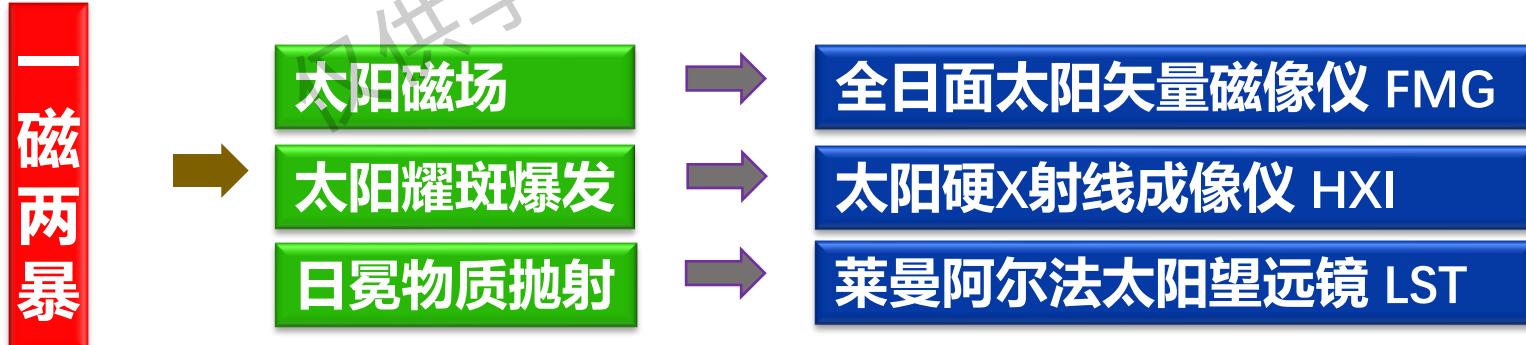
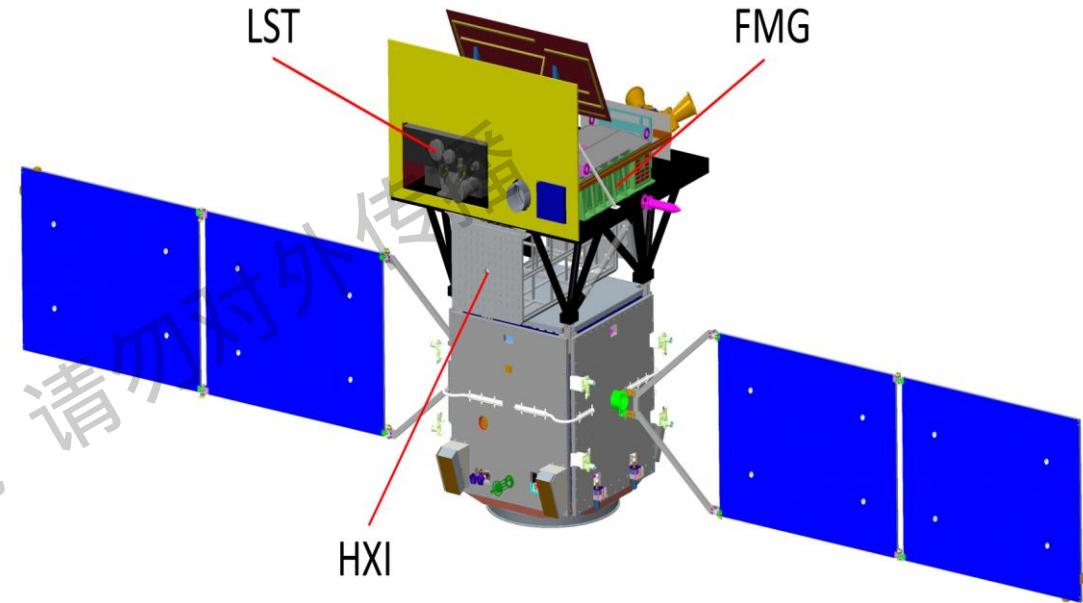


- 2021年，风云卫星搭载的极紫外成像仪、双超实验卫星搭载的H α 成像光谱仪CHASE，首次实现空间太阳观测
- 2022年，“力箭一号”科学实验卫星，我国首次实现太阳过渡区探测
- 2022年，我国第一颗太阳综合观测科学卫星“先进天基太阳天文台ASO-S”的成功发射，标志中国正式进入空间太阳观测国际大家庭

我国首次实现空间太阳磁场观测

先进天基太阳天文台ASO-S
(夸父一号)

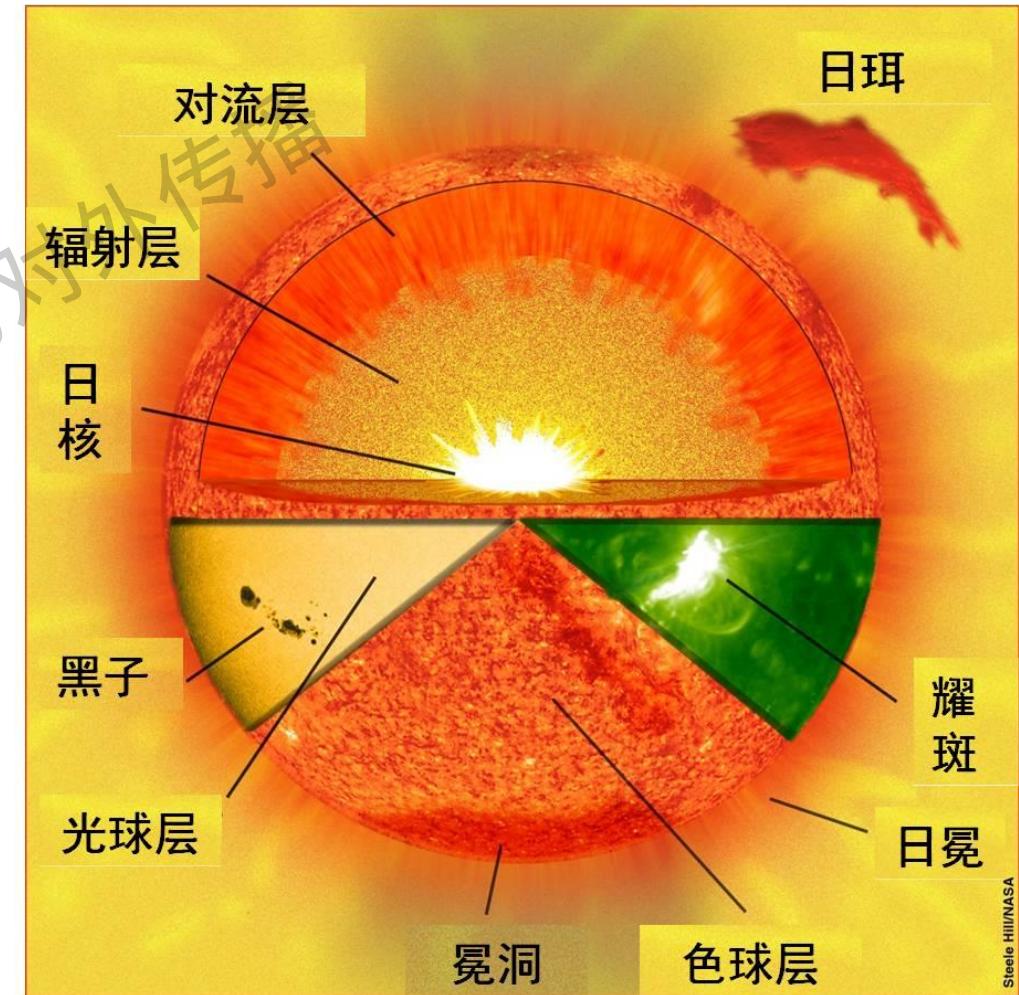
2017年工程立项
2022年10月9日发射



拓展的应用目标：探测太阳爆发，预报空间天气，为我国空间环境的安全提供保障

为什么观测太阳磁场

- 太阳内部---核反应区、辐射区、对流区
 - 太阳大气---光球、色球、日冕、日珥
 - 可观测的太阳---太阳大气
高温---电离---等离子体、第四态
- 天然的、无法模拟的等离子实验室



为什么观测太阳磁场

- 可观测的太阳---太阳大气，是一个由**磁场主导**的巨大的等离子体环境

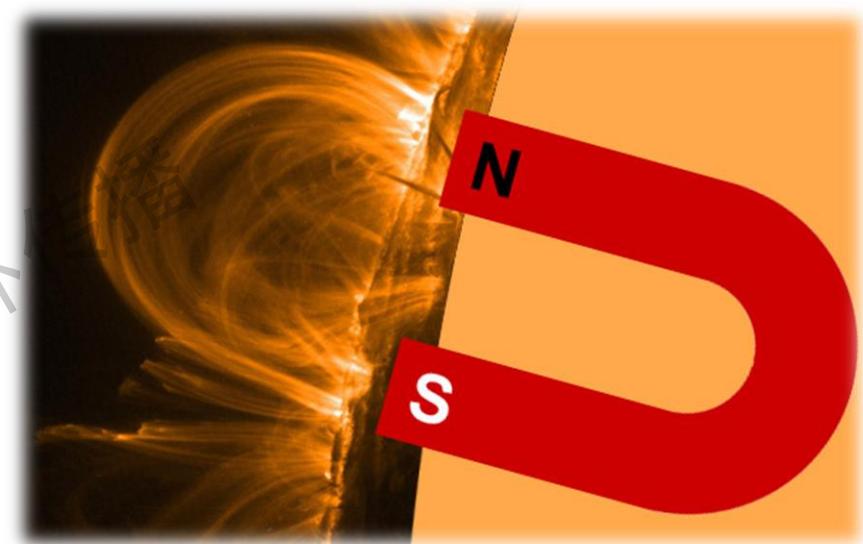
内部核反应能量不断向外传输

→ 太阳是巨大的、不稳定的磁铁

→ 太阳大气中的一切现象和过程都是电磁相互作用的结果

➤ 太阳耀斑：磁能快速释放

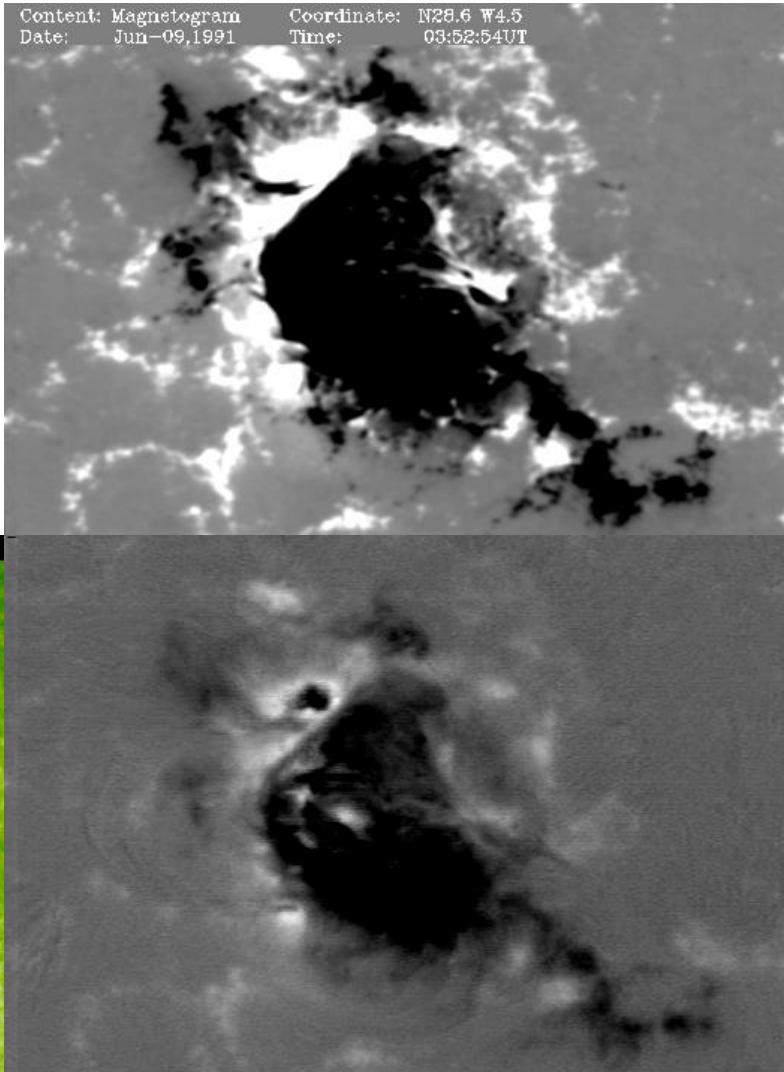
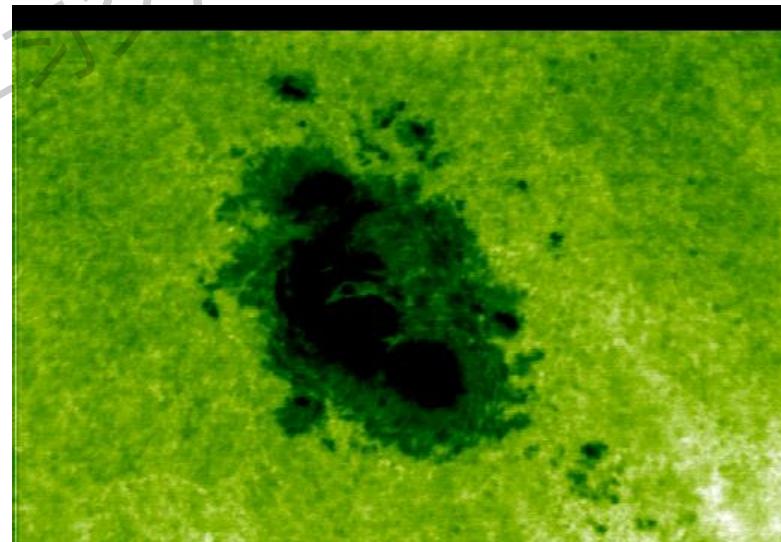
➤ 日冕物质抛射：磁重联导致的磁等离子体高速逃逸



