太阳轨道飞行器推断的磁场：SO/PHI-HRT 与 SDO/HMI 的比较

J. Sinjan[1] ✉, D. Calchetti[1], J. Hirzberger[1], F. Kahil[1],G. Valori[1],S.K. Solanki[1],K. Albert[1],N. Albelo Jorge[1],A. Alvarez-Herrero[2], T. Appourchaux[3], L.R. Bellot Rubio[4],J. Blanco Rodríguez[5],A. Feller[1],A. Gandorfer[1],D. Germerott[1], L. Gizon[1,10], J.M. Gómez Cama[7], L. Guerrero[1], P. Gutierrez-Marques[1], M. Kolleck[1],A. Korpi-Lagg[1], H. Michalik[6], A. Moreno Vacas[4],D. Orozco Suárez[4],I. Pérez-Grande[8],E. Sanchis Kilders[5],M. Balaguer Jiménez[4], J. Schou[1], U. Schühle[1],J. Staub[1],H. Strecker[4],J.C. del Toro Iniesta[4],R. Volkmer[9],和 J. Woch[1]

（作者单位可见参考文献之后）

收稿日期：2022年12月XX日；接收日期：2023年3月XX日

arXiv:2303.16771v1 [astro-ph.SR] 29 Mar 2023

摘要

背景。 搭载于太阳轨道飞行器上的偏振与日震成像仪（SO/PHI）的高分辨率望远镜（HRT），以及搭载于太阳动力学天文台（SDO）上的日震与磁成像仪（HMI），均通过偏振光图像推断光球层磁场。SO/PHI是首台离开日地连线的磁像仪，将为观测太阳两极提供前所未有的机会。这为开展新的研究提供了良好契机，即同时使用两台仪器获得的磁场图。目的。 我们旨在比较这两台仪器获得的磁场图，并讨论它们之间可能存在的差异。

方法。 我们使用了两台仪器在太阳轨道飞行器下合期间（2022年3月7日）获得的数据。HRT数据还经过了几何畸变处理，并降至与HMI相同的分辨率。HMI数据则经过重新投影，以校正两个天文台之间的 3° 间隔。

结果。 SO/PHI-HRT与HMI生成的视线方向磁图极为相似，斜率系数为0.97，偏移量小于1高斯，皮尔逊相关系数为0.97。然而，对于最强磁场，SO/PHI-HRT反演出的视线方向磁场较弱。对于矢量磁场，将SO/PHI-HRT分别与720 秒和90 秒HMI矢量磁场进行了比较：SO/PHI-HRT与90秒HMI矢量的配准更为接近。在弱信号区间（< 600高斯），SO/PHI-HRT测得的磁场强度和水平磁场分量高于HMI，这很可能是由于SO/PHI-HRT数据中的噪声更大。在强磁场区间（≳ 600高斯），HRT反演出的磁场强度较低，但倾角（斜率为0.92）和方位角（斜率为1.02）相近。上述斜率值来自与HMI 90秒矢量磁场的比较。文中讨论了SO/PHI-HRT与HMI磁场参数之间差异的可能原因。

关键词。 太阳：光球层、磁场 – 航天器：仪器 - 方法：数据分析

1. 引言

太阳轨道飞行器（参见 Müller 等，2013、2020）于2020年2月10日发射，并于2021年11月进入名义任务阶段。太阳轨道飞行器任务搭载的偏振与日震成像仪（SO/PHI；参见 Solanki 等，2020）通过偏振光图像推断光球层磁场和视线（LoS）速度。该仪器对 Fe i6173 Å 吸收线的五个波长位置以及邻近连续谱中的一个额外位置进行采样，以此完成测量。通过差分成像获取斯托克斯（I、Q、U、V）向量。SO/PHI 配备两台望远镜：高分辨率望远镜（SO/PHI-HRT；Gandorfer 等，2018）和全日面望远镜。本文仅讨论 SO/PHI-HRT 的数据。

太阳轨道飞行器运行在高度椭圆轨道上，部分轨道的近日点距离小至 0.28 天文单位。SO/PHI 是首个离开日地连线的磁力仪。从 2025 年起，在金星引力辅助机动的帮助下，太阳轨道飞行器将达到 33°的日心纬度。

太阳动力学天文台（SDO；见 Pesnell 等，2011）于2010年2月11日发射，并以28°倾角在圆形地球同步轨道上绕地球运行。与太阳轨道器一样，SDO搭载了一台磁像仪：日震和磁成像仪（HMI；Scherrer 等，2012；Schou 等，2012）。HMI自2010年5月1日起一直处于常规科学运行状态。与 SO/PHI 类似，它在六个位置对6173 Å Fe I谱线进行采样，但波长位置略有不同。

SO/PHI-HRT 和 HMI 的相关技术细节见表 1。如表中所示，SO/PHI-HRT 和 HMI 具有一些相同的技术规格：工作波长、孔径直径和板尺度相同。需要注意的是，与 SO/PHI 不同，HMI 配备了两台相同的相机。一台专用于视向观测量——视向磁场（$B_{\rm LOS}$）和视向速度——称为“前置相机”。第二台相机称为“侧置相机”，它与前置相机配合使用，以采集完整斯托克斯矢量，从而反演矢量磁场。

随着 SO/PHI 和 HMI 目前同时运行，它们为结合两台仪器数据开展新的研究提供了极佳机会。例如，现在可以进行立体观测，从而能够从两个不同的视角同时观测太阳表面上的同一特征。这可用于研究太阳黑子的威尔逊凹陷（Romero Avila 等，2023），并检验磁场方位角的消歧技术（Valori 等，2022、2023）。这些以及许多其他应用都建立在这样一个前提之上，即这两台

⋆ 通讯作者：J. Sinjan，电子邮箱：sinjan@mps.mpg.de

表 1. SO/PHI-HRT 和 SDO/HMI 仪器规格。

规格	SO/PHI-HRT	SDO/HMI
工作波长	6173 Å	6173 Å
波长位置	−140, −70, 0, 70, 140, + 或 −300 mÅ	−172, −103, 34, 34, 103, 172 毫埃
视场	0.28° × 0.28°	0.57° × 0.57°
孔径直径	140 mm	140 毫米
光谱轮廓宽度	106 mÅ	76 mÅ
探测器尺寸	2048 × 2048像素	4096 × 4096像素
板尺度	0.5″	0.5″
空间分辨率	203 千米（0.28 天文单位）- 725 千米（1.0 天文单位）	725 千米

仪器对磁矢量的测量非常相似。在本文中，我们检验这一假设，比较 SO/PHI-HRT 和 HMI 推断出的磁场，并试图理解它们之间的相似之处和差异。

第 2 节介绍了本研究所用的两种仪器的数据及其特性。第 3 节给出了本次比较的详细方法。第 4 节讨论了 SO/PHI-HRT 和 HMI 磁场数据产品的比较结果，第 5 节则概述了本研究得出的结论。

2. 数据

本研究使用的数据来自2022年3月7日（见表 2），因此采集于太阳轨道飞行器下合前后——也就是说，当时太阳轨道飞行器位于日地连线上。下合发生于2022年3月7日 09:01:56 UTC（协调世界时）。在下合时，太阳轨道飞行器相对于黄道面的高度为 2.949°，观测期间两艘航天器之间的有效角距离为 3.006° 至 3.024°。在此期间，太阳轨道飞行器距太阳 0.493 至 0.501 天文单位。以该距离观测时，SO/PHI-HRT 在光球层上的标称空间分辨率为 363 千米。在共同视场（FoV）内有一个负极性太阳黑子；从 SO/PHI-HRT 的视角看，它位于日心角 $\mu = \cos\theta = 0.87$ 处。

