

文章编号: 1000-8349(2009)04-0316-14



近红外偏振观测在恒星形成 研究中的应用

陈志维^{1,2}, 江治波¹

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 近红外偏振是研究恒星形成的有效工具。该文介绍了近红外偏振器的工作原理, 然后分几个方面介绍了近红外偏振在恒星形成研究中的应用。红外反射云能很好地示踪年轻星天体及分子外流, 通过分析偏振矢量的方法确定红外反射云的偏振对称中心, 从而确定它的照亮源; 偏振波长相关曲线包含了年轻星天体的星周物质的很多信息; 年轻星的分子外流导致了红外反射云的形成, 因此红外反射云的照亮源通常与年轻星天体成协, 并是分子外流的驱动源; 一些年轻星天体埋藏得很深, 一般在近红外波段无法直接探测到, 人们称之为深埋源, 通过分析偏振矢量的方法可以找到深埋源; 一般认为比较年轻的年轻星天体都是有尘埃盘的, 尘埃盘的存在会导致它的偏振形态出现偏振盘, 偏振盘可以用来研究尘埃盘; 恒星形成区里成员星的偏振主要是由尘埃的二色性消光产生的, 这样偏振方向会平行于致使尘埃排列的磁场的方向, 从而能够揭示磁场的结构。最后进行了总结, 并论述了中远红外偏振研究的优势和意义。

关键词: 恒星形成; 分子云; 近红外偏振
中图分类号: P152, P141 **文献标识码:** A

1 简 介

恒星是在以分子气体为主的星际分子云中生成的, 在分子云自引力的作用下分子云开始坍缩并形成年轻星天体 (young stellar objects), 这些年轻星天体经过快速演化最终形成恒星。根据研究, 恒星的形成经过了以下 4 个阶段^[1]:

(1) 云核阶段: 分子云核内气体运动压力、磁压、引力及外部压力处于基本平衡状态, 云

收稿日期: 2008-11-12; 修回日期: 2009-01-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (10873037)

核缓慢收缩, 温度开始缓慢上升, 形成热分子云核。

(2) 主坍缩阶段: 当分子云核的内部压力不能抵抗自身引力时, 就开始坍缩了。由于云核中心密度较高, 坍缩区域最初位于中心, 并以当地声速向外扩张, 这就构成“先内后外”的坍缩。坍缩形成一个致密的核心, 巨大的引力能使中心温度迅速升高。由于云核的自转, 外部物质不会直接落到核心, 而是在核心周围形成一个致密的盘状结构, 称为吸积盘。

(3) 主吸积阶段: 根据角动量和磁通量守恒原理, 最终成为恒星组成部分的物质并不能直接落到中心星上, 而是落在吸积盘上, 吸积盘通过一系列复杂的过程, 将多余的角动量向外传递, 使中心星的质量得以继续增加, 因此吸积盘在恒星形成活动中起了至关重要的作用。在此期间, 为了释放角动量, 系统还通过目前尚不可知的机制向两极方向抛射物质, 形成质量外流。恒星的大部分质量都是通过吸积获得的, 巨大的引力能使中心星的温度急剧上升, 从而开始氦和锂的热核反应过程^[2]。

(4) 残余物质驱散阶段: 质量外流在这一阶段继续存在, 外流与星风的作用使恒星形成的残余物质远离中心星, 星周物质及盘物质变得稀薄, 外流的开口张角渐渐变大。中心星仍然从盘中吸积物质, 但其速率已经很小, 中心星的质量不会再有实质性的增长, 更多的是准静态收缩。中心星的核心部分这时可能已经开始了氢燃烧, 外部出现了对流层。当这一阶段结束时, 人们在宇宙空间就可以看见一颗性质不同的恒星, 被称为主序星。

地球上接收到的来自宇宙空间的辐射都是有偏振的, 偏振产生的机制主要有以下 4 种:

(1) 非相对论性电子在磁场中运动产生回旋加速辐射, 这种辐射是圆偏振的^[3]。

(2) 相对论性电子运动产生的同步加速辐射是线偏振的, 电场 E 垂直于磁场 B ^[3]。

(3) 沿本地磁场排列的非球形颗粒也能造成偏振^[3]。尽管颗粒的排列机制还不是了解得很清楚, 但是磁场的确对颗粒的排列方向有着重要的作用。在星际介质中, 颗粒的转动能与周围气体的相当, 这样颗粒特征旋转频率的量级是 MHz。由于力学滞后颗粒围绕短轴旋转, 通过巴内特效应 (Barnett effect) 在短轴方向上产生了磁矩, 于是颗粒的旋转轴围绕本地磁场进动。进动的本身并不会导致颗粒的有序排列, 却导致磁场能有效地限制旋转轴的各向异性分布。由颗粒发射的电磁辐射的电场分量 E 垂直于磁场分量 B , 同时吸收产生的偏振平行于 B 。由于颗粒在两垂直方向上性质的不同才导致偏振的产生, 所以这种产生机制叫作二色性消光或吸收。

(4) 电子、分子、尘埃颗粒等微粒对入射光的散射也能产生偏振。若入射光是自然光, 在垂直于入射光的方向上, 散射光是线偏振的, 在原入射方向或其逆方向上, 散射光仍是自然光, 前者的强度正好是后者的一半, 在其他倾斜方向上, 散射光是部分偏振的, 强度介于前两个极端之间^[4]。当散射体的尺度比入射光的波长小时, 瑞利散射定律是适用的, 即散射光强与 λ^4 成反比, 并且产生的偏振与波长无关^[5]。米氏散射定律适用于任何尺寸 - 波长比的球形散射体。当尺寸 - 波长比较小时, 瑞利散射定律是很好的近似。当尺寸 - 波长比较大时, 散射强度与波长的依赖关系很复杂, 产生的偏振与波长的关系也很复杂^[5]。

在恒星形成过程中, 中心星总是被周围的尘埃包围, 因此尘埃物质对中心星辐射的散射和二色性消光是产生偏振的主要机制。观测到的恒星的偏振根据空间上的差别可以分为恒星的固有偏振和星际偏振。恒星本身发出的光线是非偏振的, 固有偏振来自于星周物质的消光。一种固有偏振的产生机制是非对称星周包层里的非球形颗粒对光线的散射^[5,6]。纯粹的电子散射导致