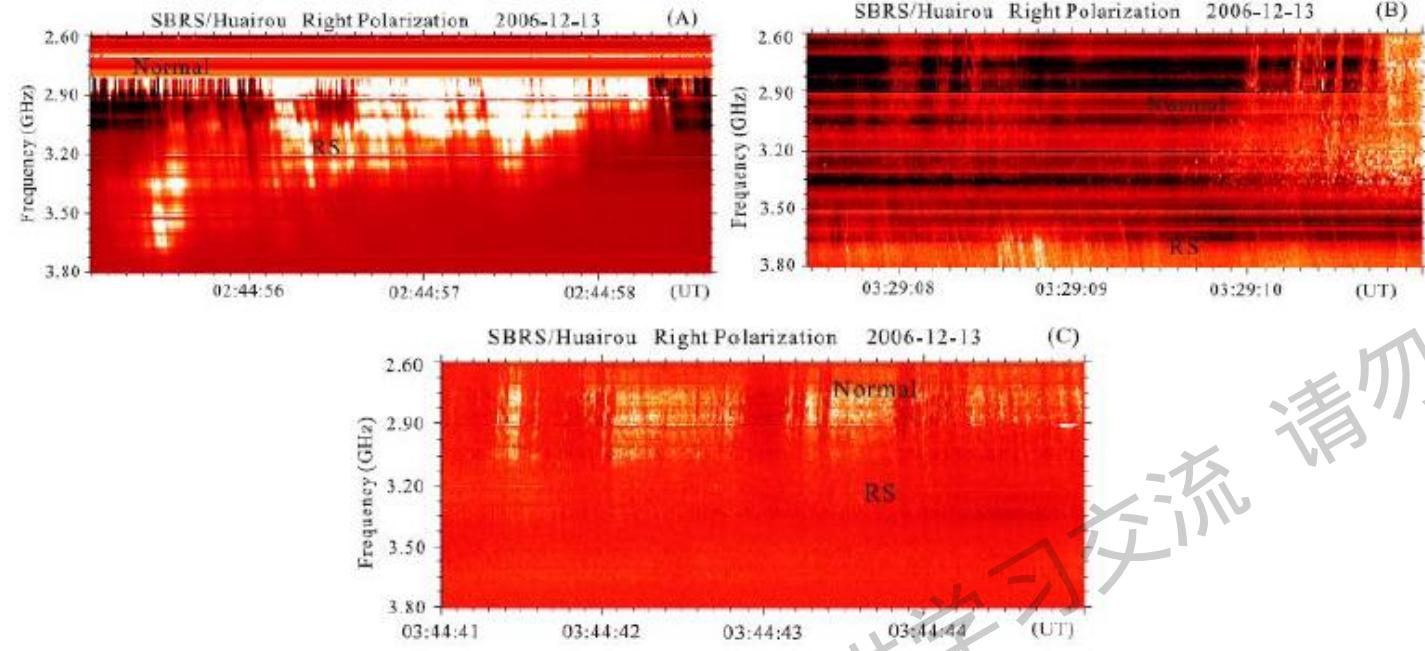
→ 磁场是太阳物理的第一观测量

如何进行太阳磁场测量

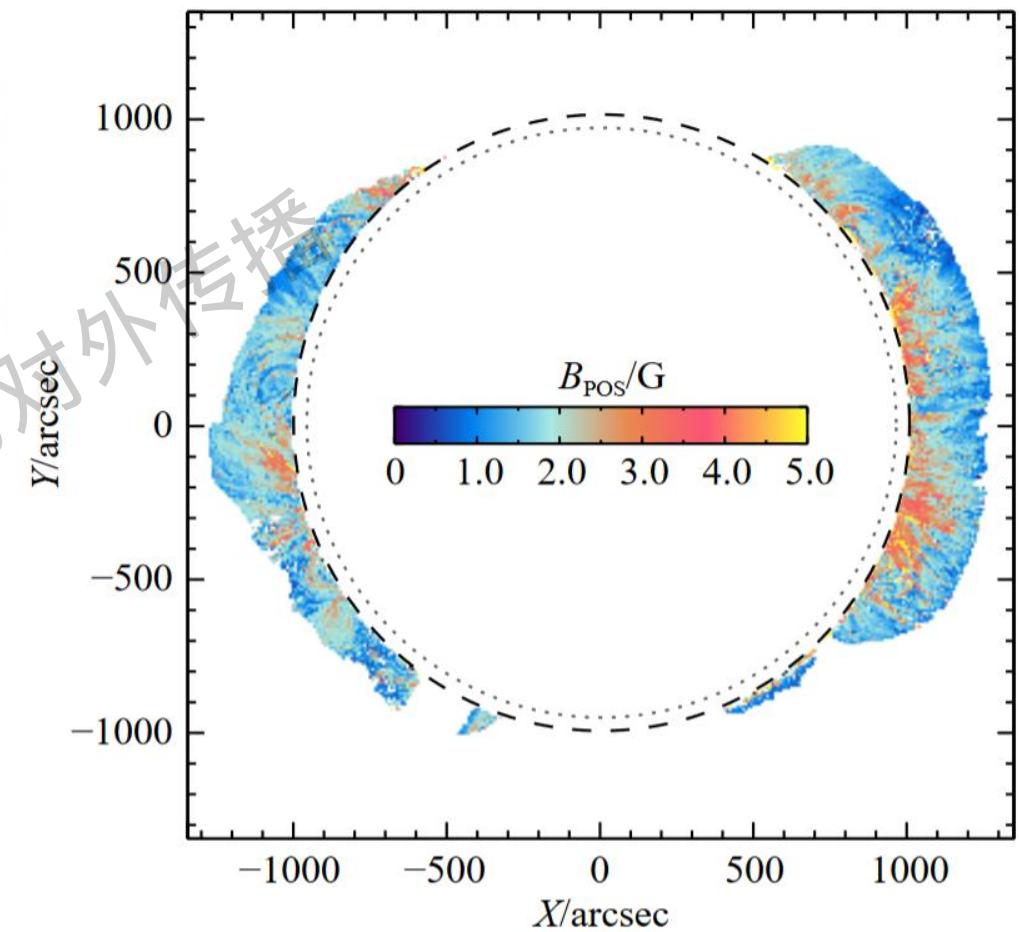
- Zeeman效应
 - 光学/红外，光球/色球，**成熟**
- Hanle效应
 - 光学/近紫外/红外，色球/日冕，**不成熟**
- 磁回旋辐射（磁矢量）、韧致辐射（强度）
 - 射电，日冕，**不成熟**
- 冕整学
 - 波动，日冕，**不成熟**
- 磁诱导跃迁
 - 极紫外，日冕，**探索阶段**
-



太阳磁场望远镜观测到的一个超级活动区（左下）
光球（右上）、色球（右下）磁场



利用我国的动态频谱观测资料获得的耀斑后相中
微波III型爆的强偏振信号（谭宝林等）
不足：空间分辨率低、只能探测强场区域

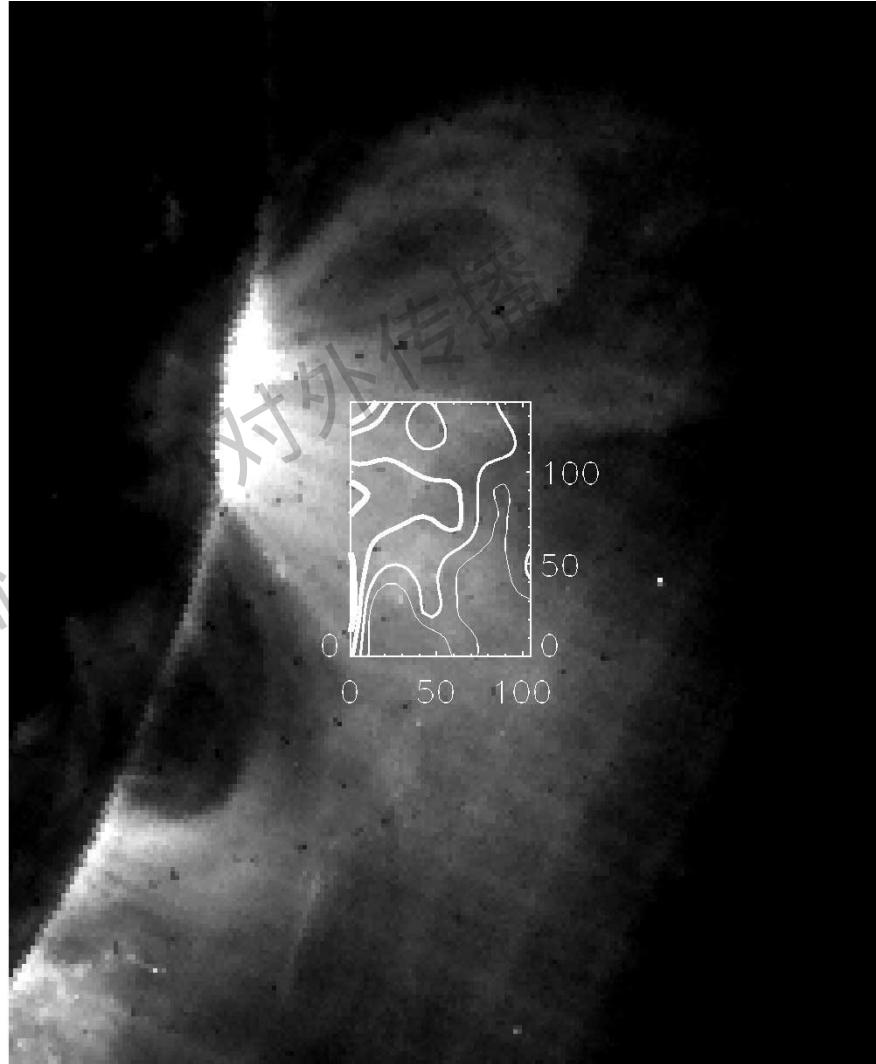


对CoMP观测到的扭曲模行波做冕震学诊断得
到的日冕磁场的全局性分布（田晖、杨子浩等）
不足：日面日冕磁场信息无法获得

Lin等人利用HAO日冕仪开展的**日冕偏振测量**

但问题多多：

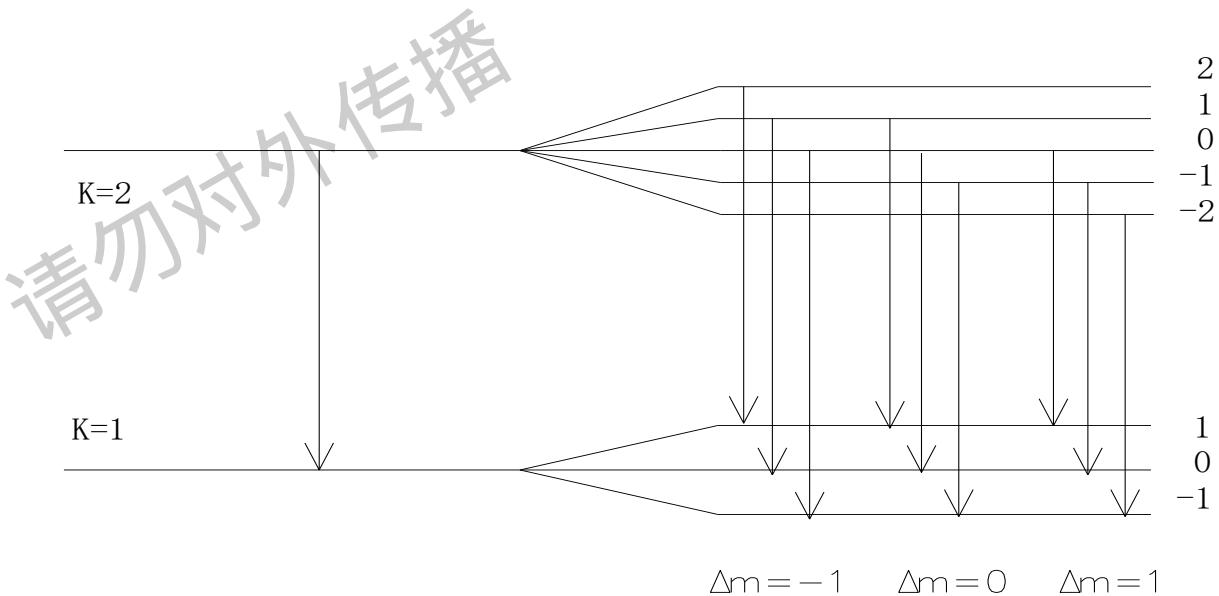
- 精度低
- 分辨率低
- 利用日冕边缘测量，其实无法获得我们所谓的三维磁大气结构
- 偏振不等于磁场