2.1. SO/PHI-HRT磁场

SO/PHI-HRT 数据的采集旨在支持纳耀斑和活动区 Solar Orbiter观测计划（见 Zouganelis 等（2020））。此次观测活动获取的原始数据被下传至地球，并使用地面数据约化和校准流水线进行了处理（Sinjan 等（2022））。此外，还对数据进行了处理，以去除残余波前误差；这些误差主要源自望远镜的入射窗。为此，使用通过相位多样性分析确定的点扩散函数（PSF）进行了处理（Paxman 等 1992；Löf-dahl 和 Scharmer 1994）。此外，在进行点扩散函数反卷积的同一处理步骤中，还使用仪器理论上的艾里斑进行了卷积。这生成了不含光学像差、对比度更高的数据，并限制了反卷积过程原本会引入的噪声。关于相位多样性分析和 SO/PHI-HRT 点扩散函数的更多信息，请参阅 Kahil 等（2022，2023）。为确定磁场向量，使用 C-MILOS（Orozco Suárez 和 Del Toro Iniesta 2007）在完整向量模式下对辐射转移方程（RTE）进行了反演；该模式假设米尔恩-爱丁顿（ME）大气，并使用经典估计（CE）作为反演的初始条件（Semel 1967；Rees 和 Semel 1979；Landi Degl'Innocenti 和 Landolfi 2004）。出于运行方面的原因，SO/PHI-HRT 的图像稳定系统（ISS）被关闭。本研究使用的 SO/PHI-HRT 视线磁图由通过 RTE 反演获得的矢量磁场生成：$B_{\rm LOS} = B\cos\gamma$，其中 $B_{\rm LOS}$ 是磁场的视线分量，B 是磁场强度，γ 是磁场方向与 LOS 的夹角。

本次观测活动的数据以 60 秒的观测节奏记录。如 Sinjan 等（2022）所示，在此模式下，宁静太阳磁图的噪声为 8.3 高斯（ISS 开启）。未来将利用计划于太阳轨道飞行器下一次下合期间（2023年3月）采集的数据，尝试量化非 ISS 运行对比较结果的影响。

2.2. HMI磁场

HMI 对视线和矢量数据产品分别进行处理，每种产品各有两种观测节奏选项。在本次比较研究中，将全部四种可能的数据产品与 SO/PHI-HRT 进行了比较（见表2）。矢量数据产品由 HMI矢量流水线生成（Hoeksema 等（2014）），而视线产品则由一种类似于太阳和日光层观测台（以下简称 MDI 类算法）上迈克耳孙多普勒成像仪（MDI）所用算法生成（Couvidat 等，2012）。Hoeksema 等（2014）对 HMI 视线数据与 HMI 矢量数据进行了比较，结果显示，与反演结果相比，MDI 类算法会低估强磁场区间的磁场强度（$|B_{\rm LOS}| > 600$高斯）。HMI 的 45 秒和 720 秒视线磁图在盘心附近宁静太阳区域的噪声水平分别为 7 – 9高斯和 3 – 4高斯（Couvidat 等，2016；Liu 等（2012））。

45 秒磁图每隔 45 秒生成一次，方法是对来自一个 270 秒时间间隔内的斯托克斯 $I + V$ 和斯托克斯 $I - V$滤光图进行插值（Liu 等（2012）；Couvidat 等，2016）。自 2016 年 4 月 13 日起，完整斯托克斯矢量以 90 秒的观测节律采集，并经过反演以生成矢量磁场数据产品。通过合并两台相机拍摄的图像，实现了这一观测节律（Liu 等，2016）。为生成 720 秒矢量数据产品，每隔 720 秒进行一次加权时间平均，将 20 多分钟内采集的 90 秒斯托克斯矢量图合并，并使用斯托克斯矢量快速反演（VFISV）ME代码进行反演（Hoeksema 等（2014）；Borrero 等，2011）。第 3 节将介绍我们如何处理时间间隔和光行时的差异，以确保比较的是同时观测。

表2。 所用 SO/PHI-HRT 和 HMI 数据的观测详情。

	SO/PHI-HRT			SDO/HMI	
开始时间	2022-03-07 00:00:09 协调世界时			2022-03-07 00:00:00 TAI	
结束时间	2022-03-07 01:06:09 UTC			2022-03-07 01:12:00 TAI	
距离	0.493 – 0.501 天文单位			0.992 天文单位	
ISS 模式	Off			On	
处理	地面			地面	
RTE 模式	C-MILOS：CE+RTE			VFISV	
	向量	视线		向量	
观测节律	60 s	45 s	720 秒	90 s	720 秒
数据集数量	56	56	7	38	7

3. 方法

我们以逐像素方式比较了由 SO/PHI-HRT 和 HMI 推断出的磁场。HMI 数据已针对相机范围内的几何畸变进行校正（Hoeksema 等（2014）），SO/PHI-HRT 数据则使用一种初步畸变模型进行校正，该模型根据发射前的校准数据得出。我们下面介绍的方法已应用于各项数据产品的每一次比较。这里以一对视线磁图为例：首先选取一幅 SO/PHI-HRT 60 秒磁图，并找到时间上最接近的 HMI 45 秒磁图（见图 1 上方各面板）。具体做法是比较观测的平均时间，同时考虑太阳轨道飞行器和 SDO 距离太阳的差异及由此产生的光行时差异，以及国际原子时（TAI）与协调世界时（UTC）之间的差异。其次，使用世界坐标系（WCS）信息，将 HMI 视场中两台望远镜共有的子区域（图 1 中以黄色标出）通过 DeForest（2004）算法重新投影到 SO/PHI-HRT 的探测器参考系中（Thompson（2006））。

接下来，使用线性插值对 SO/PHI-HRT 数据进行重采样，以匹配 HMI 数据低两倍的空间分辨率（观测时 SO/PHI-HRT 与太阳的距离是 HMI 的一半）。采用箱式分箱或三次插值对比较结果没有显著影响。由于 SO/PHI-HRT 和 HMI 的孔径直径相同，它们的点扩散函数相似。不过，对 SO/PHI-HRT 进行重采样会改变有效点扩散函数。这种影响留待未来研究。使用对数极坐标变换（例如参见 Sarvaiya 等（2009））测得 SO/PHI-HRT 像平面法线方向上的残余旋转和平移，并进行了校正。图 1 下方各面板展示了校正结果。这些校正是由于 WCS 信息不准确所致。对每幅 SO/PHI-HRT 磁图都重复了这一过程。

最后，在进行比较之前，将磁图四周各裁去 100 个像素，如图 1 下方各图中橙色轮廓所示。这是因为 SO/PHI-HRT 的视场光阑（图 1 中的黑色区域）以及用于校正残余波前误差的处理步骤。在此过程中，为确保周期性边界，会在进行傅里叶变换之前对图像进行渐晕处理，四周各 100 个像素因此受到影响。因此，在与 HMI 进行比较时必须排除这些区域。

为与 HMI 720 秒数据产品进行比较，采用了一个 SO/PHI-HRT 数据集，即与 HMI 720 秒数据集平均时间最接近的那个。此次比较针对视线方向磁场分量B_{LOS}、磁场强度 $|\boldsymbol{B}|$、倾角 γ 和方位角 ϕ 进行。方位角的比较还进行了额外处理：HMI 和 SO/PHI-HRT 均将方位角定义为从y轴正方向起逆时针测量（Sinjan 等（2022））。重新投影 HMI 后，为确保两个数据集使用相同的方位角定义，特别考虑了各航天器的滚转角。

4. SO/PHI-HRT 与 HMI 磁场观测的比较

4.1. SO/PHI-HRT 与 HMI 视线磁图的比较

这里特此说明，当讨论 HMI 的视线磁图时，我们指的是使用类 MDI 算法导出的视向磁场，记作 B_{LOS}。然而，本文所示 SO/PHI-HRT 的磁图是全矢量磁场的视线分量（通过 RTE 反演确定）；我们将其记作 ME-B_{LOS}。