的偏振与波长无关, 气体原子、分子和非常小的颗粒的瑞利散射导致的偏振也与波长无关^[5]。固有偏振的产生机制也可以是有序排列颗粒的二色性消光^[7,8]。恒星发出的光线(已经是偏振光了)由于星际消光而产生的偏振叫做星际偏振。星际偏振的产生机制是按星际磁场排列的非球形颗粒的二色性消光。目前星际介质颗粒的排列机制问题仍没有得到解决。星际介质颗粒的一种可能排列机制是旋转尘埃颗粒的顺磁化排列, 也叫做 Davis-Greenstein 机制^[9], 但是这种排列机制被证明仍不够强烈^[10,11]。为了完善这种排列机制, 有人提出了超顺磁化和铁磁化的改进^[12,13]。星际偏振与波长有关, 它的归一化偏振波长相关曲线可以用经验公式:

$$p(\lambda)/p_{\max} = \exp[-1.15 \ln^2(\lambda_{\max}/\lambda)] \quad (1)$$

描述^[14]。 λ_{\max} 是星际偏振最大时对应的波长, λ_{\max} 一般落在可见光波段。在近红外波段星际偏振与波长满足关系 $p(\lambda) = p_1 \lambda^{-\beta}$, β 的大小在 1.5~2.0 之间^[15]。恒星的固有偏振具有与星际偏振不同的特点, 主要有 3 点^[5]: 一是固有偏振随时间变化; 二是固有偏振与波长的关系和星际偏振的不同; 三是随着波长的变化偏振方位角会有剧烈的旋转, 甚至会在某个波长处发生跳变。

在恒星形成的过程中, 年轻星天体都或多或少地被星周尘埃包围, 观测的年轻星天体也总是在近红外波段显示出较大的偏振, 因此近红外偏振观测是研究年轻星天体演化的极其有效的工具。该文第 2 章介绍了近红外偏振器及其用于近红外偏振观测。第 3 章介绍了年轻星天体的偏振波长相关曲线。第 4 章介绍了与年轻星密切相关的红外反射云 (IRN)。第 5 章分析了年轻星天体和周边环境的偏振, 介绍了如何通过偏振形态来判断年轻星外流的倾角、张角和外流驱动源, 如何发现在近红外波段不可见的深埋源, 以及根据偏振盘揭示年轻星的尘埃盘。第 6 章介绍了恒星形成区里成员星的偏振所包含的磁场信息。第 7 章是总结和展望。

2 近红外偏振器

要进行近红外偏振观测, 都需要在望远镜的红外照相机前面装卸近红外偏振器。所有的偏振器主要有两个组成元件: 消色差半波片和偏振片^[16-18]。当其消色差波长范围是 $1 \sim 2.5 \mu$ 时, 它就是一个近红外偏振器。消色差半波片通常设计成可旋转和可伸缩的结构。为了尽量减少仪器本身的偏振, 消色差半波片必须安置在光路系统的前端, 并且口径越大背景噪声越小。偏振片设计成固定不动的, 并要求能在低温下使用。除了这两个基本元件, 还有装置在消色差半波片前面的校正偏振片^[16,17]。通过校正偏振片来观测非偏振标准星, 就可以测量系统的偏振效率。通过转动消色差半波片的角位置对入射光线的调制可取得线偏振测量。

对一般入射光而言, 考虑线偏振测量, 半波片的相位延迟为 180° , 则偏振器的调制出射光强可简单地用 Stokes 参量 (I, Q, U, V) 表示为^[16]:

$$I_0 = \chi[I + QP \cos(4\theta - 2\varphi) + UP \sin(4\theta - 2\varphi)] \quad (2)$$

其中 φ 为偏振片的方位角, θ 是半波片的方位角; P 是入射光线的偏振度; χ 是偏振片的透过率。从上式可知, 通过旋转半波片来调制能最大程度地优化对两偏振分量幅度的测量, 并且固定偏振片的偏振测量模式能够很大程度地消除由于偏振器件光学性质的不均匀和探测器

对入射偏振面取向敏感而造成的不均匀性, 提高偏振测量精度。对消色差半波片在不同角位置下的一系列观测量 $I_0(\theta)$ 进行最小二乘法拟合便可以求得入射光的 Stokes 参量 (I, U, P), 从而得到偏振度 P 和偏振方位角 A 的测量^[16]

$$P = (Q^2 + U^2)^{1/2}/I, \quad A = \frac{1}{2} \arctan (U/Q). \quad (3)$$

3 偏振波长相关曲线

除了纯粹的电子散射和非常小微粒的瑞利散射造成的偏振外, 人们观测到的天体偏振辐射都随波长变化。T Tau 的光学到近红外的分光偏振研究首先由 Hough 等人^[20] 给出, 它的偏振波长相关曲线见图 1。从图 1 中可以看到偏振在 B 到 J 波段大约为 1%, 到了 $1.6 \mu\text{m}$ 处降为零, 最后在 $2.2 \mu\text{m}$ 增大到 0.6%, 并且在 $1.6 \mu\text{m}$ 偏振方位角转动了约 90° 。T Tau 的偏振随的时间变化不是很显著, 偏振方位角基本不随时间变化。为了解释 T Tau 的偏振波长相关曲线, Hough 等人^[20] 提出了由两种不同尺寸的颗粒组成的米氏散射模型: 一种颗粒是尺寸小于等于 $0.1 \mu\text{m}$ 典型的硅酸盐颗粒, 它能解释光学偏振; 另一种是成分较少的大尺寸的硅酸盐颗粒 (尺寸约为 $1.0 \mu\text{m}$), 它能解释近红外偏振。这两种颗粒所产生的偏振方向会互相垂直, 这也能解释偏振方位角的突变。