→Zeeman效应是目前相对最好的测量方法

- 在无外磁场作用时 ($B=0$) , 原子从高能级跃迁到低能级, 便发出频率为 ν_0 的单色光
- 当原子在外磁场中时 ($B \neq 0$) , 处在磁场中的原子能级将发生空间量子化。这两个能级都发生分裂, 如上图所示
- 分裂线的数目由子能态数目J和磁量子数M决定
- 最简单的是三分裂谱线, 即谱线在外磁场中分裂为三条子线: 一条 π 子线, 分裂后, 波长 λ_0 不变; 两条 σ 子线, 其波长在分裂后则漂移到 $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ 。这种特殊的分裂称为Zeeman三分裂
- 通常的太阳磁场测量谱线即使不是三分裂, 也简化为等效三分裂处理

Zeeman效应



原子能级在外磁场中的分裂

利用Zeeman效应进行太阳磁场测量

- 始于1908年 (Hale)

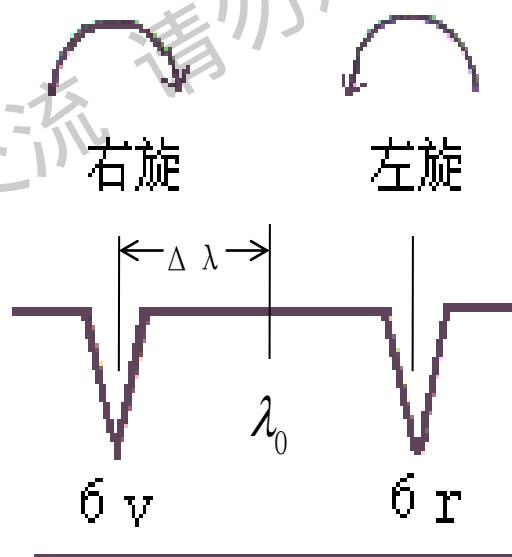
要点一

$$\Delta\lambda_B = 4.67 \times 10^{-13} g \lambda^2 B$$

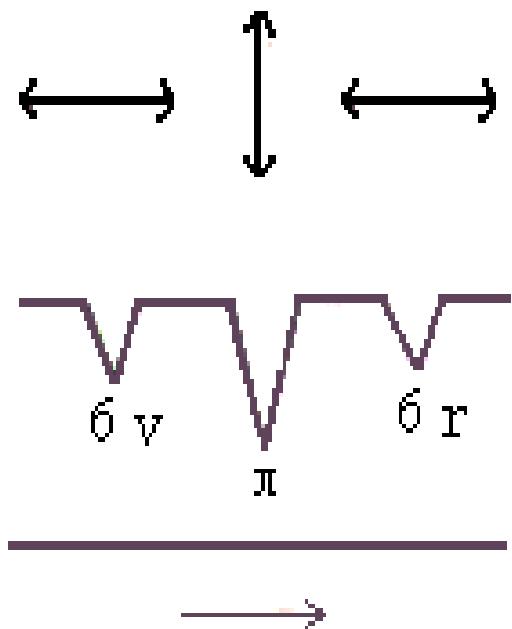
要点二：

子线各具不同偏振态

纯吸收线的Zeeman 效应



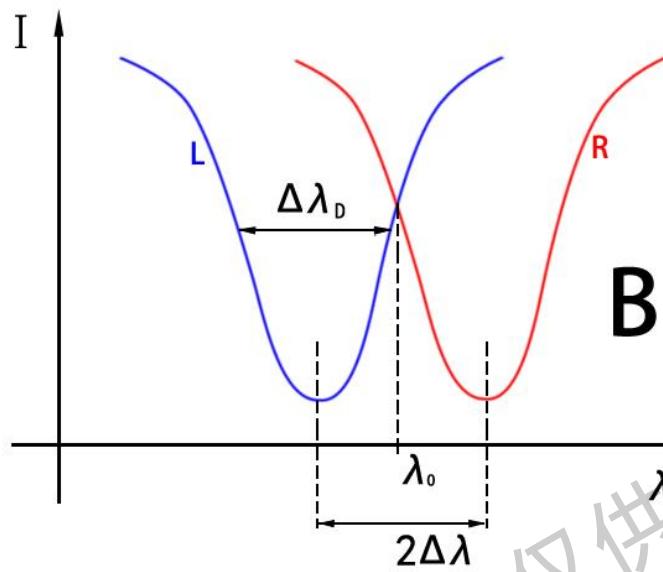
磁场
(a)



磁场
(b)

直接测量： (要点一)

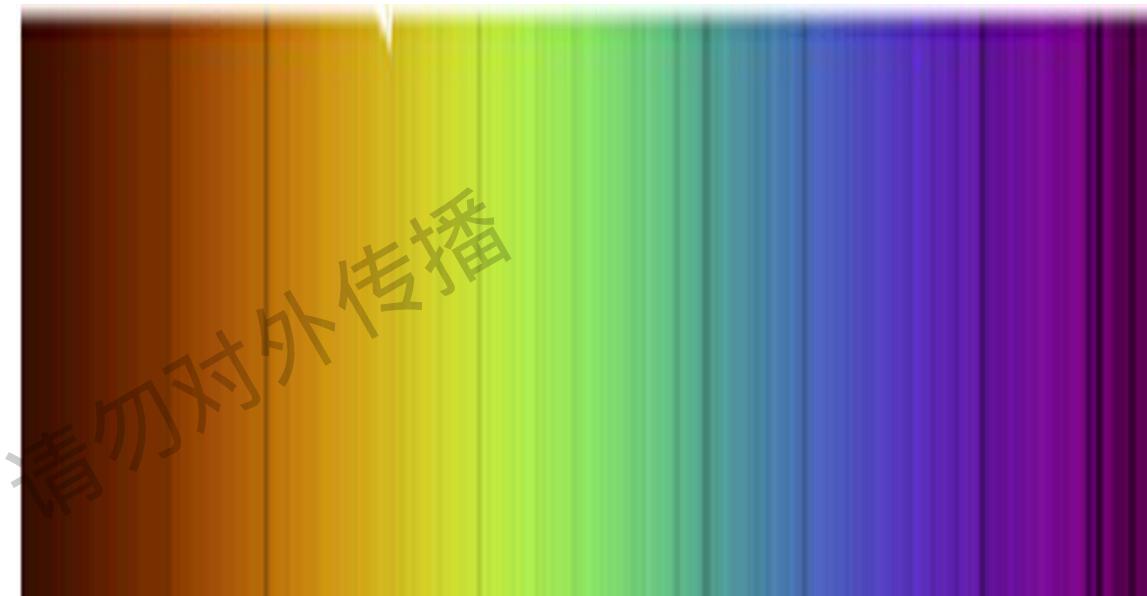
当 $\Delta\lambda$ (与 $\Delta\lambda_D$ 相比) 足够大时



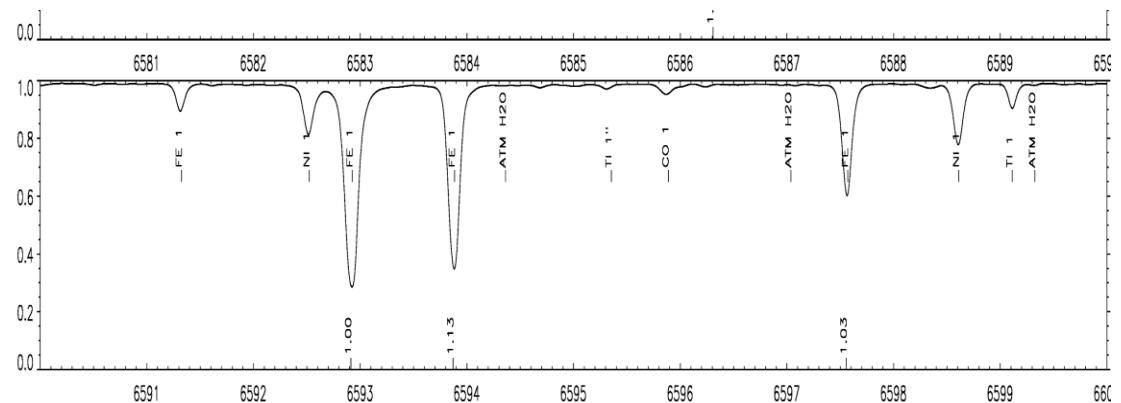
$\Delta\lambda \rightarrow$ 磁场强度

$\Delta\lambda$: Zeeman裂距

$\Delta\lambda_D$: 谱线宽度

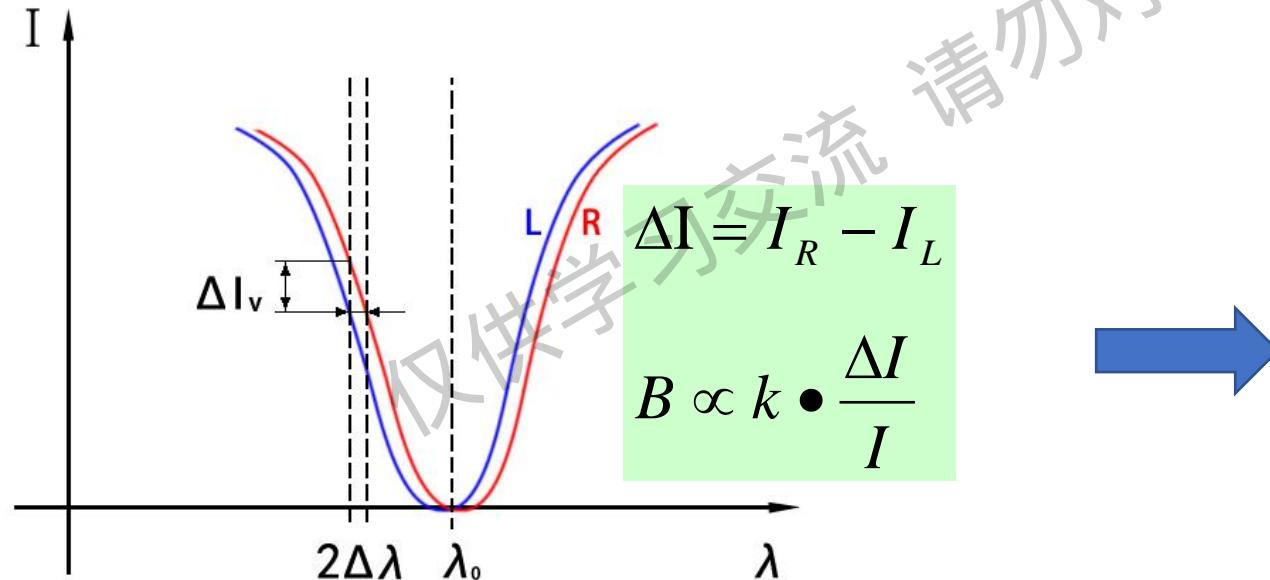


太阳 夫琅和费谱线



在过去百余年中，成熟的磁场测量都是在可见光（和有限的近红外）谱线上开展的，
Zeeman裂距相对于太阳谱线的宽度而言非常小

当 $\Delta\lambda$ （与 $\Delta\lambda_D$ 相比）不够大时 → 间接测量（要点二）



磁场测量两大关键
• 极窄带光谱 (0.01nm)
• 极高精度偏振 (10^{-4})