比较 SO/PHI-HRT 60 秒磁图与 HMI 720 秒磁图的散点图如图 2a 所示，其中点的对数密度以颜色表示。该图展示了七对磁图；每幅 SO/PHI-HRT 60 秒磁图均记录于与之比较的 HMI 720 秒磁图记录时间区间的中点。黑色实线是对该分布进行线性拟合的结果，它取两次线性拟合的平均值：一次为 HMI 相对于 SO/PHI-HRT 的拟合，另一次为 SO/PHI-HRT 相对于 HMI 的拟合。这种平均处理消除了统计偏差。正如拟合结果所示，两台望远镜之间具有极好的一致性，斜率为 0.97，偏移量为 0.83 高斯。该偏移量可能是由于负极性的极强磁场多于正极性磁场所造成的假象。通过直方图分析可以确定 SO/PHI-HRT 推断出的弱磁场偏移量：Sinjan 等（2022）证明，宁静太阳中的 SO/PHI-HRT B_{LOS} 分布以接近零的位置为中心，偏移量为 −0.18 高斯。皮尔逊相关系数为 0.97。本文所呈现的所有比较量的线性拟合、斜率和偏移量的绝对误差，以及皮尔逊相关系数（cc）均列于表3中。对于图 2，斜率和偏移量的误差可以忽略不计。

不过，对于最强磁场，两者存在差异。我们选取了 HMI 720 秒 $B_{\mathrm{LOS}} < -1300$G 的像素；此处 SO/PHI-HRT 与 HMI 之间开始出现明显分歧。相对于 HMI 的（负）值，两者的平均差值为 $+149 \pm 2$G，对应 9%

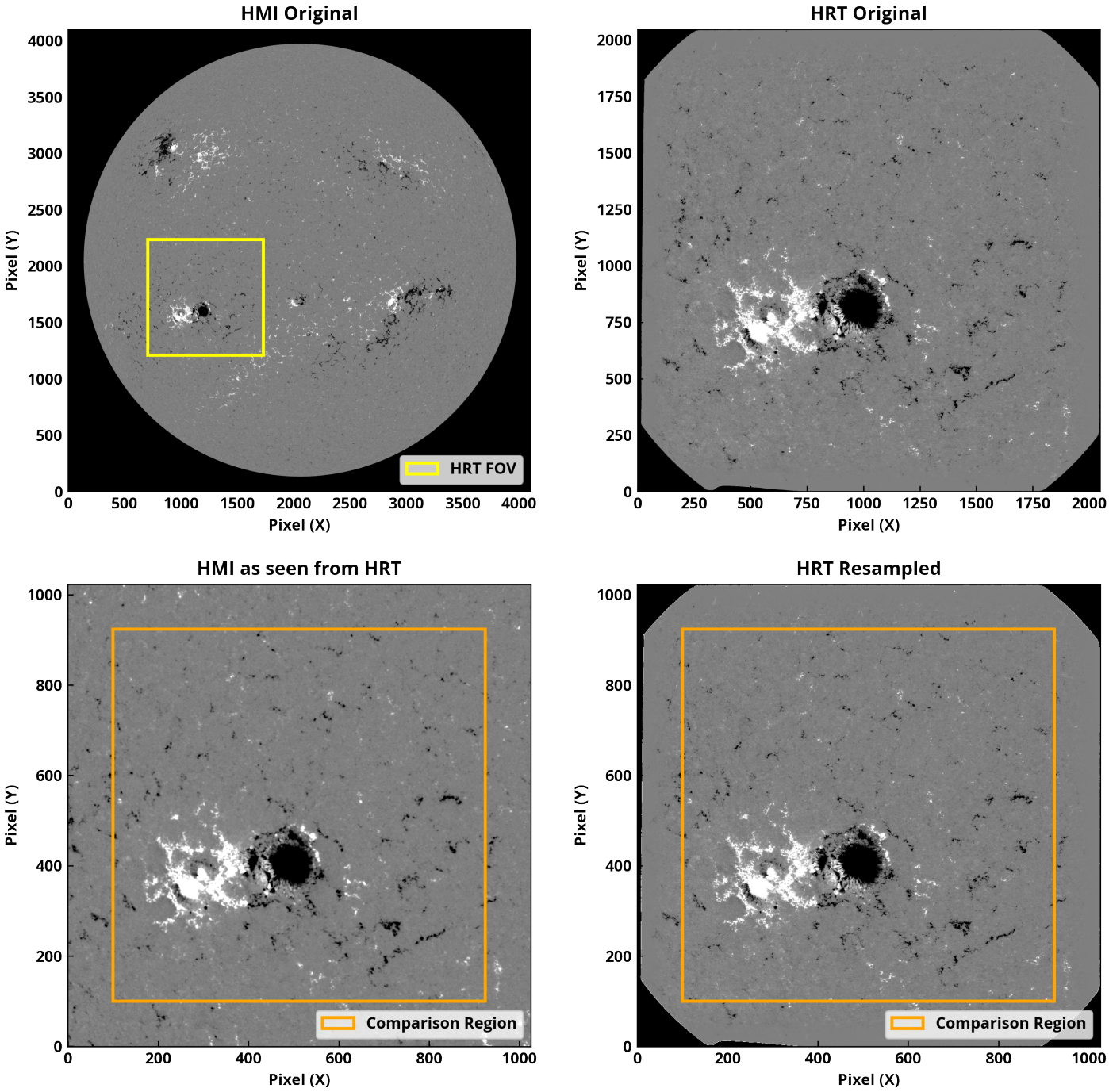


图1。 2022年3月7日HMI和SO/PHI-HRT的磁图。左上：00:01:30国际原子时的HMI 45秒视线磁图，黄色区域显示SO/PHI-HRT的视场。为清晰起见，太阳圆面外的像素设为黑色。右上：00:00:09协调世界时的SO/PHI-HRT 60秒磁图。为清晰起见，视场光阑外的像素设为黑色。左下：取自左上面板HMI磁图的子区域，该区域已重新投影到SO/PHI-HRT参考系中。右下：重采样至HMI分辨率的SO/PHI-HRT磁图。橙色方框勾勒出用于比较的区域。所有磁图均饱和至 ±200高斯。

与 HMI 相比，较弱的视线磁场。这里的误差表示平均值的标准误；绝对差值分布的离散度（1σ）为 197G。像素筛选阈值（HMI 720 秒 $B_{\rm LOS} < -1300$G）对应于视场中仅位于前导太阳黑子内的像素，其中 81 % 位于本影，剩余 19 % 位于半影。本影和半影的分类依据 SO/PHI-HRT 连续谱强度 I_c 上的 $I_c < 0.55$ 和 $0.55 I_c < 0.95$ 阈值确定；这些阈值与 Dalda 中使用的相同

（2017年），其中比较了 HMI 与 Hinode/SP 之间的磁场。还需注意，图 2 中的分布在不同极性的磁场之间并不对称。这是因为在共同视场内，HMI 未观测到超过 1350 高斯的强磁场，而 SO/PHI-HRT 推断的磁场最高可达 1500 高斯。在类似条件下，我们预计，两台望远镜在正极性强磁场区间的比较结果会与负极性强磁场区间的结果相似，即 SO/PHI-HRT 测得的视线方向磁场分量低于 HMI。