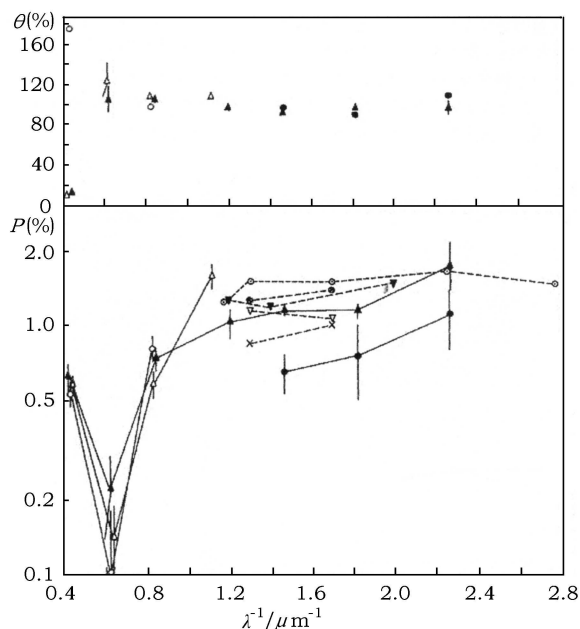


图 1 T Tau 的偏振波长相关曲线^[20]

上图是偏振方位角, 下图是偏振度。数据来源: 1979 August 12, ●1979 September 15; △1979 November 12; 00000 1980 February 24, 25。来自 Bastien 等人^[19] 的数据: ▽1976 October 27; ×1976 October 30; ⊗1977 February 21; ⊙1977 October 15; 00000 1978 February 20。

姚等人^[21]对恒星形成区 Mon R2 IRS 里的红外源 IRS 2 和 IRS 3 做了分光偏振观测(见文献[21]的图5), 波长从 $1.2\ \mu\text{m}$ 到 $4.2\ \mu\text{m}$ 。从图中看出, IRS 2 的偏振方位角在观测波长内几乎不变, 它的偏振波长相关关系符合星际偏振的特征。在 $3.1\ \mu\text{m}$ 处的冰吸收带内偏振增大, $\Delta p(\lambda)/\tau(\lambda)$ (偏振增加量除以光学深度) 在 $2.9\ \mu\text{m}$ 处最小, 在 $3.3\ \mu\text{m}$ 处最大, 说明 IRS 2 的偏振产生机制是有序排列颗粒的二色性吸收^[21]。IRS 3 的偏振在长波段(大于 $3\ \mu\text{m}$) 下降得很快, 说明偏振的产生机制是散射, 散射颗粒的尺寸比较小。偏振方位角在 $4\ \mu\text{m}$ 处发生约 90° 的跳变, 说明存在两种尺寸不同的颗粒。IRS 3 的偏振是由周围尘埃颗粒的散射造成的, 小尺寸颗粒是主要的, 大尺寸颗粒很少。

4 红外反射云

年轻星天体通常被包裹在分子云里, 由于强烈的消光, 在年轻星天体的周围形成了所谓的红外云。有些红外云具有高偏振和中心对称的偏振形态, 这类红外云被称之为红外反射云 (IRN)^[22]。对于一个典型的红外反射云, 它的近红外偏振呈中心对称结构, 对称中心就是这个星云的照亮源。计算偏振形态对称中心的一种常用的方法是 Weintraub 等人在文献[23]的附录 A 里所采用的。还有另外一种比较直观的方法: 在偏振矢量图中画出每个偏振矢量的垂线, 每两条垂线的交点的统计平均位置就是对称中心^[24]。对于理想的圆形对称或椭圆形对称形态, 偏振矢量的垂线集中在一点。而实际上红外反射云的偏振形态或多或少地偏离圆形和椭圆形, 偏振矢量的垂线不会集中在一点, 这导致了对称中心的不确定。这种不确定性是由于尘埃颗粒的多重散射引起的, 多重散射会减小偏振度和改变偏振矢量的方向。有一种方法可以减少多重偏振的干扰, 就是在计算对称中心时设定偏振的最小值, 例如 Weintraub 等人^[24]取的最小值是 20%。一旦确定了对称中心的对称中心, 就能认为在对称中心附近(观测分辨率范围内)的红外源是该红外反射云的照亮源。

图 2 所展示的是一个典型的红外反射云(命名为 IRN 4)和它的偏振形态^[25]。从图 2 可

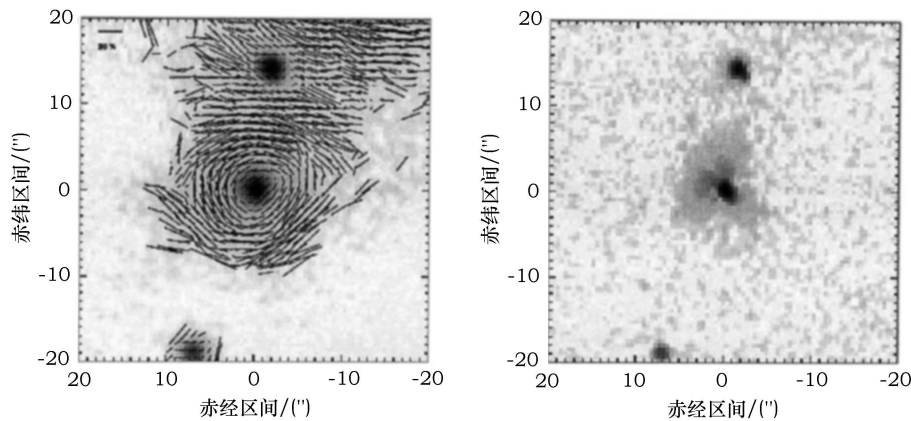


图 2 典型的红外反射云的偏振矢量灰度图(左图)和灰度图(右图)^[25]

该红外反射云尺度较小, Kandori 等人^[25]把它命名为 IRN 4

以看到, IRN 4 朝西北 - 东南方向延伸, 它的西北部分是扇形结构, 但是东南部分却小得多。它的偏振形态是圆形对称结构, 对称中心落在星云图中央的那颗点源上, 说明这个点源就是 IRN 4 的照亮源。还可以看到 IRN 4 所在的区域, 偏振都较高 (超过 30%), 在 IRN 4 以外的区域, 偏振都比较小。

研究认为, 红外反射云与质量双极外流有着密切的联系。红外反射云的延展方向趋向与质量外流方向保持一致, 这说明了红外反射云形成的原因: 由于光学厚的星周尘埃盘的遮盖, 中心星的光线只能从位于两极的外流空腔辐射出去, 并被空腔壁上的尘埃颗粒散射从而显示出高偏振和中心对称的偏振形态^[26]。通过对红外反射云进行高分辨率的红外成像观测能揭示质量外流的详细结构, 进而认证出外流的驱动源。年轻星天体总是成团出现在分子云里, 红外反射云的照亮源也不一定就是外流的驱动源, 但是论证能说明它们是同一个天体已经占了相当高的比例^[35]。