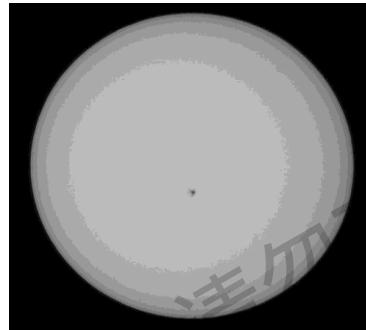
偏振信息 → 强度差 ΔI → 反演 → 磁场

太阳磁场测量系统概图

(白光像→单色像→磁图)

望远系统

探测器
(白光像)



太阳白光像

望远系统

+

滤光系统

探测器
(单色像)



太阳单色像

望远系统

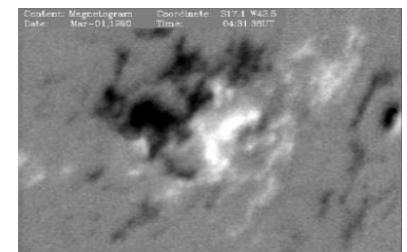
+

滤光系统

+

偏振解调

探测器
(磁图)

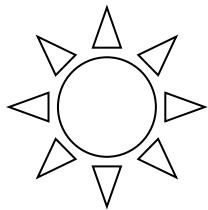


太阳磁场图

光谱、偏振、探测器是太阳磁场望远镜技术的关键要素

两大类磁场测量设备

--- “成谱”与“成像”



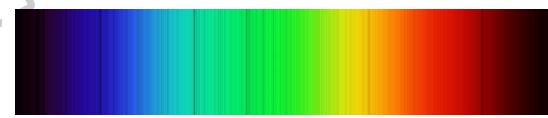
光学系统



光谱仪

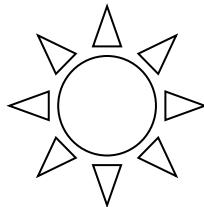
狭缝

“线源”的太阳光谱轮廓

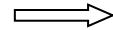


- 高的测量精度，获得观测对象的温度、速度、密度等丰富的物理信息
- 但这类设备观测的是沿着光谱仪狭缝方向的线源信息

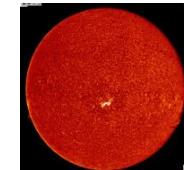
只见树木不见森林



光学系统+窄带滤光



单色光的太阳二维图像



- 跟踪太阳结构的形态演化从而理解太阳磁活动的动力学过程；太阳突发式灾害现象的监测与预报
- 物理信息相对较少，精度稍低

知其然不知其所以然

➤ 典型的“成谱” 观测设备

➤ 光栅光谱仪为典型代表

➤ 典型的“成像” 观测设备

➤ 基于偏振干涉的双折射滤光器

➤ 基于反射干涉的迈克逊干涉仪、F-P干涉仪

➤ 基于光波选择的原子滤光器

成谱、成像对太阳物理都非常重要

我国在基于双折射滤光器的成像型磁场设备研制方面居于国际领先水平

本报告主要探讨成像型磁像仪技术

怀柔观测基地太阳磁场望远镜



太阳磁场望远镜的建设者
是科学院的骄傲

周光生

九〇年八月一日

证

获奖项目：太阳磁场望远
获奖单位：中国科学院北
奖励等级：一等
奖励日期：一九八八年七
证书号：电-1-002-01

科技进步
奖

为表彰在促进科学技术进步工
贡献者，特颁发国家科技进步奖证：

获奖项目：多通道太阳望远镜

获奖单位：中国科学院北京天文台

奖励等级：二等奖

奖励时间：一九九六年十二月

证书号：01-2-002-01

中华人民共和国
国家科学技术委员会主任

自
证

获奖项目：JK863-2

获奖单位：中国科学

获奖等级：军队科技

奖励日期：2007年9

证书号：2007KD1014



KXYL



国家自然科学奖
证书

为表彰国家自然科学奖获得者，特
颁发此证书。

项目名称：太阳磁场结构和演化研究

奖励等级：二等奖

获奖者：汪景琇(中国科学院国家天文台)



2009年12月23日

证书号：2009-Z-102-2-02-R01

太阳磁场测量关键技术---极窄光谱带成像

双折射滤光器

利用偏振光干涉原理



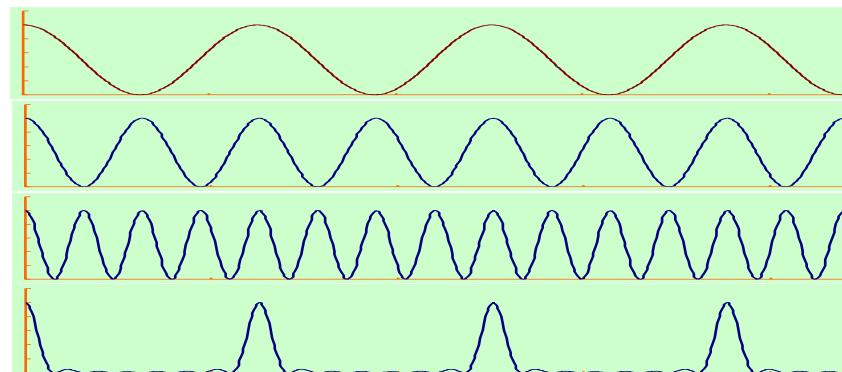
Lyot晶体级单元

第一级透过率曲线——晶体厚度为 d

第二级透过率曲线——晶体厚度为 $2d$

第三级透过率曲线——晶体厚度为 $4d$

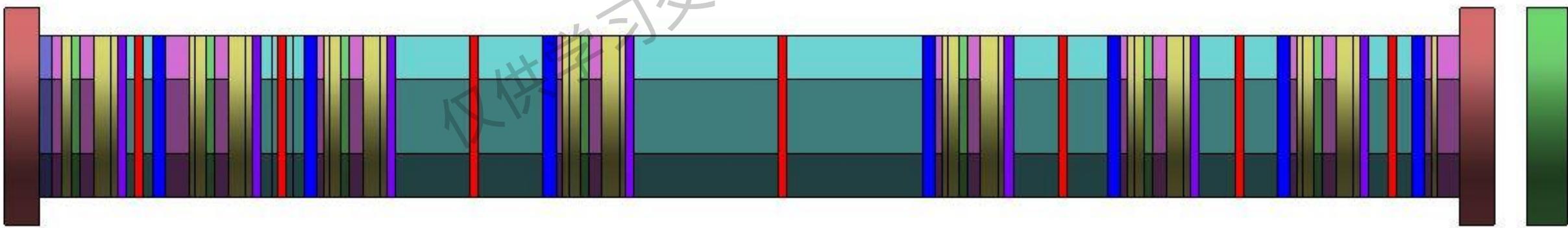
三级叠加后的透过率曲线



Lyot双折射滤光器原理示意图

FMG滤光器光学设计

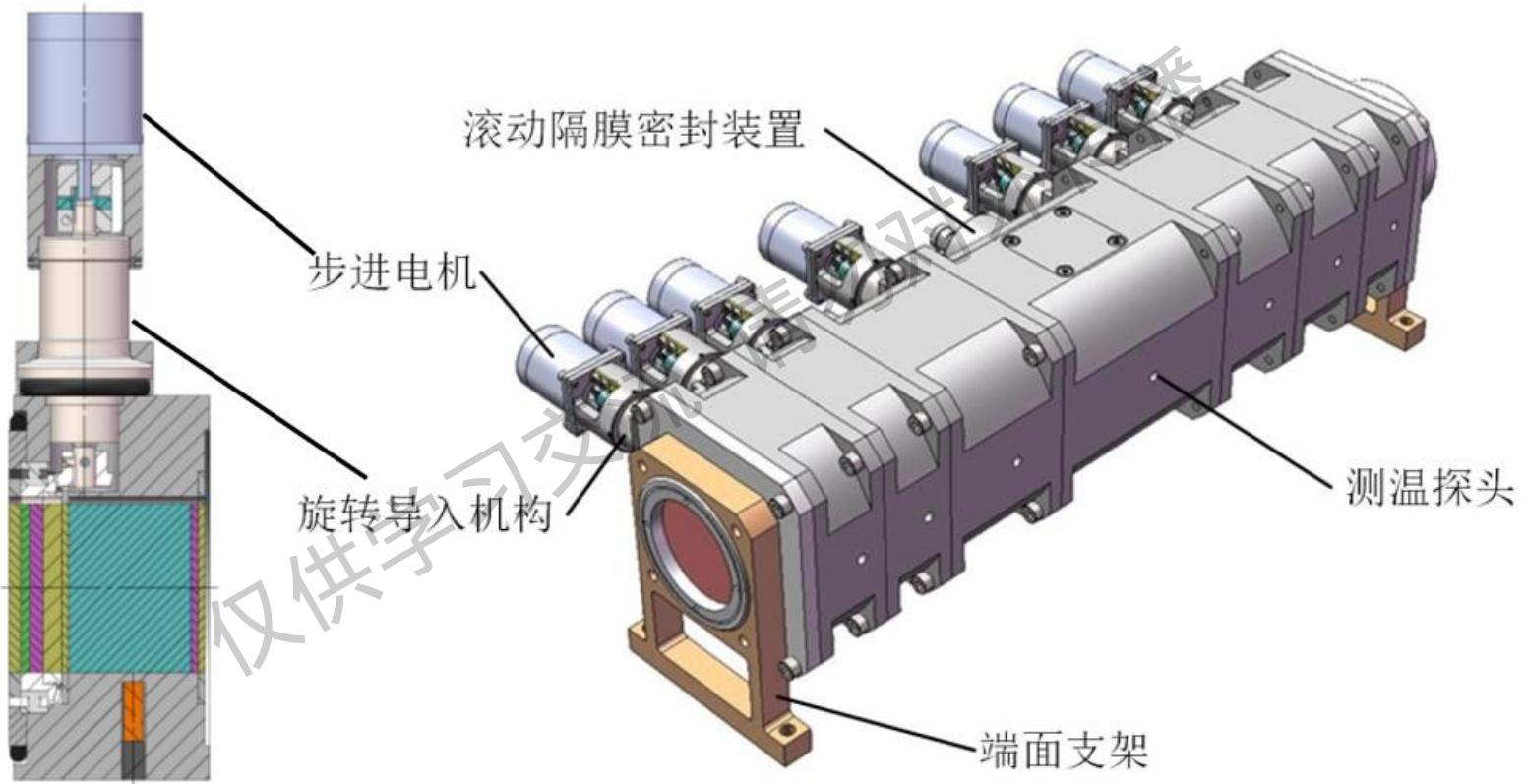
- 采用经典里奥双折射滤光器设计
- 7级宽视场可调的里奥滤光器
- 滤光器工作中心波长532.418nm
- 带宽 (FWHM) 0.01nm
- 透过率优于8%，主带外杂散光<15%



级数	半宽 (nm)	材料	厚度 (mm)	宽视场	干涉级数
1	0.01	C	32.175*2	W	10528*2
2	0.02	C	16.088*2	W	5264*2
3	0.04	C	8.044*2	W	2632*2
4	0.08	C	4.022*2	W	1316*2
5	0.16	C	2.011*2	W	658*2
6	0.32	C	1.005*2	W	329*2
7	0.64	Q	9.9*2	W	171*2

数百光学元器件

FMG滤光器结构设计



七组运动部件

滤光器技术挑战

- 光学元件众多，浸泡在硅油中 → 减少界面反射损失和散射光
- 高精度温控：温度变化 → 双折射率变化 → 透过带漂移
 - 异型结构、工作场景复杂
- 旋转部件 → 透过带中心位置可调
- 空间应用难点
 - 油浸动密封
 - 运动部件高可靠性
 - 精密温控