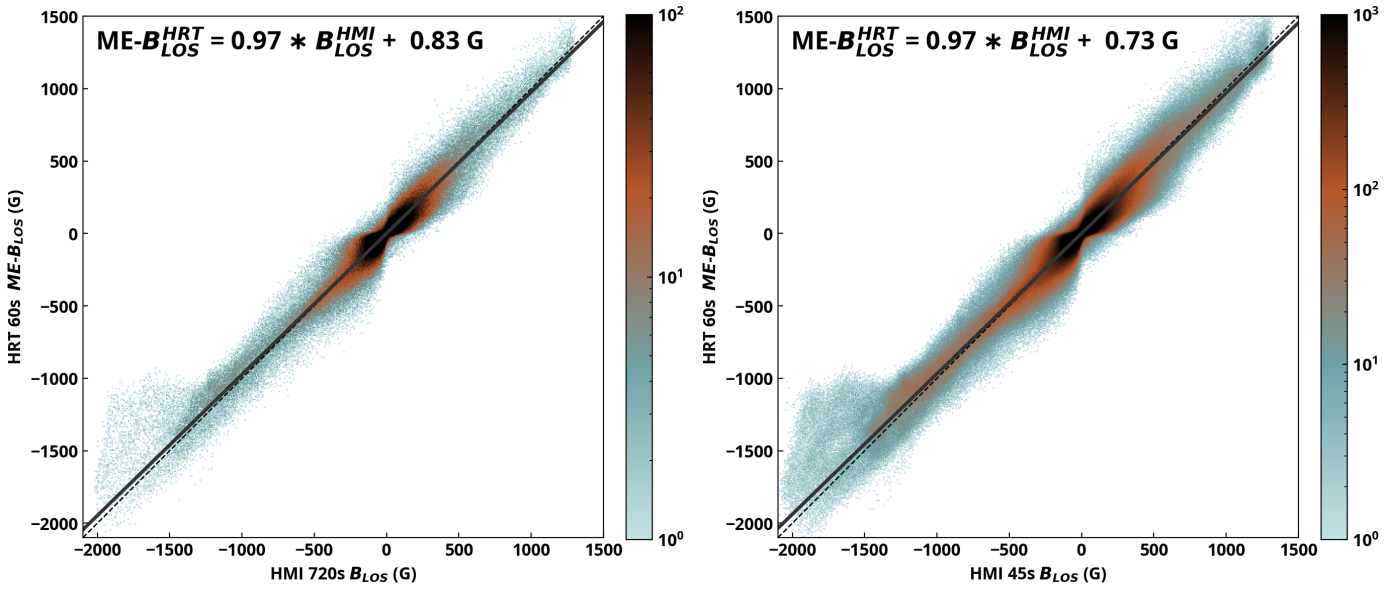


图 2. SO/PHI-HRT 60 秒 ME-$B_{\rm LOS}$ 与 HMI $B_{\rm LOS}$成对比较的散点图。图中显示像素的对数密度；为便于观察，每个绘图点的密度分别在 100（a）和 1000（b）个像素处饱和。实线灰线表示平均线性拟合（HMI 对 SO/PHI-HRT 以及 SO/PHI-HRT 对 HMI），黑色虚线表示一一对应关系。面板（a）：七组 HMI 720 秒磁图。面板（b）：56 组 HMI 45 秒磁图。详细说明请参见正文。

与 HMI 45 秒磁图的比较（图 2b）共比较了 56 对数据，结果显示两者非常相似。这是预期之中的，因为 HMI 的 45 秒和 720 秒磁图经过了良好的交叉校准（Liu 等（2012））。对于 HMI 45 秒磁图中满足 $B_{\rm LOS} < -1300$G 的像素，相对于 HMI 的（负）值，平均差异也相近，为 +155.5±0.9G；这同样对应于在该区间内 SO/PHI-HRT 推断的视线方向磁场弱 9%。

在图 2a 和 2b 中，绘出了所有像素，包括信号低于噪声水平的像素。两个面板的原点周围均呈现沙漏形状。这可能是由于各组磁图之间配准不匹配所致。如第 3 节所述，我们仅应用了一个初步模型来校正 SO/PHI-HRT 中的几何畸变，这或许可以解释配准不准确的原因。

有几种效应可以解释 SO/PHI-HRT 与 HMI 在最强磁场区域的差异。首先，两台仪器采用不同的方法推断视线磁场：HMI 使用 MDI 类公式，而 SO/PHI-HRT 使用辐射传输代码。此外，两台仪器在不同位置采样 Fe I 谱线，且 SO/PHI-HRT 在更靠近连续谱处观测（距谱线线心 ±300 mÅ，而 HMI 为 ±172mÅ）。对于最强磁场，巨大的塞曼分裂使两台仪器从真实的斯托克斯信号中获取了不同的信息，随后反演程序对这些信息的解读也有所不同。对这些效应进行详细研究超出了本文的范围。此外，光谱轮廓宽度也不相同：SO/PHI-HRT 的半高全宽（FWHM）为 106 mÅ，而 HMI 的半高全宽为 76 mÅ。杂散光也可能有所影响，尤其是本影中的像素，因为 HMI 和 SO/PHI-HRT 在其标准数据处理流程中均未进行杂散光校正。

最后，已知 HMI 的磁场观测量存在 24 小时周期性（Liu 等（2012）；Hoeksema 等（2014）；Couvidat 等（2016）），这是由 SDO 轨道导致的。相对于太阳的速度以 ±3.5km/s 的幅度呈 24 小时周期振荡，同时还会因地球轨道产生每秒数百米的进一步变化。本研究所考虑数据中的 SDO 太阳径向速度从 3.249km/s 开始，最终为 3.291;m/s。Couvidat 等（2016）表明，使用类 MDI 算法计算的本影中的 $B_{\rm LOS}$ 会随速度大小呈二次变化。当 SDO 的径向速度接近 ±3km/s 时，存在介于 +50高斯和 +100高斯之间的残差。该残差是移除长期变化（≥ 2天）后的数值。它解释了强信号区中观测差异的大约一半。尽管尚不能确定，但一种合理的解释是：结合不同波长采样、不同反演代码以及杂散光的影响后，这些因素能够解释所观测到的差异。

4.2. SO/PHI-HRT 与 HMI 矢量磁场的比较

这里我们比较 SO/PHI-HRT 和 HMI 的矢量磁场，两者均通过对斯托克斯矢量进行 RTE 反演得出，但使用了不同的反演代码。我们想强调第2节提到的 SO/PHI-HRT 与 HMI 之间的 3° 角距离。它不会影响 |**B**|；根据对 SO/PHI-HRT 数据进行的简单旋转测试，我们估计它不会显著影响磁场倾角或方位角，但会使方位角产生几度的偏移。

首先，我们比较了磁场强度 |**B**|，如图3上排所示。SO/PHI-HRT 和 HMI 在辐射传输方程反演中均假设磁充填因子为1，因此磁场强度是像素内的平均值。因此，我们不区分磁场强度与磁通量密度，尽管文献中有时会作此区分。图3a展示了 SO/PHI-HRT 与 HMI 720 秒|**B**| 的比较，图3b则展示了与 HMI 90 秒 |**B**| 的比较。图3a和3b中的斜率分别为0.84和0.89。90 秒比较的斜率较高，是因为其方差比 HMI 720 秒数据的方差更接近 SO/PHI-HRT 数据的方差。磁