5 年轻星天体

很多年轻星天体都或多或少地显示出近红外偏振, 它们的偏振可以分为星际偏振和年轻星的固有偏振。Elsasser 等人^[28]建立了一种双极结构的盘 - 外流模型来解释年轻星的固有偏振: 年轻星天体几乎是侧对着观测者, 光学厚的尘埃盘使中心星在光学波段几乎不可见, 甚至在近红外波段的消光也很严重, 但在外流空腔里的消光却小得多, 大量的光线从外流空腔里逃逸出去, 并被尘埃颗粒 (主要位于空腔壁上) 散射成近红外的偏振光。

Hodapp 等人^[27]通过对 9 个红外源的近红外偏振研究发现这些双极结构的红外源的形态是这样的: 外流一般与磁场方向平行, 光学厚的尘埃盘导致红外源在光学波段完全不可见, 甚至在近红外消光也很大, 但是光线能从外流的两极逃出, 照亮星云并被尘埃散射, 导致整个星云具有较高的偏振, 并形成了所谓的红外反射云。观测已知这种外流 - 盘的结构在双极分子外流系统例如 GL2591, L1551-IRS5, HH7-11, SVS 13, DG Tau, GL961, Cep A, BN, GGD 27^[22,27,29,34]中是很普遍的。

已经用近红外偏振的方法研究过不少的恒星形成区, 例如 OMC-1^[31,32,34,35]。通过近红外偏振的方法, 获得了恒星形成区的很多信息, 例如外流的驱动源, 外流的方向, 年轻星天体周围的尘埃盘等。这些都为了解恒星的形成机制提供了大量的观测证据, 进一步证实了小质量恒星形成的坍缩和吸积模型是正确的。江等人^[34]的观测显示 BN 也是有盘和外流的, BN 的质量不小于 $7M_{\odot}$, 这说明了大质量恒星的形成机制可能与小质量恒星一样, 至少对于 BN 是一样的。

5.1 外流和外流驱动源

在第 4 章里已经提到年轻星天体总是与红外反射云紧密联系, 红外反射云能够示踪质量外流的形态。当尘埃盘是正对着观测者, 年轻星完全暴露出来, 由于中心星的连续辐射贡献很大, 整个星云的偏振就会比较低了, 其主要表现为星际偏振。当尘埃盘有一定的倾角时, 它会部分甚至全部遮挡年轻星天体, 这样会显示出较高的偏振。一般认为, 早期年轻星天体都驱动着分子外流, 外流使年轻星天体周围的尘埃更为复杂。分子外流区域的近红外偏振能够揭示外流的方向、倾角、驱动源。

Minchin 等人^[31]对 OMC-1 的 BN-KL 区域进行了近红外偏振成像观测(见文献[31]里的图 3, 图 4)。他们的观测结果肯定了 Hough 等人^[32]的关于 IRc2 作为双极外流驱动源的结论。他们还发现了该区域的其他红外源同样是由 IRc2 在近红外波段照亮的。红外反射云的偏振随波长的增大显著增大, 说明了尘埃颗粒的尺寸明显大于星际介质里的尺寸。距离 IRc2 越远, 消光越小, 并且 IRc2 附近区域的偏振较低, 这些说明了 IRc2 可能被尘埃盘包围。Minchin 等人^[31]提出的一个简单模型能很好地解释外流西北方向的 K 波段偏振。这是一个碗碟状的双极外流, 张角大约是 100° , 由外流空腔壁上尘埃颗粒的散射造成的偏振与观测到的偏振比较符合, 外流对天空平面的倾角不超过 30° 。

IRc2 和 BN 是两个大质量的年轻星天体, 分别为 $25M_\odot$ ^[33]和 $\geq 7M_\odot$ ^[34]。江等人^[34]得到了 BN 天体的 H 和 K 波段高分辨率偏振图像。H 波段的偏振图像(图 3)显示出一个明亮蝴蝶状区域(从东北延展到西南)和方位角约为 126° 的喇叭状暗带, 被认为是 BN 天体的外流和盘。偏振矢量在外流区域并不是围绕 BN 中心对称的, 而是互相平行, 这说明二色性消光的作用也很显著。该区域的前景磁场的方向大概在方位角 120° , 按磁场方向排列非球形粒子的二色性消光能够产生互相平行的偏振形态。这种平行的偏振形态是尘埃散射和二色性消光联合作用的结果。外流的西南区域的偏振要明显小于东北区域, 江等人^[34]认为盘的倾角不是造成这种现象的原因, 更可能的原因是消光或者尘埃密度的不同。

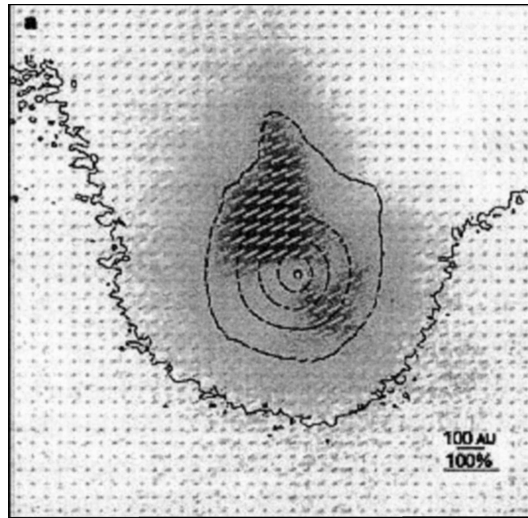


图 3 H 波段的偏振矢量灰度图^[34]