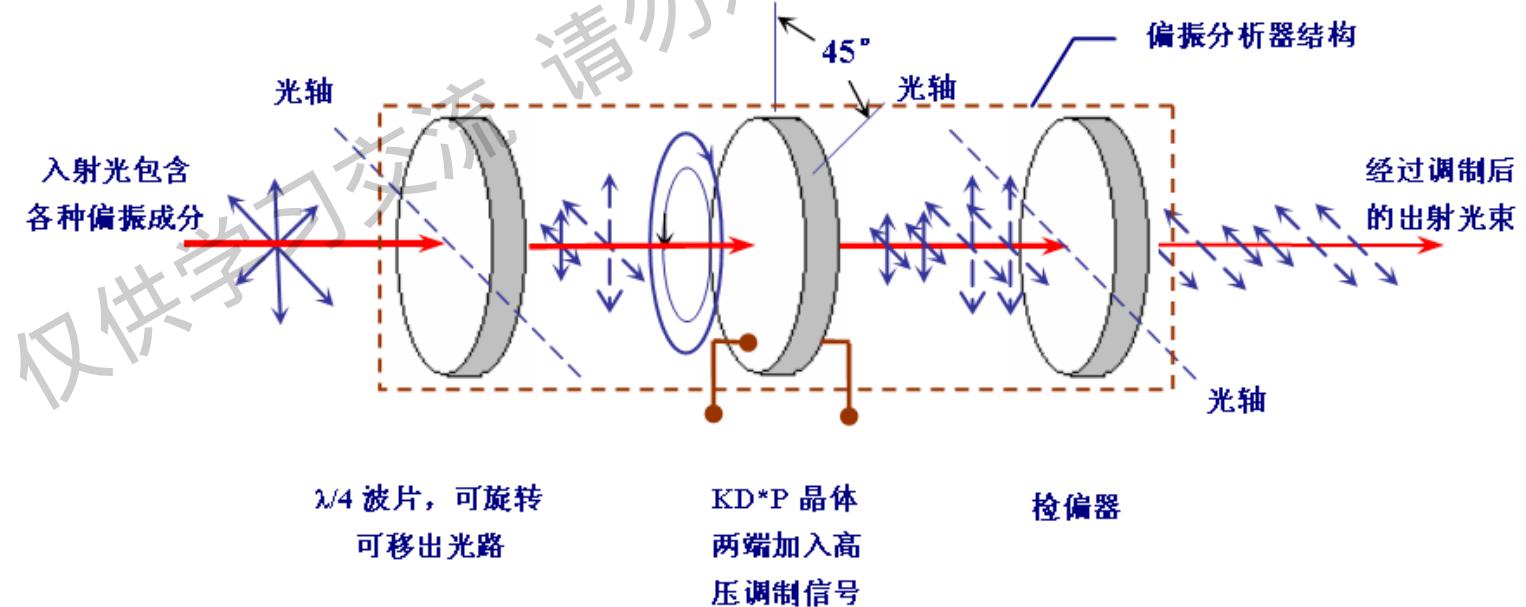
太阳磁场测量关键技术---高精度偏振测量

偏振分析器

偏振分析器的作用是分离或曰选择所需的偏振成份

电光晶体调制型

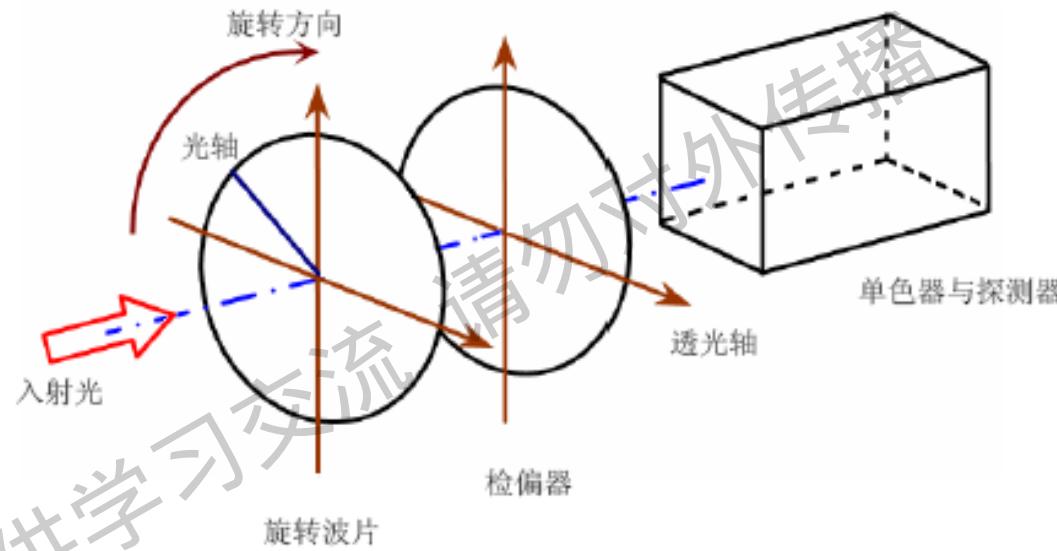
调制速度快
旋转结构少或没有
原材料性能相对不可控



调制元件：KD*P晶体、光弹晶体、压电晶体、液晶波片（向列、铁电）

机械旋转调制型

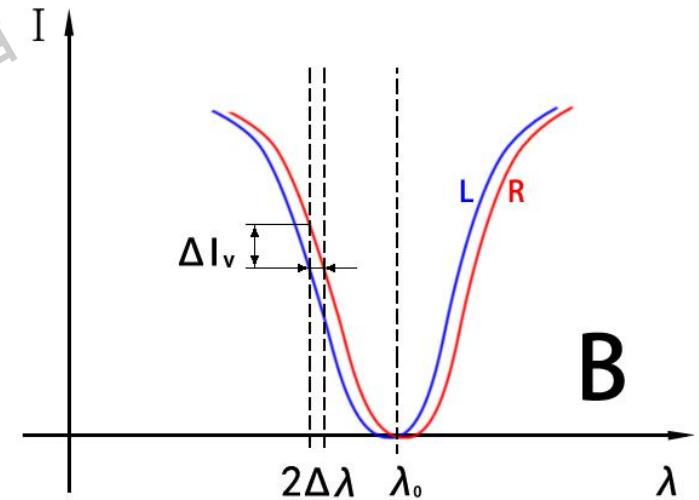
调制速度较慢
原材料性能好



$$I = I + (\cos^2(2\theta) + \sin^2(2\theta)\cos(\delta)) \cdot Q + \frac{1}{2}\sin(2\theta)\cos(2\theta)(1-\cos(\delta)) \cdot U - \sin(2\theta)\sin(\delta) \cdot V$$

FMG对偏振测量的需求

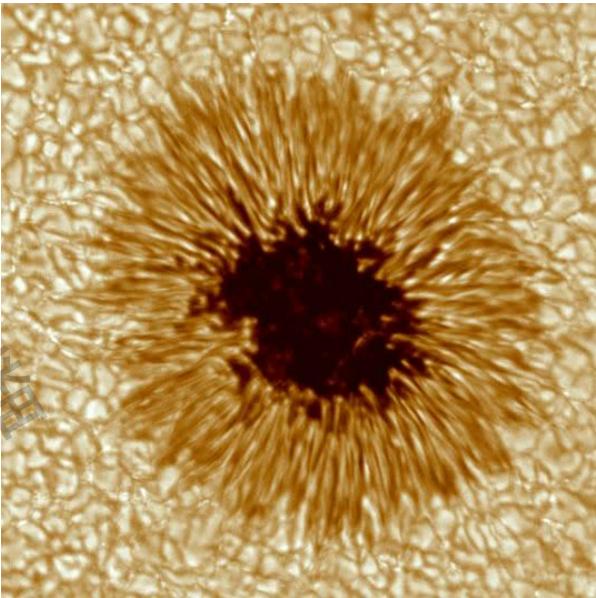
- FMG目标：磁场测量**灵敏度最高的空间太阳磁像仪**
- 此前国际最好的空间磁像仪为美国SDO卫星HMI载荷
 - 灵敏度约10Gauss量级 (1σ)
 - **远低于**怀柔基地太阳磁场望远镜能达到的最优指标
 - 分析对比发现，区别来源于偏振测量方式
 - HMI：**机械调制**，不同偏振态获取时间差数秒以上
 - **磁场望远镜**：**电光调制**，十毫秒量级交替采样、多帧叠加



$$\Delta I = I_R - I_L$$
$$B \propto k \cdot \frac{\Delta I}{I}$$

• 太阳磁场望远镜为什么采用电光调制?

- 地球大气对观测的影响：抖动、闪烁、模糊、畸变
- 弱磁场信号的 $\Delta I/I$ 在 10^{-4} 量级，地球大气对测量精度影响不可忽视
- 大气相干时间数十毫秒量级，在此之下大气可视为“被冻结”
- 在这个时间之内完成 ΔI 的测量，可最大限度降低大气对测量精度影响



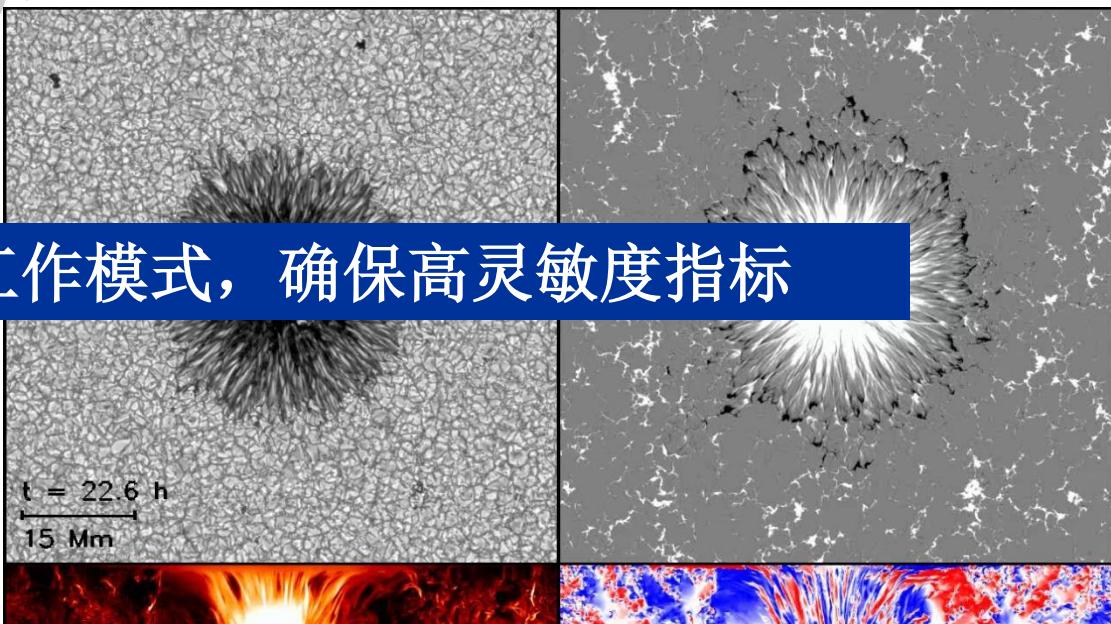
FMG采用短曝光快速交替采样、多帧叠加工作模式，确保高灵敏度指标

高速交替采样

- 多帧叠加（数百）提高信噪比

• HMI空间设备，精度低，WHY?

- 太阳大气本身的演化，在秒级时间间隔上足以影响磁场测量精度



太阳辐射磁对流过程
(数值模拟、强度)

太阳辐射磁对流过程
(数值模拟、磁场)

FMG高精度偏振测量带来的技术挑战

短曝光、快速交替采样、多帧叠加

- **挑战一：**太阳磁场望远镜成熟的器件，KD*P晶体不可用
 - 无法实现千伏高压毫秒级调制
 - 液晶器件
 - 低压（十伏左右）、十毫秒级调制速度
 - 国际无货架产品、国际合作研制半途而废、国内无空间经验
- **挑战二：**大面阵高帧频空间用探测器
 - 4K*4K级高帧频CCD无国际渠道、国内无研制能力
 - CMOS器件，国内处于新研阶段。
- **挑战三：**海量数据星上实时处理