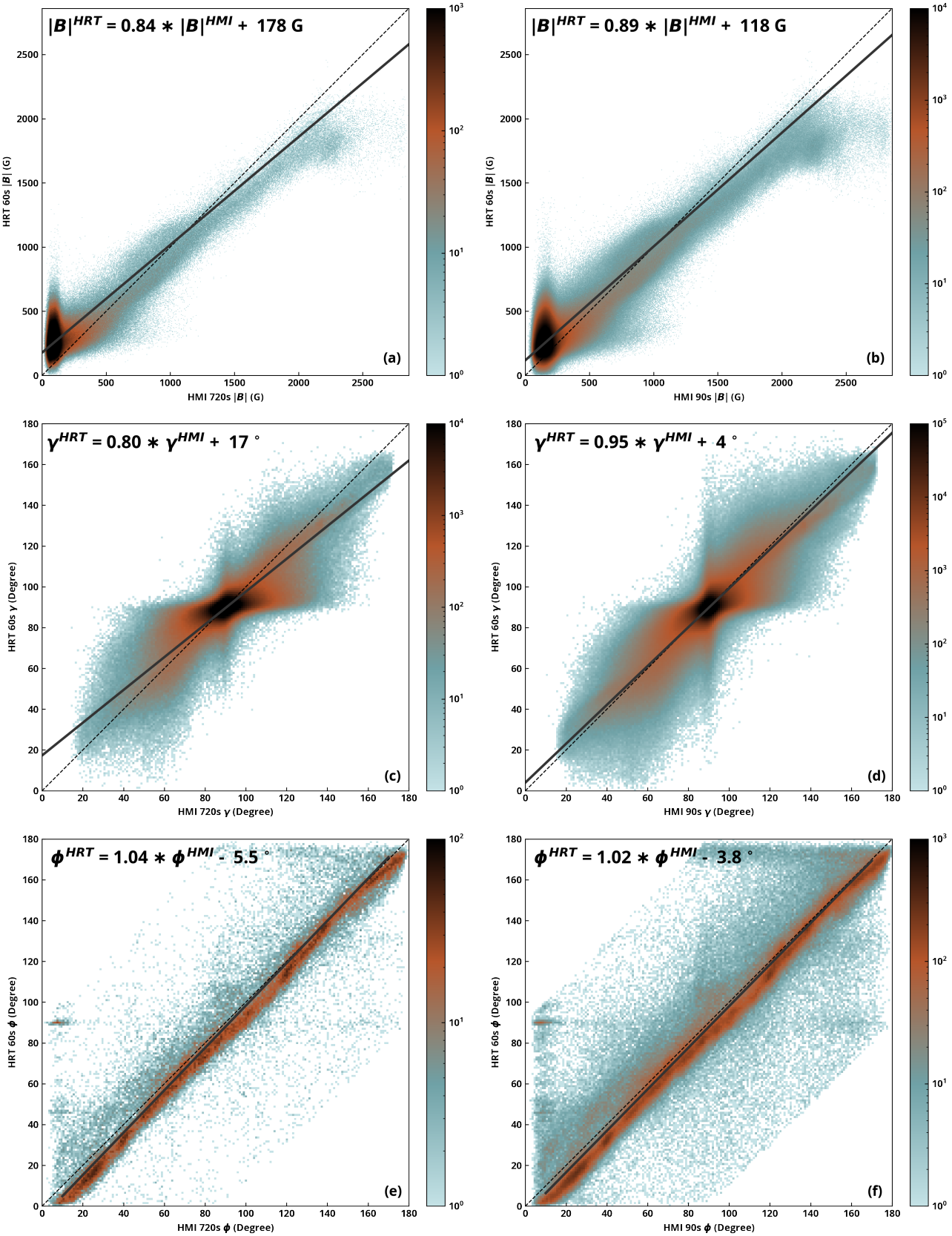


图3。 比较 SO/PHI-HRT 与 HMI 矢量磁场图的散点图。第一列比较七组 SO/PHI-HRT 60 秒数据集与 HMI 720 秒数据集的反演结果，第二列则比较 38 组 SO/PHI-HRT 60 秒数据集与 HMI 90 秒数据集的反演结果。像素的对数密度以颜色刻度表示，为了清晰起见进行了饱和处理。平均线性拟合和 $y = x$ 分别以灰色实线和黑色虚线表示。面板 (a) 和 (b)：磁场强度。面板 (c) 和 (d)：磁场倾角（相对于视线）。面板 (e) 和 (f)：磁场方位角。 $|\phi_{\rm HMI} - \phi_{\rm HRT}| > 90°$ 且 $|\mathbf{B}|_{HRT} < 600$高斯的像素已省略，且未纳入拟合。

这两种仪器测得的磁场强度的相关系数分别为 0.85 和 0.84，对应 720 秒和 90 秒的$|\mathbf{B}|^{HMI}$。

我们在此观察到，在较弱磁场区间，SO/PHI-HRT 推断出的磁场更强。根据 Liu 等（2012），我们任意选取 600 高斯作为界限值，以定义弱信号区间。在此区间内，像素分布密集，在图3a和b中均可见，我们将其称为“热点区”，它显示了两种仪器之间的差异。偏移量主要由这个热点区造成，图3a中的偏移量为178高斯，而图3b中的偏移量较小，为118高斯。偏移量的差异或许反映了 90 秒和 720 秒 $|\mathbf{B}|^{HMI}$之间的噪声差异。与图3a相比，图3b中 HMI 的热点区范围更大，这可能是噪声水平不同所致。Borrero 和 Kobel（2011）证明，反演噪声水平较高的斯托克斯轮廓会得到更强、但倾斜程度更大的磁场。我们注意到，图3c、图3d和图4a中密集磁场的中央斑块更加水平。SO/PHI-HRT 的噪声水平高于 HMI，是由于 ISS 未运行，而且至关重要的是，HMI 数据的平均时间更长。此外，对部分点扩散函数进行反卷积也使 SO/PHI-HRT 数据的噪声增加了 20%（Kahil 等，2023）。因此，SO/PHI-HRT 中原始斯托克斯矢量的噪声水平分别为 1.8×10^{-3}、2.2×10^{-3} 和 1.8×10^{-3}，对应Q/I_c、U/I_c 和 V/I_c；其中I_c 表示连续谱中的斯托克斯I。相比之下，HMI 720 秒斯托克斯矢量中Q/I_c、U/I_c 和V/I_c的噪声为 9×10^{-4}（Couvidat 等，2016）。然而，文献中尚未量化 90 秒斯托克斯矢量的噪声，因为这并非标准数据产品。

现在我们转向图3a和b中的强信号区。对于 HMI 和 SO/PHI-HRT，在约为 $|\mathbf{B}| > 1300$ G 时，分布开始偏离$y = x$ 线。对于 HMI 中磁场强度高于该值的像素，SO/PHI-HRT 推断出的磁场强度较低。HMI 和 SO/PHI-HRT 中 1300 G 的磁场强度阈值对应的像素中，38.1% 位于本影，61.4% 位于半影，另有 0.5% 位于其他区域。对于 SO/PHI-HRT 或 HMI 中磁场强度高于 1300 G 的情况，相对于 HMI，二者之间的平均差异在 HMI 720 秒和 90 秒的比较中分别为 -247 ± 1 G 和 -246.8 ± 0.4 G（在两种情况下，相对于 HMI 数值均小$\approx$ 13%）平均值的误差为标准误。差异分布的离散程度（1σ）在两种情况下均约为 180 G，凸显了这些分布的宽度较大。虽然我们无法将这些平均差异直接与第4.1节中给出的结果进行比较，因为强磁场线并非都沿视线方向，且我们考虑了半影中的更多像素，但我们仍可定性地推断，就磁场强度而言，HMI 与 SO/PHI-HRT 之间的分离程度更大。需要注意的是，在图2中，我们比较的是由完整向量推导出的 ME-B_{LOS}^{HRT}，而图2中的B_{LOS}^{HMI}则是使用 MDI 类公式计算得到的。在第4.3节中，将比较由完整向量推导出的视线方向分量。

图3第二行比较了由两台仪器推断出的磁矢量相对于视线的倾角 γ。对于 HMI 720 秒和 90 秒的比较，斜率分别为 0.80 和 0.95。SO/PHI-HRT 与 HMI 720 秒和 90 秒磁场倾角之间的相关系数分别为 0.81 和 0.85。显然，两台仪器对磁场极性的判定较为一致（图3c 和 d 的左上及右下象限中点较少）。我们还注意到，HMI 在推断接近倾角时具有稍强的趋势——接近 90° 的倾角（90° 处的垂直条纹比水平条纹更明显）。然而，两台仪器推断的倾角之间最大的差异在于，SO/PHI-HRT 数据得到的水平磁场略多（图3c 和 d 中黑色实线的斜率小于 1）。图3d 中的一致性更高，斜率为 0.95，因为 HMI 90 秒数据的方差更接近 SO/PHI-HRT 的方差。图3c 和 d 中显示的偏移量在此并不重要，因为对称点位于 $(90^\circ, 90^\circ)$。平均线性拟合穿过 $(90^\circ, 90^\circ)$，在图3c 和 d 中的偏移量均小于半度。根据前文提到的对 SO/PHI-HRT 数据进行的简单旋转测试，SO/PHI-HRT 与 HMI 之间的 3° 角距离可能会引入 $< 1^\circ$ 的偏移量。此外，散布的一小部分——即各点与最佳拟合线之间的距离——很可能是由 3° 的观测方向差异造成的。