Tamura 等人^[35]对 Orion 星云进行了近红外偏振成像观测, 证实了 IRc2 和 BN 都是外流驱动源。他们的偏振图像(见文献[35]中的图 1 和图 2)显示出一个双极型红外反射云主要沿东西方向延展, 星云的中心落在 IRc2, 偏振在 IRc2 的东边和西边很高(K 波段最高有 40%), 对称中心是 IRc2。这些说明了外流空腔壁上尘埃颗粒的散射是该红外反射云形成的原因, 星云的形状能反映外流空腔的张角。从星云的形状可以看出, 外流是东西向的, 在东西两边的大小差不多, 这与观测到的分子氢外流的方向不同^[35]。还有一个红外反射云向北边延展, 它的偏振也很高(K 波段最高有 30%), 它的照亮源是 BN 天体。他们认为该方向的质量外流导致

了该星云的形成, 外流的驱动源是 BN。

5.2 深埋源

一些极端年轻的天体, 很深地埋藏在分子云核中, 一般都无法在小于 $2 \mu\text{m}$ 的波段探测到, 这类天体称之为深埋源。虽然无法直接观测到深埋源, 但是通过近红外偏振的方法可以间接地观测到。深埋源是刚刚开始演化的年轻星, 它周围的星周包层还很浓密, 紧紧地包裹着深埋源, 但是光线可以通过消光小的外流空腔后散射出去。尘埃通过散射深埋源的辐射发光, 形成红外反射云。由于埋藏得很深, 在红外反射云的偏振对称中心通常没有对应的近红外源, 但是可能发现中远红外源甚至射电源。由于深埋源通常与其他年轻星成团出现, 每个年轻星天体照亮着星云的一部分, 这样会导致整个红外反射云的偏振形态很复杂, 偏振对称中心的确定也相应地比较困难, 最后导致无法准确地判断深埋源的位置。水脉泽是很好的深埋源示踪器, 但中远红外源和射电源与深埋源的相关性就比较差了^[36]。

江等人^[37]对 S187 和 S233 做了 K' 波段的偏振成像观测。他们把 S233 细分为 S233 A 和 S233 B 两个星云, 并在 S233 B 发现了部分区域的偏振形态是中心对称的 (见图 4), 并采用 Weintraub 等人^[24]的方法确定了对称中心, 但是在附近区域没有发现任何点源, 并推断在对称中心附近可能存在深埋源。在该图中还能看到一些水脉泽节点在对称中心附近, 说明深埋源存在的可能性更大了。还可以看到 S233 B 的东北部分的偏振很高, 它很可能代表着西南 - 东北方向外流的空腔, 这意味着深埋源是这个外流的驱动源。外流的东北部分面向观测者, 而西南部分则由于消光太大以致在近红外观测不到。在深埋源的西北方向, 偏振形态是沿南北方向互相平行的, 说明该区域不是由深埋源直接照亮的。在深埋源的东北和西北方向偏振形态的差异说明密度分布的差异。他们认为深埋源的周围存在东南 - 西北方向的尘埃盘, 尘埃盘的方向刚好与外流垂直。尘埃盘的存在导致了密度分布的差异, 使朝向西北的辐射被严重地削弱, 而朝向东北的辐射几乎没有减弱, 进而导致了偏振形态的差异^[37]。

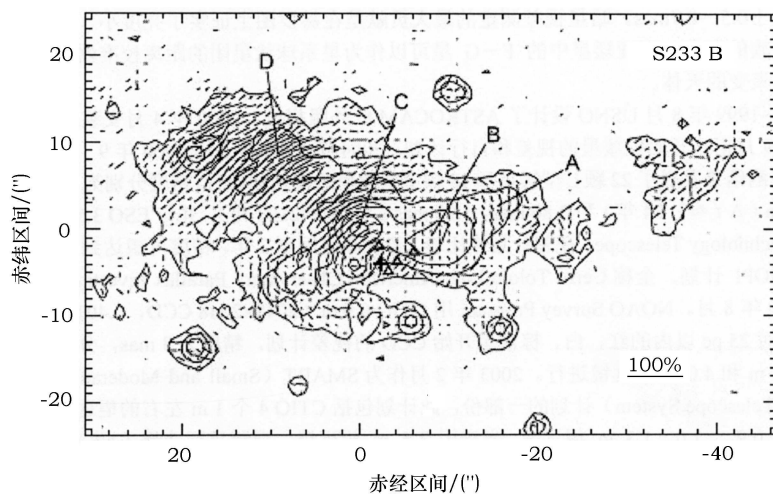


图 4 S233 B 的 K' 波段偏振图像^[37]

深埋源和水脉泽的位置分别用加号“+”和三角标出, A, B, C, D 都是反射节点, 图中方位是上北右西。

5.3 偏振盘

很多红外反射云的近红外偏振在中心星的周围不是圆形对称的,一般是椭圆形对称的,并且偏振都很低(一般不超过5%),这种形态被命名为偏振盘^[21,38]。一般认为年轻星的尘埃盘是偏振盘的形成原因,尘埃盘中颗粒的二色性消光 and 多重散射都可以导致偏振盘的形成^[39-42]。

通过偏振盘的大小可以估算尘埃盘的大小。Yamashita 等人^[45]发现 GGD27 IRS 中的红外源 IRS 2 有偏振盘(见图 5)。GGD27 IRS 的近红外偏振图像显示星云的偏振是中心对称的,对称中心落在 IRS 2。IRS 2 的东西两侧比起南北两侧要暗很多,且东西两侧的偏振很小。从图 5 可以看到, L' 波段的消光比 K 波段的小,在 L' 波段 IRS 2 两侧星云亮度的变化比在 K 波段平缓,为此他们认为偏振盘是由于尘埃盘中颗粒的多重散射产生的。偏振很低的区域说明该区域的密度很高,由此他们估算了尘埃盘的大小,东西向长度为 $60''$,南北向厚度为 $20''$ 。