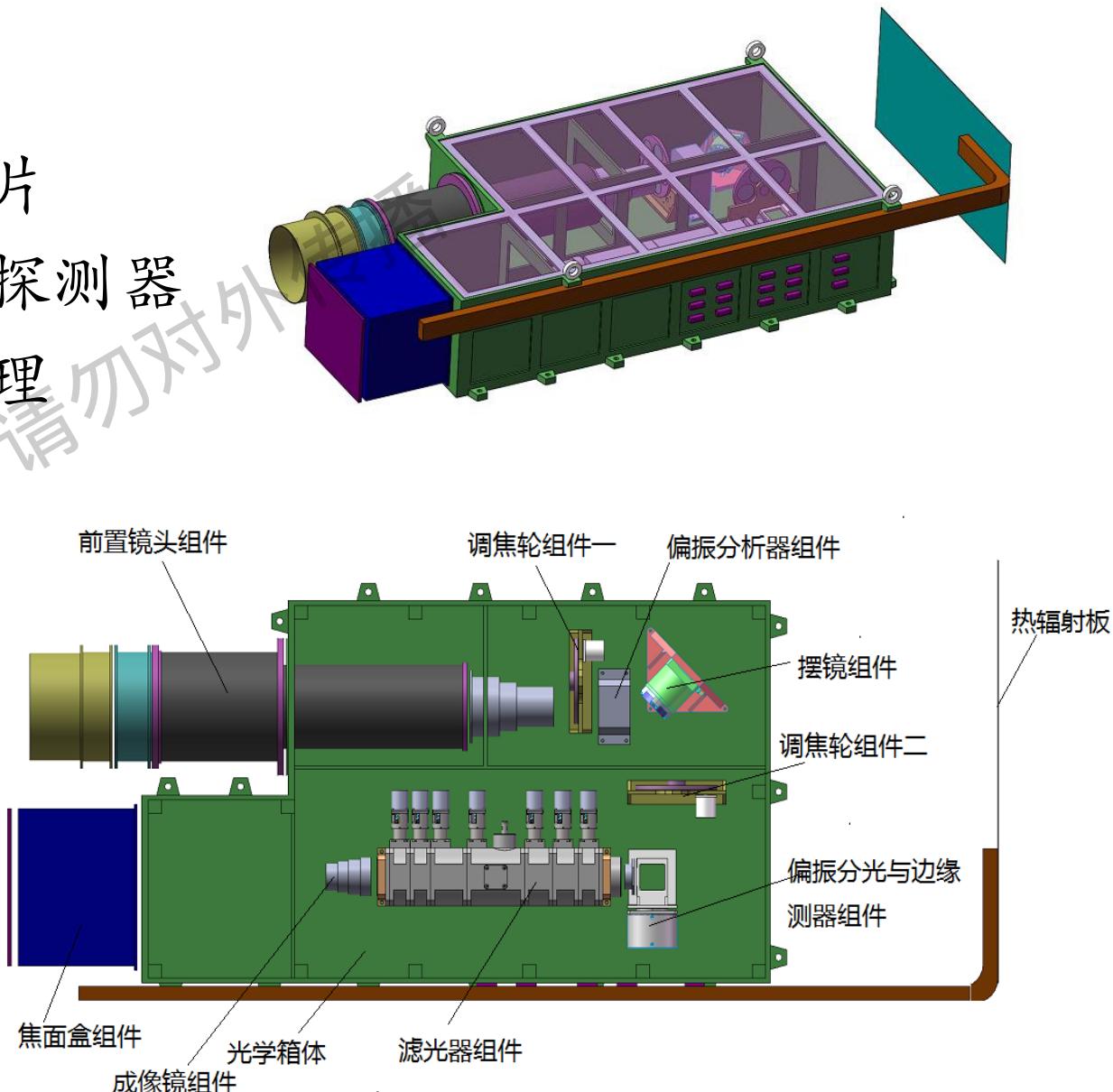
FMG技术挑战

非共性技术：

- **挑战一：**空间用高性能液晶波片
- **挑战二：**大面阵高帧频空间用探测器
- **挑战三：**海量数据星上实时处理
- **挑战四：**油浸动密封
- **挑战五：**精密温控

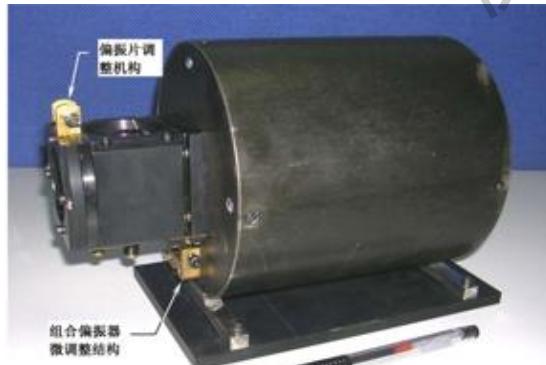
共性技术

- 高精度稳像
- 强光场景的入射窗
- 多部件精确同步控制

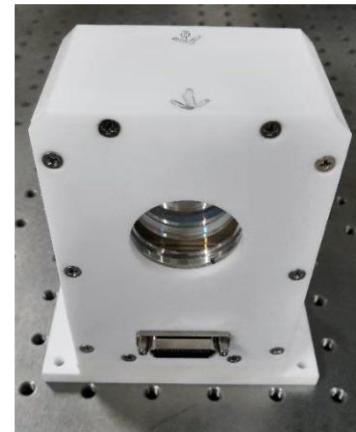


技术进展一：基于液晶调制的偏振分析器

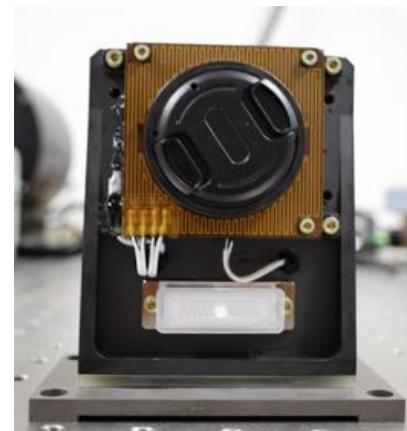
- 1998年：液晶延迟性能研究（进口铁电液晶）
- 2003-2006年：近红外偏振分析器研制（进口LCVR）
- 2014-2016年：Ha液晶滤光器空间化（进口LCVR）
- 2017-2022年 ASO-S／FMG：液晶偏振分析器攻关、研制（国产LCVR）
- 2018-2020年：Ha液晶滤光器原理样机及试观测（国产LCVR）
- 2020-2022年：LCVR空间化及精密驱动控制系统（电控系统）
- 2021-至今：光球、色球液晶滤光器研制（应用研究）



2005 第一台近红外LCVR偏振分析器



2018 FMG样机



2020 FMG正样

- 与合作单位一起
 - 形成从元器件生产
 - 控制器研制
 - 性能测试评估
 - 空间环境适应性完整链条
- 实现LCVR研制自主可控
- 是国际上第二家掌握该项技术的团队
 - 第一个为2020年发射的欧洲Solar Orbiter/PHI团队

2021/6/17-2021/6/26 光强法测量液晶稳定性

- (1) 同时测量7个液晶波片，每个波片之间放置偏振片
- (2) 每天重复测量6组，间隔10分钟
- (3) 驱动电压0-0.1-10v变化，不测量时所有电压放置在0v
- (4) Meadowlark控制器
- (5) 恒温42度

张志勇 博士论文 2006

Junfeng Hou, et al. Chin. Phys. B, 2020,29(7)

Junfeng Hou, et al. Chin. Phys. B, 2020,29(12)

王刚, 侯俊峰*等. 光学精密工程, 2020, 28(4)

王刚 博士论文 2020

侯俊峰等. 航天器环境工程, 2021, 38(3)

黄威, 侯俊峰*等. 中国激光, 2022, 49(17)

黄威 博士论文 2022

技术进展二：大面阵、高帧频、空间用探测器

- FMG独特的观测模式对CIS器件的面阵、帧频、量子效率等指标提出了较高的要求
- 高性能的CIS探测器一直是国外禁运的高技术元器件，从国外采购不可能
- 采用国产大面阵CMOS探测器的技术方案
- CMOS器件特性与传统CCD差异大，空间化设计、定标分析都是新课题
- 以长光辰芯KP1010传感器为核心器件研制焦面成像组件电子学系统
 - 实现CIS芯片的工作参数控制
 - 实现探测器输出图像数据的数字Binning功能、温度监测、芯片关键电压的电流监测以及数据传输功能
- 首次尝试采用CMOS探测器开展太阳磁场测量

- 探测器驱动：保证高灵敏度、大靶面探测器准确高效工作
 - 长光辰芯公司的KP1010传感器
 - 该器件为首飞器件
 - 也是国内首次采用CMOS器件开展太阳磁场测量
- 保证信号精确同步
 - 交替采样→探测器曝光与偏振分析器调制必须精确同步
- 高速数传电路设计：保证10帧/秒的数据同步采集、传输能力
 - 常规的LVDS等星上数传设计不能满足要求
 - 采用高速串行信号SERDES（2711）接口

功能/需求	指标要求
探测器面阵	$\geq 4096 \times 4096$
探测器帧频	≥ 10 帧/秒
探测器不均匀性	<3%
满阱	≥ 40 Ke
读出噪声	<30个电子（Binning后）
量子效率	$\geq 40\%$ （可见光5324）
快门方式	具备全局快门
曝光同步信号	具备曝光同步输出脉冲信号

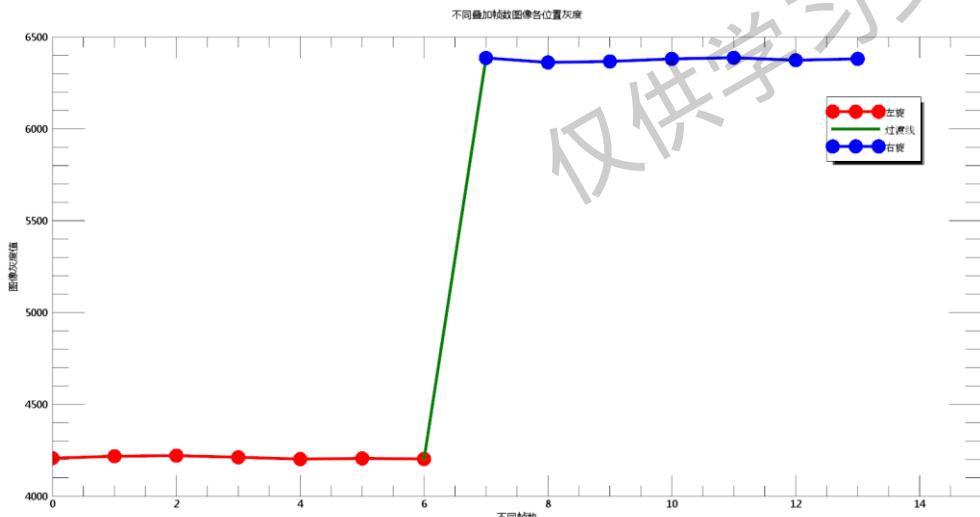
技术进展三：海量数据星上实时采集处理

三大任务

- 相机数据采集与偏振分析器调制精确同步
- 偏振分析器精密温控、精确相位控制。
- 准确交替采样、多帧图像实时叠加

能力需求

- 数据处理能力不低于16帧/秒
 - 数据率4Gbps
 - 30秒内约300幅图像处理成两幅图像
 - ↙无成熟技术



同步性能测试结果

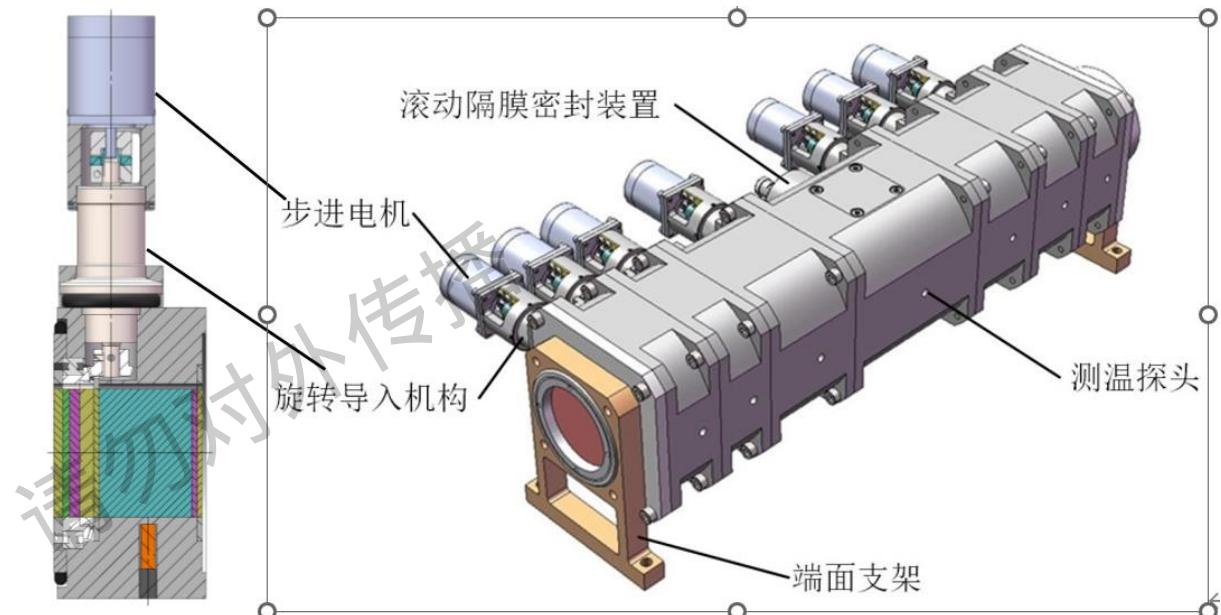
应用前景

- 未来深空探测，海量科学数据预处理
- 其它大型空间设备的星上实时处理

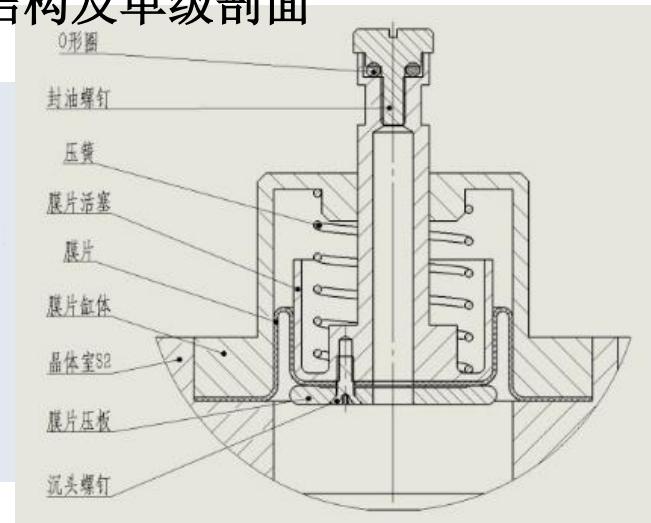
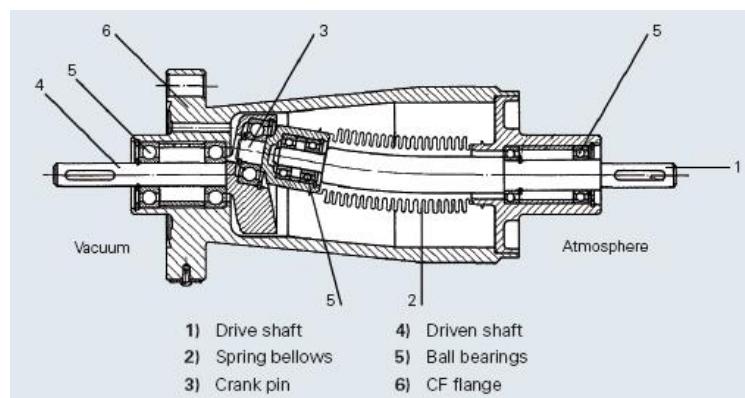
技术进展四：油浸动密封