图4比较了弱磁场和强磁场情况下的倾角。图4a显示满足 $|\mathbf{B}|_{\rm HRT} < 600$高斯或 $|\mathbf{B}|_{\rm HMI} < 600$高斯的像素，而图4b显示满足$|\mathbf{B}|_{\rm HRT} > 600$高斯且 $|\mathbf{B}|_{\rm HMI} > 600$高斯的像素。与图4a中0.80的相关系数相比，图4b中的点分布更接近最佳拟合线，相关系数为0.98。不过，图4b中的斜率略低于图4a中的斜率。

图3最下排展示了方位角 ϕ的比较。此次比较仅选取视场内前导太阳黑子及其周围、满足$B_{\rm HRT} > 600$高斯的像素。此外，线性拟合时未考虑 $|\phi_{\rm HMI} - \phi_{\rm HRT}| > 90°$的像素，因为它们受到方位角固有的180°歧义影响。最后，线性拟合排除了接近0°和180°的区域，以避免产生人为偏移，因为端点不具有周期性。相关系数较高，分别为0.95和0.94（HMI 720 秒和90 秒的比较）。相关性较强的原因之一是，HMI横向磁场不受 12– 或由SDO轨道造成的24小时周期性影响（Hoeksema 等（2014））。如图3e和f所示，斜率分别为1.04和1.02，这意味着SO/PHI-HRT反演得到的方位角略大于HMI的结果。在720 秒的情况下还存在 -5.5° 的负向非均匀偏移量，而在90 秒的情况下该偏移量仅为 -3.8°；这需要进一步研究。这些偏移量的绝对误差为0.7和1.7，相对于计算出的偏移量较大，因为与本文展示的其他比较相比，此处纳入的点较少。如果SO/PHI-HRT和HMI之间的$+y$ 探测器存在配准错误（两者都将$\phi = 0$定义为基准），那么 ϕ_{HMI} 和 ϕ_{HRT} 之间就会存在偏移量。据我们所知，我们已将两者的y 探测器都与太阳北向配准，因此可以排除这是观测到的偏移量的来源。不过，我们的旋转测试还表明，绕垂直于 $+y$ 探测器轴的轴旋转，也可能导致 0°-2°的偏移量。因此，图3所示偏移量的一部分可能源自SO/PHI-HRT与HMI之间的角距离。在该测试中，旋转后的SO/PHI-HRT与原始SO/PHI-HRT之间的线性拟合斜率 ϕ为1.01，变化了1%；这一变化反映在表3中 ϕ 比较的斜率误差中。此外，部分散布也可能是由 3° 角距离造成的。

可能解释磁矢量三个分量中均出现差异的原因，是波长采样和光谱分辨率不同，如第4.1节所述。此外，采用不同的反演流程（对 HMI 数据使用 VFISV，对 SO/PHI-HRT 数据使用 C-MILOS）也必然会导致这两台仪器的结果有所不同。

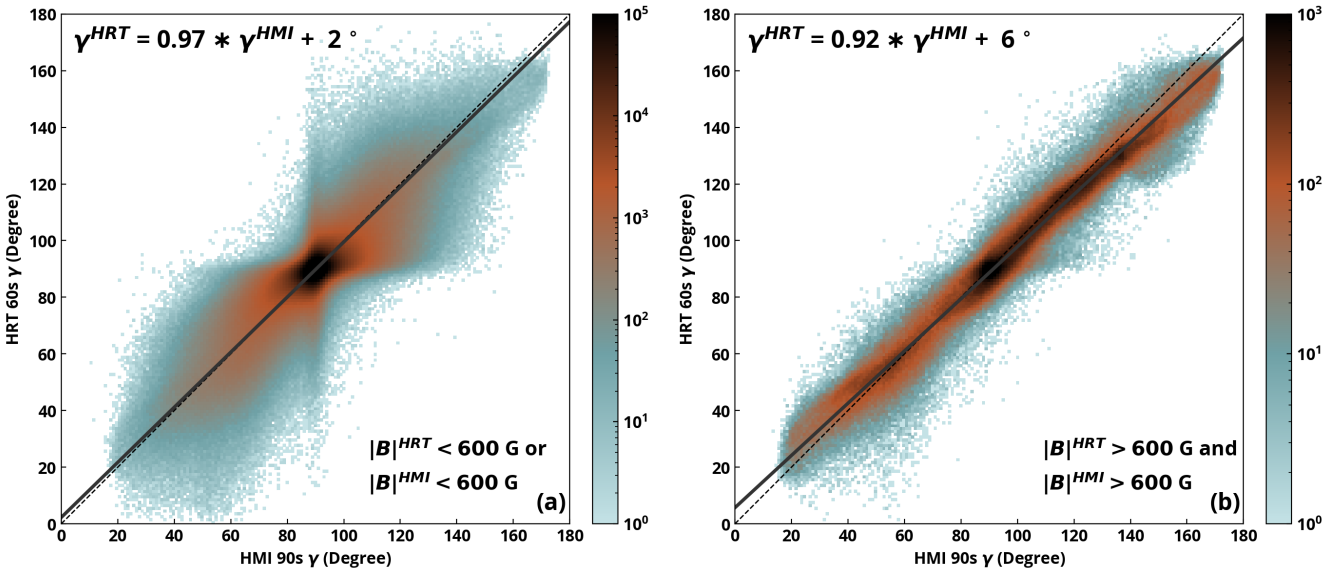


图4。 比较 SO/PHI-HRT 60 秒与 HMI 90 秒磁场倾角的散点图。面板 (a)： $|\mathbf{B}|_{\rm HRT} < 600$高斯或 $|\mathbf{B}|_{\rm HMI} < 600$ 高斯的像素。面板 (b)： $|\mathbf{B}|_{\rm HRT} > 600$ 高斯且 $|\mathbf{B}|_{\rm HMI} > 600$高斯的像素。图中显示了像素的对数密度，为了清晰起见进行了饱和处理。平均线性拟合以及 $y = x$ 分别以实心灰线和黑色虚线表示。

如讨论弱磁场强度范围时所述，噪声水平不同（部分原因是 HMI 的积分时间较长）导致了反演磁场的差异。数据未能完全配准，如第4.1节所述，也可能是造成这一差异的因素。

4.3. SO/PHI-HRT 与 HMI 全矢量磁场视线方向分量的比较

我们在图5中比较了 SO/PHI-HRT 的视线磁图（由 RTE 反演获得）与 HMI 推断的视线磁图（同样由 RTE 反演获得）。对于 720 秒和 90 秒的情况，相关系数分别为 0.97 和 0.95，而斜率均为 0.83。我们发现，在强磁场区间存在系统性差异，SO/PHI-HRT 推断出的视线磁场较弱。Hoeksema 等（2014）报告称，与 HMI ME-$B_{\rm LOS}$相比，HMI MDI 类$B_{\rm LOS}$ 低估了磁场。因此，由于 SO/PHI-HRT ME-$B_{\rm LOS}$ 与 HMI MDI 类$B_{\rm LOS}$吻合良好，如第4.1节所示，预计会观察到相同的低估现象。我们在此确认了这一预期。由于强磁场下倾角具有良好的相关性（见图4），我们可以确定，这一观测到的差异源于 HMI 对 $|\mathbf{B}|$的高估（或者同样地，源于 SO/PHI-HRT 的低估）。与第4.1节的图2相比，我们可以看到，HMI ME-$B_{\rm LOS}$ 推断出的视线磁场比使用 MDI 类公式推断出的磁场更强，最高分别达到 −2500高斯和 1800 高斯。此外，在 720 秒和 90 秒情况下，HMI ME-$B_{\rm LOS} < -1300$ 的平均差值分别为 486 ± 2高斯和 491 ± 1高斯。这些值大约是第4.1节中所得结果的三倍。这些差值分布的散布（1σ）分别为 239 高斯和 247高斯。