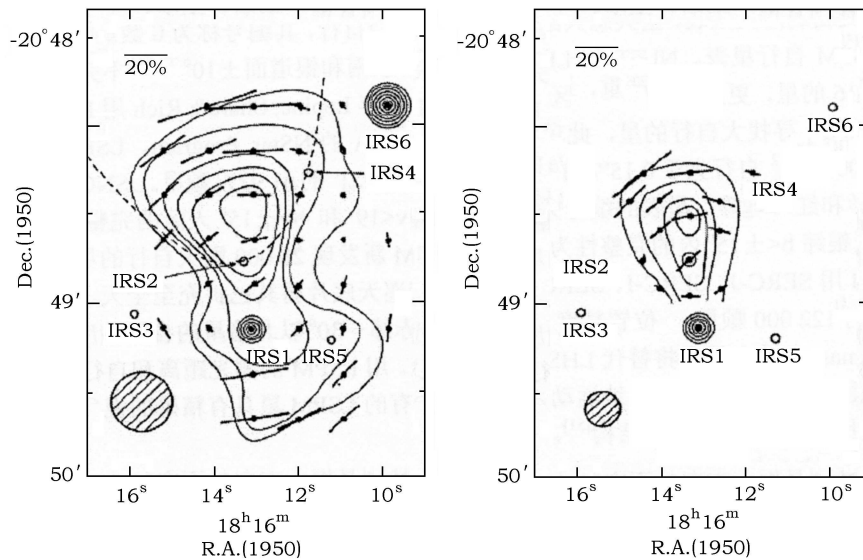


图 5 GGD27 IRS 的 K 波段(左)和 L' 波段(右)的偏振图像^[45]

每条穿过圆点的实线代表圆点所在位置的偏振大小和方向,空心圆代表红外源,图中方位是上北右西。

Minchin 等人^[30]对 R Mon/NGC2261 在 $J, H, K3$ 个波段做了偏振成像观测。NGC 2261 是个南北延展的星云,它的照亮源是 R Mon。在该区域 Canto 等人^[46]和 Kaifu 等人^[47]观测到南北方向的外流和东西向的 CO 分子盘。3 个波段的偏振图像显示 NGC 2261 的照亮源 R Mon 有偏振盘(见文献^[30]中的图 1—图 3)。在 R Mon 的东西两侧,偏振小于 5%。偏振在 R Mon 的周围偏离了圆形对称形态,而是椭圆形对称形态。Minchin 等人^[30]认为偏离圆形对称形态的程度与两种机制(尘埃颗粒的单次散射和二色性消光)的相对贡献有重要关系。在外流空腔里,尘埃颗粒数密度相对较低,单次散射机制占主导作用,则偏离就会比较小;而在尘埃盘里,在高密度的环境多重散射和二色性消光才是主导机制,偏离会比较大,就会变成椭圆形。在 J 波段的图像中可以看到有些区域偏振几乎为零,这是由于两种

机制所占比重相等, 相互抵消。在 J 波段中, 东西两侧的偏振是东西向的, 但是在 K 波段中, 东侧的偏振则是中心对称的了。有序排列尘埃颗粒的二色性消光可以解释这种变化, 因为在短波段这种机制起主导作用^[30]。无论在哪个波段, 东侧的偏振总比西侧的大一些, 在 K 波段, 东侧的偏振是中心对称的而西侧的偏振仍然很低。这些说明了中心星东侧的密度要比西边的低^[30], 其他观测也证实了这一结论^[26]。R Mon 的偏振方位角 ($100^\circ \sim 103^\circ$) 大致平行于尘埃盘但垂直于外流。在 R Mon 的尘埃盘中, 尘埃颗粒的二色性消光是偏振盘产生的主要机制, 而不是多重散射^[30]。

6 磁场的方向

磁场在分子云坍缩和尘埃盘的形成过程中有着重要作用^[48]。在分子云里尘埃颗粒的排列与磁场有关, 到目前为止排列机制仍不是很清楚。考虑一种简单的排列机制 (例如 Davis-Greenstein 机制^[9]), 尘埃颗粒的二色性消光导致的偏振会与磁场平行。很多研究表明分子云里绝大多数成员星的偏振方向相差不大, 一般认为成员星偏振方向的总体趋势代表了磁场在天空面的投影方向^[21,25]。有一些分子云里成员星的偏振是杂乱无章的, 这样无法知道磁场的方向 (例如 L1630^[43])。

Kobayashi 等人^[49], Dyck 等人^[50] 和 Heckert 等人^[8] 研究了年轻红外源 (总数为 52) 的偏振与周围的场星的光学偏振的关系。结果显示 58% 的红外源的偏振大致平行于场星的偏振 (偏振方位角的差别小于 30°), 但是还有 38% 的红外源的偏振与场星的偏振差别超过 45° 。他们的结果说明了大多数红外源 (58%) 偏振产生的机制是按磁场方向排列的非球形尘埃颗粒

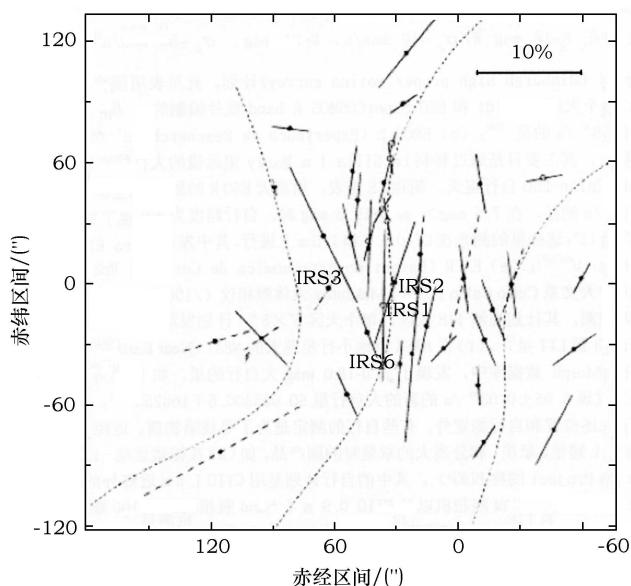


图 6 Mon R2 IRS 里一些点源的偏振图^[21]

实心圆代表 K_s 波段的偏振, 空心圆代表 H 波段的偏振, 点划线代表 IRS 3 的偏振, 虚线代表 I 波段的偏振^[51], 点线代表假设的磁场结构, 图中方位是上北右西。

的二色性消光,同时小部分红外源(38%)偏振产生的机制是尘埃颗粒的散射。Hodapp 等人^[27]给出了 9 个红外源的偏振数据,这些红外源都伴随着各向异性的质量外流(大部分是双极外流,说明这些红外源是年轻星天体)。他们比较了这些年轻星天体的偏振与星际磁场的关系,发现大多数年轻星的偏振垂直于星际磁场,并认为这种垂直的关系是因为偏振的产生机制是散射。