- 膜片密封装置可以抵消硅油热胀冷缩引起的体积变化而不会产生附加的压力
- 旋转导入机构则可以替代传统的旋转密封结构，避免侧面密封带来的漏油风险

→ 两种技术集成实现滤光器在空间环境下的正常工作



FMG滤光器机械结构及单级剖面



旋转导入机构（左）与膜片密封装置（右）

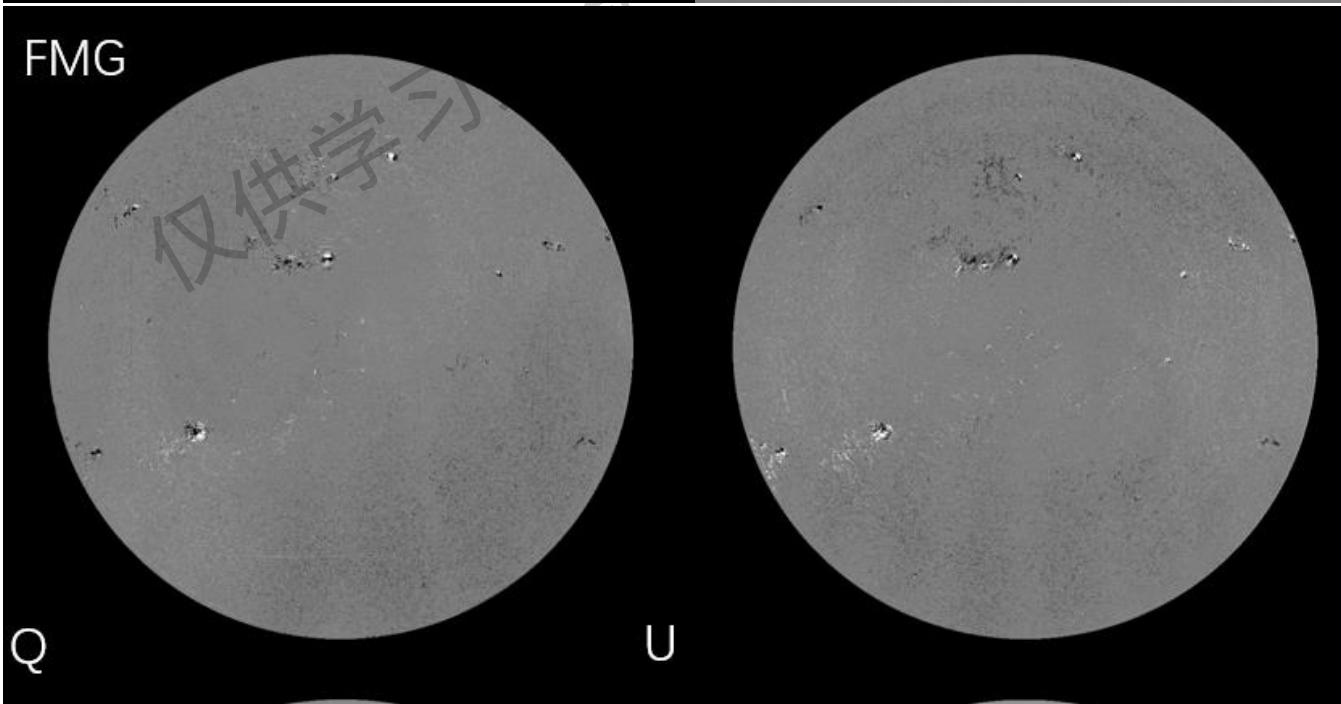
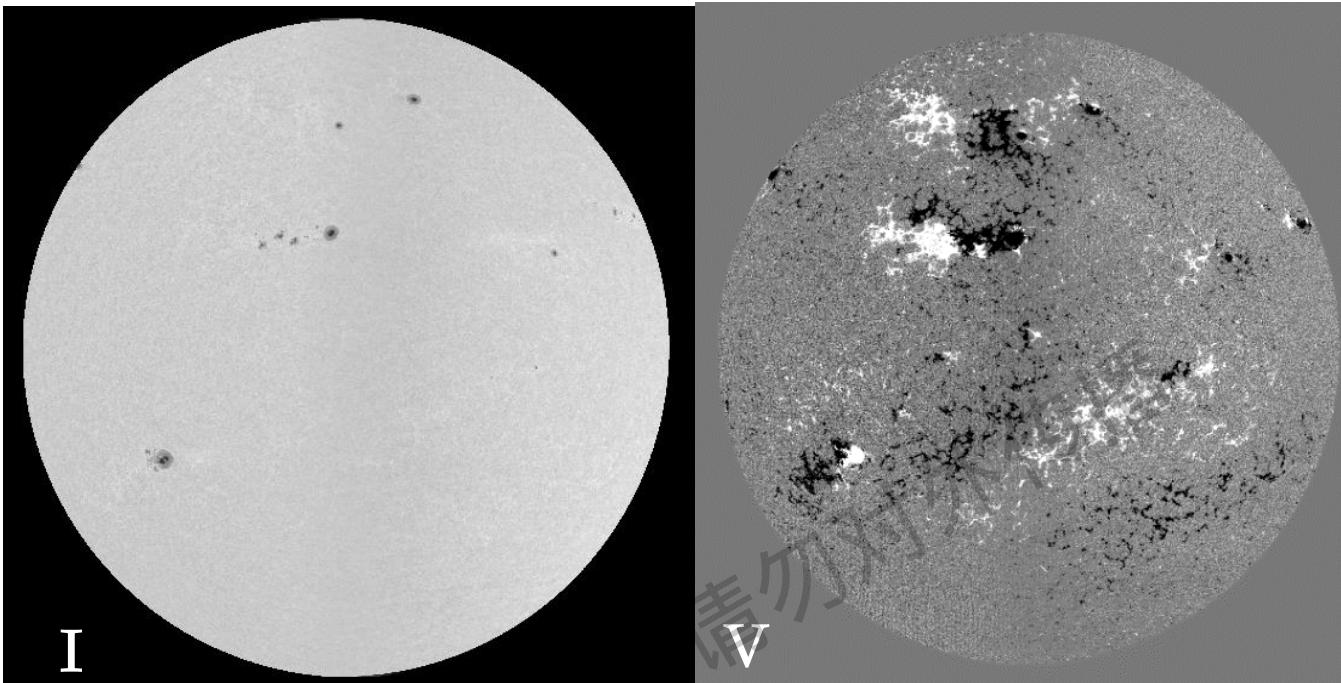
技术进展五：自动波带稳定技术

- 要求通过高精度温度控保持透过带位置稳定
 - 空间应用无成熟经验
- 利用FMG滤光器本身可调谐功能，将精密温控转化为精密测温+实验室温度---延迟曲线定标
 - 测出温度变化值 → 根据曲线确定漂移值
→ 滤光器调谐功能自动补偿漂移
- 国内首次实现

滤光器温度	线心位置 (Å)	采集时间
27	-0.047	10:26
28.5	-0.043	11:40
29.1	-0.042	12:27
27.1	-0.048	10:33
28.4	-0.042	14:00
27.4	-0.057	10:07
29.1	-0.058	11:49
24	-0.043	13:15
24.2	-0.049	13:45
25.4	-0.049	14:40
23.2	-0.045	11:26
23.5	-0.042	12:00