与 HMI 的视线磁图一样，HMI 的矢量磁场的视线分量，即 ME-$B_{\rm LOS}$，也会受到 SDO 径向速度的影响。然而，使用类 MDI 算法计算得到的 $B_{\rm LOS}$ 的残差随径向速度呈二次变化，而 HMI 矢量视线分量的残差则呈线性变化。在 +3 km/s 时，测得的残差约为 −30 高斯，这表明 HMI 甚至可能相较于 SDO 径向速度为 0 km/s 时的数值略有低估（Couvidat 等，2016）。因此，径向速度的影响无法解释在此次比较中 HMI 推断出的磁场强度为何高于 SO/PHI-HRT。

5. 结论

本文比较了2022年3月Solar Orbiter下合前后SO/PHI-HRT和HMI反演得到的磁场。我们将SO/PHI-HRT全矢量磁场的视线分量与采用类 MDI 算法计算的HMI 45 秒和720 秒视线磁图进行了比较。SO/PHI-HRT ME-$B_{\rm LOS}$ 和HMI $B_{\rm LOS}$ 的相关系数高达0.97，斜率为0.97，偏移量小于1高斯。不过，在磁场最强的区域（$B_{\rm LOS}$ <−1300 高斯），SO/PHI-HRT反演得到的磁场强度低9%。这些视线磁场仅对应前导太阳黑子的本影和半影区域。分析的数据集中，B_{LOS} >1300 高斯的点太少，无法确定两台仪器记录的正极性磁场是否也存在差异。高磁场强度下出现差异的原因尚不明确。这可能是SO/PHI-HRT达到饱和所致，也可能与HMI因轨道引发的周期性变化有关，因为同期观测时，SDO相对于太阳的径向速度接近最大值。其他因素也可能有所影响，例如波长采样位置、反演程序以及杂散光。

还对 SO/PHI-HRT 和 HMI 推断的矢量磁场进行了比较。当 $|\mathbf{B}| > 1300$高斯时，SO/PHI-HRT 推断的磁场强度比 HMI 低 13%，但磁场倾角相近。该磁场强度阈值对应于共同视场中活动区内几乎全部位于本影和半影的区域。比较 SO/PHI-HRT 和 HMI 的全矢量磁场视线分量，可以清楚地看出这一点。在弱磁场区间（$|\mathbf{B}| < 600$高斯），SO/PHI-HRT 推断的磁场强度高于 HMI。在此区间内，磁场强度和倾角的差异主要源于噪声差异。通过研究共同视场中的大型太阳黑子，对方位角进行了比较。

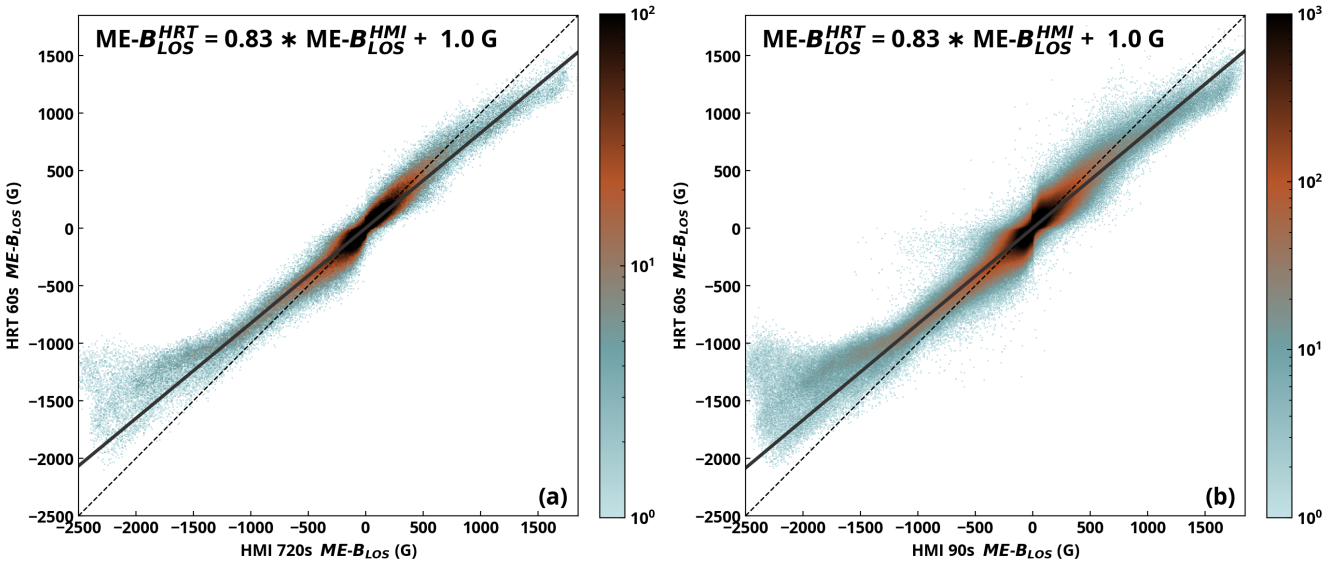


图5。比较全矢量磁场的 SO/PHI-HRT 与 HMI视线分量的散点图。“ME”代表米尔恩-爱丁顿，表示其由辐射传输方程反演得出。面板 (a)：比较七组 SO/PHI-HRT 60 秒数据与 HMI 720 秒数据的倾角。面板 (b)：同上，但使用 38 组 SO/PHI-HRT 60 秒数据与 HMI 90 秒数据。像素的对数密度以颜色表示，为清晰起见，在 1000（面板 a）和 100（面板 b）处饱和。平均线性拟合线和$y = x$ 线分别以实灰线和黑色虚线绘出。

表3。Q 比较的量、其线性拟合、斜率和偏移量的绝对误差，以及皮尔逊相关系数（c c).

比较的量	线性拟合	斜率误差	截距误差	皮尔逊相关系数
ME-B_{LOS}^{HRT} 60 秒 vs B_{LOS}^{HMI} 720 秒	ME-B_{LOS}^{HRT} = 0.97 ∗ B_{LOS}^{HMI} + 0.83 高斯	9×10^{-5}	0.01	0.97
ME-B_{LOS}^{HRT} 60 秒 vs B_{LOS}^{HMI} 45 s	ME-B_{LOS}^{HRT} = 0.97 ∗ B_{LOS}^{HMI} + 0.73 高斯	3×10^{-5}	0.006	0.97
$\|\mathbf{B}\|^{HRT}$ 60秒 vs $\|\mathbf{B}\|^{HMI}$ 720 秒	$\|\mathbf{B}\|^{HRT}$ = 0。84 ∗ $\|\mathbf{B}\|^{HMI}$ + 178高斯	3×10^{-4}	0.02	0.85
$\|\mathbf{B}\|^{HRT}$ 60秒 vs $\|\mathbf{B}\|^{HMI}$ 90 秒	$\|\mathbf{B}\|^{HRT}$ = 0。89 ∗ $\|\mathbf{B}\|^{HMI}$ + 118高斯	1×10^{-4}	0.01	0.84
γ^{HRT} 60s 对比 γ^{HMI} 720 s	γ^{HRT} = 0。80 ∗ γ^{HMI} + 17°	4×10^{-4}	0.01	0.81
γ^{HRT} 60s 对比 γ^{HMI} 90 s	γ^{HRT} = 0。95 ∗ γ^{HMI} + 4°	1×10^{-4}	0.004	0.85
ϕ^{HRT} 60 s 对比 ϕ^{HMI} 720s	ϕ^{HRT} = 1.04 ∗ ϕ^{HMI} − 5.5°	0.01	0.7	0.95
ϕ^{HRT} 60s 对比 ϕ^{HMI} 90 s	ϕ^{HRT} = 1.02 ∗ ϕ^{HMI} − 3.8°	0.01	1.7	0.94
γ^{HRT} 60s 对比 γ^{HMI} 90 s（弱磁场）	γ^{HRT} = 0.97 ∗ γ^{HMI} + 2°	1×10^{-4}	0.006	0.80
γ^{HRT} 60秒 vs γ^{HMI} 90 秒（强磁场）	γ^{HRT} = 0.92 ∗ γ^{HMI} + 6°	2×10^{-4}	0.02	0.98
ME-B_{LOS}^{HRT} 60 秒 vs ME-B_{LOS}^{HMI} 720 秒	ME-B_{LOS}^{HRT} = 0.83 ∗ ME-B_{LOS}^{HMI} + 1.0 高斯	1×10^{-4}	0.01	0.97
ME-B_{LOS}^{HRT} 60 秒 vs ME-B_{LOS}^{HMI} 90 s	ME-B_{LOS}^{HRT} = 0.83 ∗ ME-B_{LOS}^{HMI} + 1.0 高斯	5×10^{-5}	0.005	0.95