姚等人^[21]对 Mon R2 IRS 做了近红外偏振测量,并研究了 Mon R2 IRS 的磁场结构(图 6)。这个区域里的总体偏振形态结构很简单,所以散射对偏振的贡献很小。IRS 2 的分光偏振测量结果(见文献中^[21]的 Fig.5)表明红外源的偏振产生机制是二色性消光^[21]。根据 Hodapp 等人^[51]在 *I* 波段对场星的偏振测量结果,磁场方向与 IRS 2 的偏振方向平行。可以认为图 6 中的偏振方向代表了磁场在 Mon R2 核心区域的投影^[21]。从图 6 可以看到磁场大致是南北向的。在更大尺度上,磁场是沿西北-东南方向的^[53,54]。结合 *I* 波段的偏振数据^[51],姚等人^[21]认为磁场的结构是沙漏形的(图 6 中 3 条虚线)。

7 总结与展望

本文回顾了近红外偏振观测在恒星形成研究中的应用。年轻星天体通常都是被尘埃包围着,由于星周尘埃分布的不同,偏振形态也各有不同。在恒星形成区,尘埃对来自中心星辐射的作用机制有两种:一是尘埃颗粒对光线的散射,二是有序排列颗粒对光线的二色性消光。偏振的产生既与产生机制有关,还与尘埃的性质、大小和组成成分有关。年轻星天体的偏振波长相关曲线能揭示尘埃的很多性质,一般来说有几点:尘埃颗粒尺寸的变化范围越大,则在更宽的波长范围内都产生偏振,偏振和波长呈宽分布的相关关系;偏振随波长增加而变大,这说明颗粒的尺寸要大于星际尘埃的尺寸;偏振方位角 90° 的突变说明了颗粒大小的变化。年轻星天体的各向异性质量外流(大多数是双极型外流)导致了红外反射云。典型的红外反射云的偏振形态是中心对称的,对称中心就是星云的照亮源。红外反射云能示踪质量外流的形态,它的照亮源与外流驱动源也有比较明显的相关性。有些红外反射云的偏振会偏离圆形对称形态,原因有两种:多个照亮源的同时作用和由尘埃盘导致的偏振盘,偏振盘是个很好的尘埃盘示踪器。一些红外反射云的偏振对称中心没有对应的红外源,这说明可能存在深埋源。深埋源与水脉泽有很好的相关性,水脉泽能增加深埋源存在的可信度。年轻星的偏振与周围场星的偏振存在一种关系:若偏振的产生机制是散射,年轻星天体的偏振与场星的偏振垂直;若偏振的产生机制是二色性消光,则年轻星天体的偏振与场星的偏振平行。恒星形成区里成员星的偏振方向代表了磁场在天空面的投影方向,通过近红外偏振观测可以获得恒星形成区的磁场信息。

由于年轻星天体在近红外的消光还是很大,一些埋藏得很深的源甚至在 *K* 波段都不可见。把波长延展到中远红外波段进行偏振观测就能避免这一问题。在近红外波段不可见的深埋源在中远红外波段都存在其对应体,这时已不用偏振矢量分析的方法就可探测到深埋源了。从偏振波长相关曲线可知,由散射和二色性消光产生的偏振在中远红外波段会比近红外波段小很多,这时的偏振产生机制以尘埃的热辐射为主。沿磁场有序排列的尘埃颗粒的热辐射会垂直于磁场方向,导致偏振方向也会垂直于磁场方向。结合近红外和中远红外的偏振观测研究,能更全面地揭示磁场的结构。

参考文献:

- [1] 江治波, 杨 戟. 物理, 2006, 35(7): 565
- [2] 黄润乾. 恒星物理. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 218
- [3] Hough J H, Aitken D K. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2003, 79: 733
- [4] 赵凯华, 钟锡华. 光学 (下册). 北京: 北京大学出版社, 1984: 249
- [5] Zellner B H, Serkowski K. *PASP*, 1972, 84: 619
- [6] Heckert P A, Zeilik M. *AJ*, 1985, 90: 2291
- [7] Heckert P A, Zeilik M. *AJ*, 1984, 89: 1379
- [8] Heckert P A, Zeilik II M. *AJ*, 1981, 86: 1076
- [9] Davis L J, Greenstein J L. *ApJ*, 1951, 114: 206
- [10] Whittet D C B. *Dust in the galactic environment*. Bristol: IOP 1992: 306
- [11] Spitzer L. *Physical processes in the interstellar medium*. New York: Wiley-Interscience, 1978: 333
- [12] Duley W W. *ApJ*, 1978, 219: L129
- [13] Mathis J S. *ApJ*, 1986, 308: 281
- [14] Serkowski K. In: Greenberg J M, van de Hulst H C eds. *Interstellar Dust and Related Topics*, 1973, IAU Symposium, 52: 145 Serkowski K. *ApJ*, 1975, 196: 261
- [15] Martin P G, Whittet D C B. *ApJ*, 1990, 357: 113
- [16] 姚永强, 王益萍等. *天文学报*, 1999, 40(2): 213
- [17] Tamura M, Fukagawa M, Murakawa K, et al. In: Fineschi S ed. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 2003, 4843: 190
- [18] Kandori R, Kusakabe N, Tamura M, et al. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 2006: 6269
- [19] Bastien P, Landstreet J D. *ApJ*, 1979, 229: 137
- [20] Hough J H, Bailey J, McCall A, et al. *MNARS*, 1981, 195: 429
- [21] Yao Y Q, Hirata N, Ishii, et al. *ApJ*, 1997, 490: 281
- [22] Tamura M, Gatley I, Joyce R R, et al. *ApJ*, 1991, 378: 611
- [23] Weintraub D A, Kastner J. *ApJ*, 1993, 411: 767
- [24] Weintraub D A, Kastner J H. *ApJ*, 1996, 458: 670
- [25] Kandori R, Tamura M, Kusakabe N, et al. *PASJ*, 2007, 59: 487
- [26] Yamashita T, Sato S, Nagata T, et al. *ApJ*, 1989, 336: 832
- [27] Hodapp K W. *A&A*, 1984, 141: 255
- [28] Elsasser H, Staude H J. *A&A*, 1978, 70: L3
- [29] Minchin N R, Hough J H, McCall A, et al. *MNARS*, 1991, 251: 508
- [30] Minchin N R, Hough J H, McCall A, et al. *MNRAS*, 1991, 249: 707
- [31] Minchin N R, Hough J H, McCall A, et al. *MNRAS*, 1991, 248: 715
- [32] Hough J H, Axon D J, Burton M G, et al. *MNRAS*, 1986, 222: 629
- [33] Genzel R, Stutzki J. *ARA&A*, 1989, 27: 41
- [34] Jiang Z B, Tamura M, Fukagawa M, et al. *Nature*, 2005, 437: 112
- [35] Tamura M, Kandori R, Kusakabe N, et al. *ApJ*, 2006, 649: L29
- [36] Yao Y Q, Ishii M, et al. *ApJ*, 2000, 542: 392
- [37] Jiang Z B, Yao Y Q, Yang J, et al. *AJ*, 2001, 122: 313
- [38] Bastien P, Menard F. *ApJ*, 1990, 364: 232
- [39] Bastien P, Menard F. *ApJ*, 1988, 326: 334
- [40] Whitney B A, Hartmann L. *ApJ*, 1993, 402: 605
- [41] Fischer O, Henning T, Yorke H W. *A&A*, 1994, 284: 187
- [42] Fischer O, Henning T, Yorke H W. *A&A*, 1996, 308: 863