自动波带稳定系统初样测试结果
PV: 0.0016 nm, 满足0.002 nm指标要求

FMG观测实例



Stokes I

怀柔，单色像

FMG与怀柔地基观测比较

与怀柔观测基地全日面磁场望远镜对比

Stokes V/I

怀柔，磁图

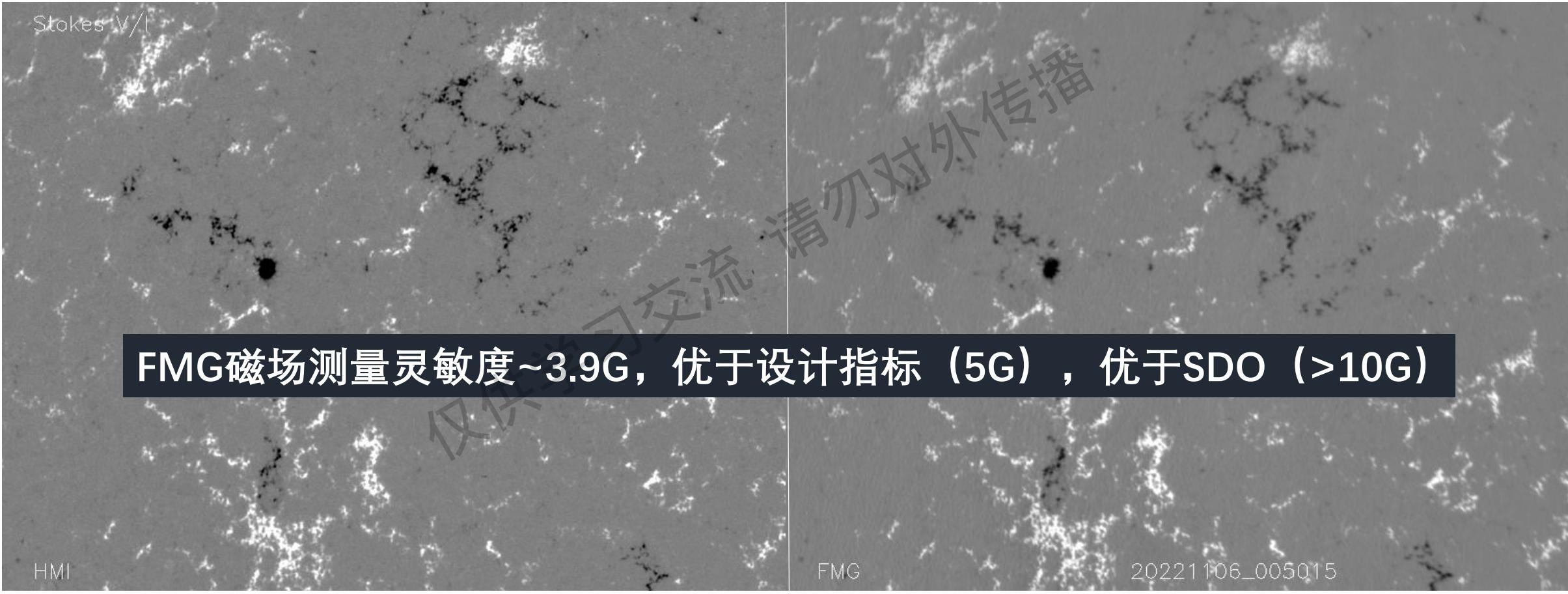
HSOS/SMAT

FMG

20221101_045759

FMG，单色像

与国际最先进的SDO卫星HMI载荷对比



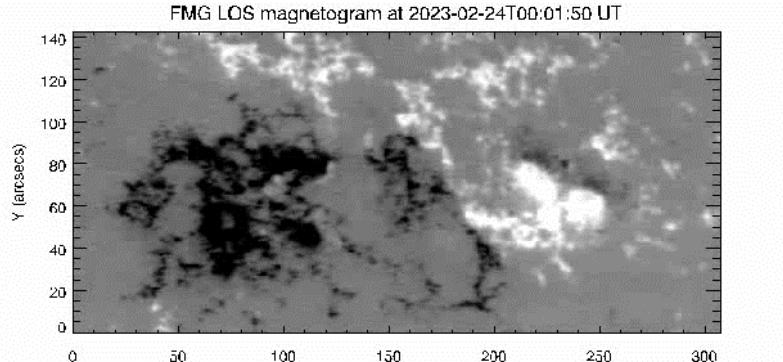
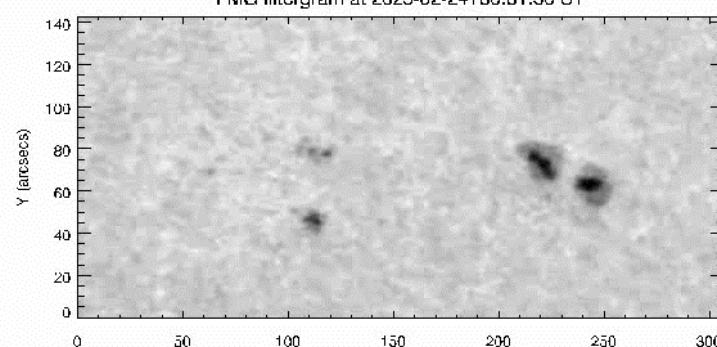
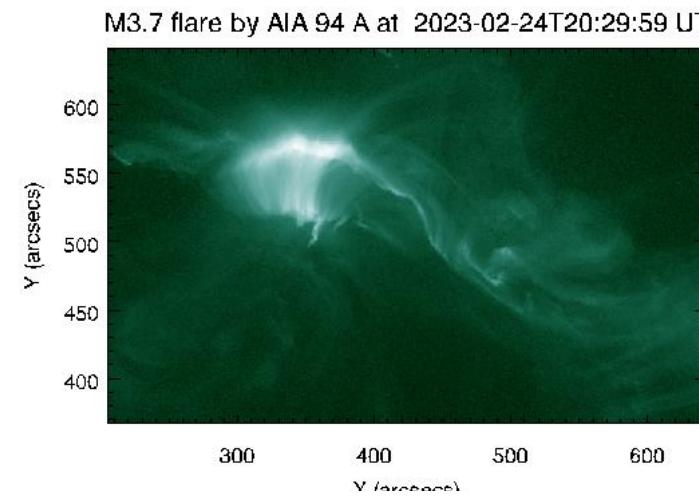
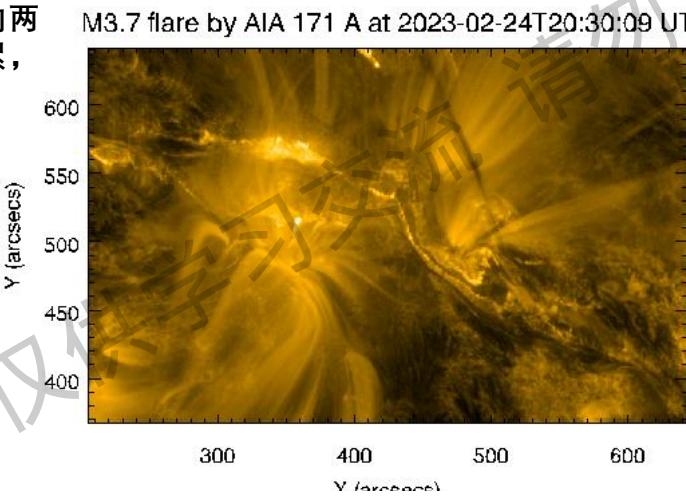
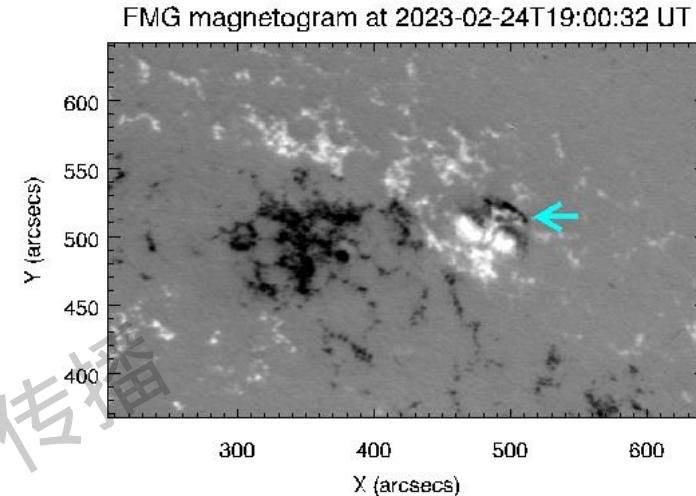
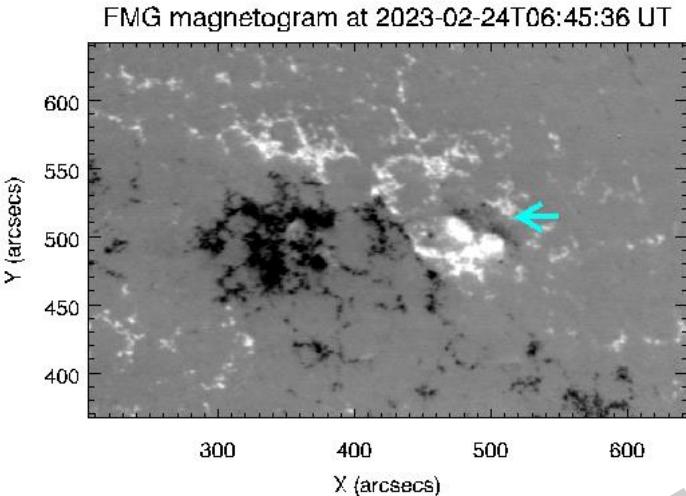
左: HMI磁图

右: FMG 磁图

一个太阳耀斑和日冕物质抛射事件的联合科学数据分析

箭头指示位置显示，新浮现的复杂的混合磁极区向两个正极区域侵入，导致磁场发生强剪切，磁能积累，以及最终的磁对消，磁能释放

该太阳活动是2月27日前后德国北部观测到极光的源头



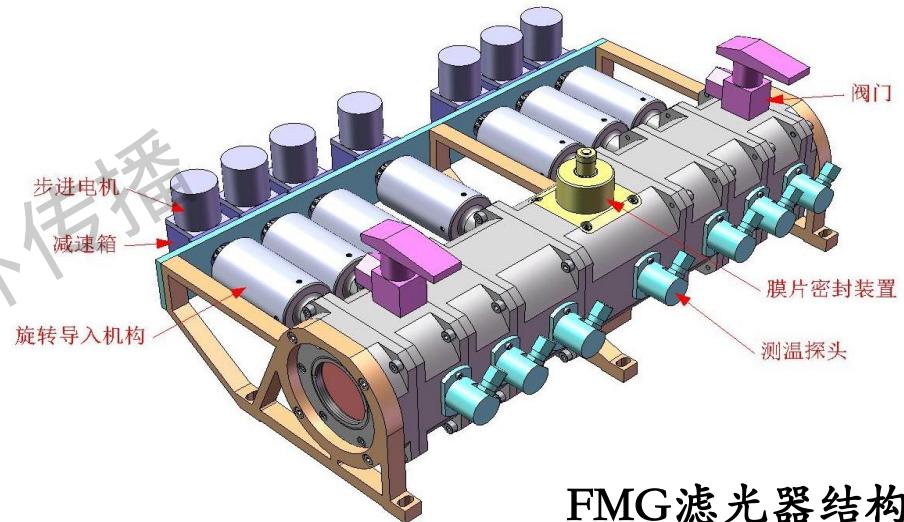
下一步努力方向：液晶双折射滤光器

- 已经实现：液晶偏振分析器
- 正在实现：液晶型双折射滤光器

■ 我国传统优势的双折射滤光器型磁像仪向空基发展的必然之路

- 液晶电光调制 代替 传统机械调制
减小仪器复杂性
提高响应时间
提高仪器可靠性、降低风险

→是未来空基磁场成像仪的必然



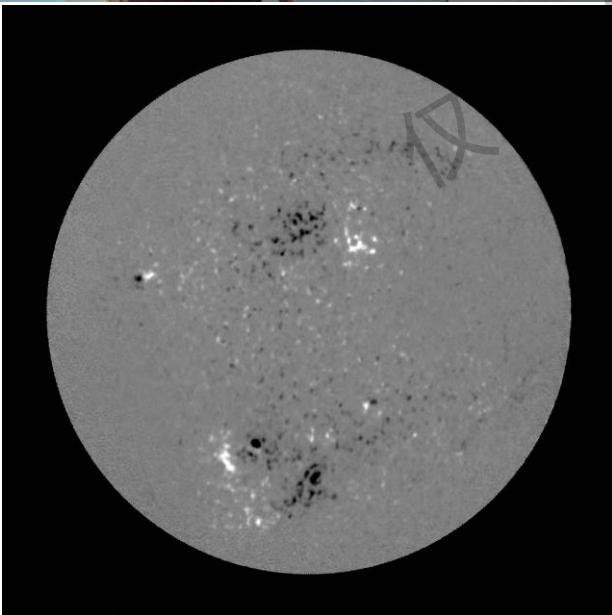
FMG滤光器结构

新近研制成功的液晶型滤光器外形结构

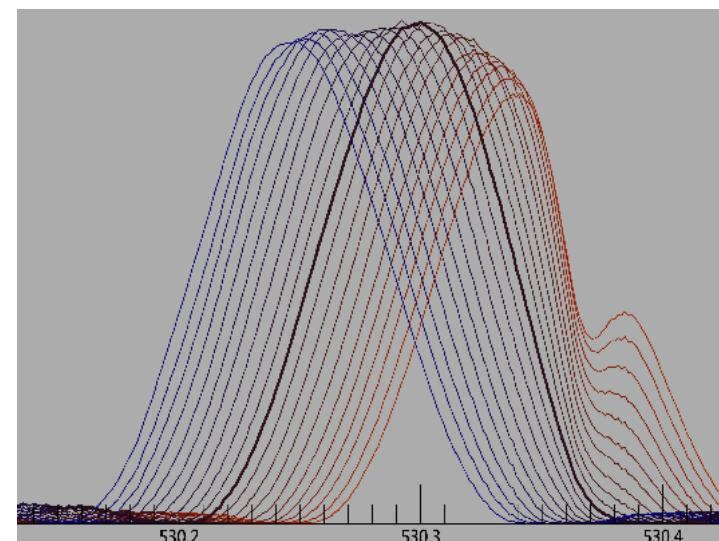
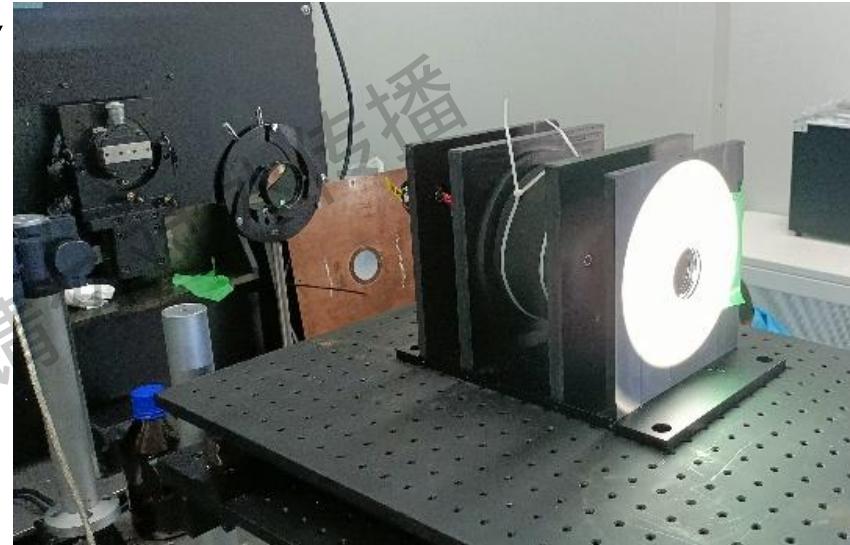


初步成果

2021 “子午二期”光球液晶滤光器



2022 云南天文台JM项目日冕仪液晶滤光器



未来应用

- 多个深空太阳探测项目
 - 小型化、轻量化、高可靠性、长寿命……
 - 太阳极轨探测、环日探测、L5太阳天文台
- 空间天气监测业务卫星





謝謝！

仅供學習交流 請勿外傳