结果表明两者吻合良好，斜率为 1.02 – 1.04；不过，存在一个不均匀的负偏移量，仍需进一步研究。

SO/PHI-HRT 与 HMI 在视线磁场和矢量磁场方面发现的差异，可能由多种因素造成。首先，两台仪器在 Fe I 吸收线的不同波长位置进行采样，并使用不同的反演程序来推断矢量磁场。其次，由于 SO/PHI-HRT 数据中残留的几何畸变，磁场图可能未能完全配准。此外，本研究使用的 HMI 和 SO/PHI-HRT 数据均未经过杂散光校正。

马克斯·普朗克太阳系研究所（MPS）的……。太阳轨道器是由欧洲空间局（ESA）与美国国家航空航天局（NASA）开展国际合作的空间任务，由ESA负责运行。我们感谢 ESA SOC和MOC 团队给予的支持。SO/PHI的德国贡献由联邦经济和能源部（BMWi）通过德国航空航天中心资助，并由马克斯·普朗克学会中央经费提供支持。西班牙的贡献由AEI/MCIN/10.13039/501100011033/（RTI2018-096886-C5、PID2021-125325OB-C5、PCI2022-135009-2）和欧洲区域发展基金“建设欧洲之道”资助；IAA-CSIC获得“塞韦罗·奥乔亚卓越中心”称号资助（SEV-2017-0709、CEX2021-001131-S）；此外，DOS获得了拉蒙-卡哈尔研究员资助。法国的贡献由法国国家空间研究中心资助。HMI数据由美国国家航空航天局/SDO及HMI 科学团队提供。此项研究使用了SunPy开源软件包3.1.0版（10.5281/zenodo.5618440）（The SunPy Community et al. 2020）。我们感谢匿名审稿人提出的建设性意见。

致谢。本研究在国际马克斯·普朗克太阳系科学研究生院（IMPRS）的框架下开展——

参考文献

Borrero, J. & Kobel, P. 2011，《天文学与天体物理学》，527，A29；Borrero, J., Tomczyk, S., Kubo, M., et al. 2011，《太阳物理学》，273，267；Couvidat, S., Rajaguru, S., Wachter, R., et al. 2012，《太阳物理学》，278，217；Couvidat, S., Schou, J., Hoeksema, J. T., et al. 2016，《太阳物理学》，291，1887；Dalda, A. S. 2017，《天体物理学杂志》，851，111；DeForest, C. 2004，《太阳物理学》，219，3；Gandorfer, A., Grauf, B., Staub, J., et al. 2018，载于《空间望远镜与仪器2018：光学、红外和毫米波》，第10698卷，国际光学工程学会，1403–1415；Hoeksema, J. T., Liu, Y., Hayashi, K., et al. 2014，《太阳物理学》，289，3483；Kahil, F., Gandorfer, A., Hirzberger, J., et al. 2023，《天文学与天体物理学》，同一期特刊；Kahil, F., Gandorfer, A., Hirzberger, J., et al. 2022，载于国际光学工程学会（SPIE）会议系列，第12180卷，《空间望远镜与仪器2022：光学、红外和毫米波》，编者：L. E. Coyle、S. Matsuura和M. D. Perrin，121803F；Landi Degl'Innocenti, E. & Landolfi, M. 2004，《谱线偏振》，307；Liu, Y., Baldner, C., Bogart, R., et al. 2016，HMI科学简报，#56，HMI矢量场测量的新观测方案：Mod-L；Liu, Y., Hoeksema, J., Scherrer, P., et al. 2012，《太阳物理学》，279，295；Löfdahl, M. G. & Scharmer, G. B. 1994，A&AS，107，243；Müller, D., Cyr, O. S., Zouganelis, I., et al. 2020，《天文学与天体物理学》，642，A1；Müller, D., Marsden, R., St Cyr, O., & Gilbert, H. 2013，《太阳物理学》，285，25；Orozco Suárez, D. & Del Toro Iniesta, J. 2007，《天文学与天体物理学》，462，1137；Paxman, R. G., Schulz, T. J., & Fienup, J. R. 1992，《美国光学学会杂志A辑》，9，1072；Pesnell, W. D., Thompson, B. J., & Chamberlin, P. 2011，载于《太阳动力学观测台》（施普林格），3–15；Rees, D. & Semel, M. 1979，《天文学与天体物理学》，74，1；Romero Avila, A., Inhester, B., Hirzberger, J., & Solanki, S. K. 2023，《天文学与天体物理学》，准备中；Sarvaiya, J. N., Patnaik, S., & Bombaywala, S. 2009，载于TENCON 2009——2009年IEEE第10区会议，1–5；Scherrer, P. H., Schou, J., Bush, R., et al. 2012，《太阳物理学》，275，207；Schou, J., Scherrer, P. H., Bush, R. I., et al. 2012，《太阳物理学》，275，229；Semel, M. 1967，载于《天体物理学年刊》，第30卷，513–513；Sinjan, J., Calchetti, D., Hirzberger, J., et al. 2022，载于《天文学软件与网络基础设施VII》，第12189卷，国际光学工程学会，612–628；Solanki, S. K., del Toro Iniesta, J. C., Woch, J., et al. 2020，《天文学与天体物理学》，642，A11；The SunPy Community, Barnes, W. T., Bobra, M. G., et al. 2020，《天体物理学杂志》，890，68；Thompson, W. 2006，《天文学与天体物理学》，449，791；Valori, G., Calchetti, D., Moreno Vacas, A., et al. 2023，《天文学与天体物理学》，同一期特刊；Valori, G., Löschl, P., Stansby, D., et al. 2022，《太阳物理学》，297，1；Zouganelis, I., De Groof, A., Walsh, A. P., et al. 2020，《天文学与天体物理学》，642，A3。

---

[1]马克斯·普朗克太阳系研究所，Justus-von-Liebig-Weg 3，37077 哥廷根，德国 电子邮箱：solanki@mps.mpg.de[2] 国家航空技术研究所，Carretera de Ajalvir，4 公里处，E-28850 托雷洪-德阿尔多斯，西班牙 [3] 巴黎南大学，空间天体物理研究所，UMR 8617，法国国家科学研究中心，121 号楼，91405 奥赛，法国[4] 安达卢西亚天体物理研究所（IAA-CSIC），邮政信箱 3004，E-18080 格拉纳达，西班牙 电子邮箱：jti@iaa.es[5]瓦伦西亚大学，Catedrático José Beltrán 2，E-46980 帕特纳-瓦伦西亚，西班牙[6] 布伦瑞克工业大学数据处理与通信网络研究所，Hans-Sommer-Str. 66，38106 布伦瑞克，德国[7] 巴塞罗那大学，电子系，Carrer de Martí i Franquès, 1 - 11，08028 巴塞罗那，西班牙[8] 伊格纳西奥·达·里瓦大学研究所，马德里理工大学，IDR/UPM，Plaza Cardenal Cisneros 3，E-28040 马德里，西班牙 [9]莱布尼茨太阳物理研究所，Schöneckstr. 6，D-79104 弗赖堡，德国[10]天体物理研究所，哥廷根乔治-奥古斯特大学，Friedrich-Hund-Platz 1，37077 哥廷根，德国