- [43] Vrba F J, Strom S E, Strom K M. *AJ*, 1976, 81: 958
- [44] Weintraub D A, Kastner J H, Mahesh A. *ApJ*, 1994, 420: L87
- [45] Yamashita T, Sato S, Nagata T, et al. *A&A*, 1987, 177: 258
- [46] Canto J, Rodriguez L F, Barral J F, et al. *ApJ*, 1981, 244: 102
- [47] Kaifu N. In: Peimbert M, Jugaku J eds. *Star Forming Regions*, IAU Symposium, 1987, 115: 275
- [48] 石 惠, 韩金林. *天文学进展*, 2008, 26(4): 336
- [49] Kobayashi Y, Kawara K, Maihara T, et al. *PASJ*, 1978, 30: 377
- [50] Dyck H M, Lonsdale C J. *AJ*, 1979, 84: 1339
- [51] Hodapp K A. *A&A*, 1987, 172: 304
- [52] Shu F H, Adams F C, Lizano S. *ARA&A*, 1987, 25: 23
- [53] Zaritsky D, Shaya E J, Tytler D, et al. *AJ*, 1987, 93: 1514
- [54] Jarrett J H, Novak G, Xie T, et al. *ApJ*, 1994, 430: 743

Near-infrared Polarimetry in Study of Star Formation Regions

CHEN Zhi-wei, JIANG Zhi-bo

(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Near-infrared polarization is an effective technique in star formation research. With near-infrared polarimetry astronomers have known a lot about star formation regions. This article describes several aspects of near-infrared polarization in star formation research, each one is very useful for our understanding of the formation process of protostars.

A near-infrared polarimeter is needed to be installed upstream of the camera equipped for a telescope which is designed to obtain near-infrared polarization measurements. The near-infrared polarimeter mainly consists of an achromatic ($1\sim 2.5\mu$) half-wave plate and a polarizer located upstream of the camera. The achromatic half-wave plate is designed to be rotatable and sometimes retractable. The polarizer is always a cold wire grid fixed in a plane, e.g. the cold filter wheels of the camera. A calibration polarizer must be installed upstream of the achromatic half-wave plate for measuring the polarization efficiency of the polarimeter.

From optical to near-infrared wavelength range, polarizations of YSOs are always wavelength dependent. Polarizations of YSOs are composed of intrinsic polarizations and interstellar polarizations. The intrinsic polarizations are mainly derived from scattering by particles around YSOs, while the interstellar polarizations are mainly derived from dichroic absorption by interstellar medium aligned by interstellar magnetic field. So the wavelength dependence of intrinsic polarizations are quite different from that of interstellar polarizations because of different polarization producing mechanism.

Infrared reflectional nebulae (IRN) is a kind of infrared nebulae that shows high degree polarizations and centrosymmetric polarization vectors throughout the infrared nebulae. There is

a close relationship between IRN and YSO. It is generally accepted that IRN is illuminated by YSO located at the center of IRN, and the illuminating source can be identified by measuring the centroid of IRN's polarization vectors. IRN arises naturally because of mass outflow of YSOs. It is generally believed that IRN is due to the radiation escaped into the polar regions above and below the optically thick circumstellar disk, the extension of IRN tends to be consistent with that of mass outflow. Thus IRN is a morphological tracer of the mass outflow.

A number of YSOs which are deeply embedded in the molecular cloud and not detectable in the wavelengths less than $2 \mu\text{m}$ are so-called deeply embedded sources (DEs), which can be identified through near-infrared polarizations. H_2O masers are always detected in the vicinity of deeply embedded sources while far-infrared and radio sources show bad correlations with DEs.

It is generally believed that there are circumstellar disks around YSOs, especially for early stage YSOs. There are many YSOs whose near-infrared polarization vectors have showed so-called "polarization disks" in the vicinity of YSOs. Polarization disks are mainly derived from multiple-scattering or dichroic absorption by circumstellar particles in disks, and can trace disks well.

There are close relationships between polarization vectors of YSOs and the magnetic field in star formation regions. If the polarization of a member star is mainly due to scattering, and the polarization vector will be perpendicular to the magnetic field in the molecular cloud, and if the polarization is mainly due to dichroic absorption, the polarization vector will be parallel to the magnetic field. Thus in a star formation region, the extensions of polarization vectors of all member stars will reveal the magnetic field in this region. Can reveal the structure of the magnetic field.

Extinction is too large for some deeply embedded YSOs to be detected in near-infrared. Extending the wavelengths to middle-or far-infrared can avoid this problem. In MIR and FIR those deeply embedded YSOs can be detected directly without the analysis of the polarization vectors. In MIR and FIR polarization is perpendicular to magnetic field because of grain's thermal radiation. So the MIR and FIR polarizations can also reveal the magnetic field as well as near-infrared polarizations.

Key words: star formation; molecular cloud; near-infrared polarization