

文章编号: 1000-8349(2008)04-0336-13



分子云磁场与尘埃导致的偏振

石 惠, 韩金林

(中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

摘要: 磁场对分子云及其中的恒星的形成和演化起到重要的作用。分子云磁场的探测方法主要是谱线塞曼效应、尘埃热辐射的偏振, 以及谱线的线偏振观测。利用谱线的塞曼效应可以直接测量视线方向的磁场强度。尘埃热辐射偏振可以有效地示踪磁场方向在天球上的分布。分子云内部的磁场会受到不同物理过程的影响。高分辨率观测可以研究磁场扰动的细节, 低分辨率观测可以得到分子云甚至银河系大尺度磁场的宏观信息。只有多波段的观测才能全面地认识分子云磁场与各种物理过程的联系。该文对分子云尘埃热辐射偏振的观测情况做了调研, 总结了分子云大尺度磁场的研究现状和发展前景。

关键词: 分子云; 磁场; 尘埃热辐射; 偏振

中图分类号: P155

文献标识码: A

1 引 言

分子云作为星际介质的重要组成部分, 是恒星诞生的摇篮。对分子云, 我们现在还有非常多的疑问。如分子云是如何塌缩形成恒星的? 又是依靠什么力量来抗衡强大的引力使得分子云不那么快的塌缩下来? 恒星尤其是大质量恒星在形成过程中都经历了什么阶段, 在这些阶段中哪些因素起到了重要的作用? 对于这些问题人们提出了各种各样的模型和解释。Bourke 和 Goodman^[1]总结了两种模型: 以磁场机制为主导的准静态模型(quasi-static model)和以湍流作用为主导的湍流模型(turbulent model)。他们认为以目前的数据并不能很强烈地支持哪种模型, 这也可能是因为主导机制与作用区域有关。要想判断这两种模型, 需要对磁场尤其是中心密集区域的磁场做大量的测量, 最好能得到三维的云和核的磁场结构。由此可见, 分子云磁场的研究是分子云各种问题研究的关键点。

Heiles 和 Crutcher^[2]利用 8 662 颗星的星光偏振数据得到了整个银河系的磁场基本平行

收稿日期: 2007-11-12; 修回日期: 2008-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10521001)

于银盘的结果。目前最完整的银河系 CO 巡天^[3] 给出巨分子云基本分布在盘中, 那么这些分子云中的大尺度磁场与前面所探测出来的银河系的大尺度磁场究竟存在着怎样的关联? 如果分子云在塌缩过程中仍然保留了原来的大尺度磁场信息, 那么观测到的该分子云的平均磁场方向应该更趋向于与银盘平行, 更确切一点地说, 是依循该分子云所处位置的银河系大尺度磁场的方向。要判断这是否正确, 最好的办法就是直接对大量分子云 (尤其是巨分子云) 进行大尺度磁场方向分布的测量。目前测量分子云磁场的方法主要是通过测量尘埃热辐射的偏振位置角分布来反推磁场的分布。形状不对称的尘埃颗粒在磁场中会沿磁力线排列^[4], 尘埃颗粒的热辐射是带有偏振的, 因此偏振位置角分布与磁场方向存在一定的联系。观测表明, 通过这种方法所揭示的分子云磁场结构跟理论上推测的磁场结构基本相符^[5,6]。由于分子云更容易沿磁力线塌缩, 理想情况下分子云会呈典型的沙漏状^[5,6]。

本文首先介绍分子云磁场的几种测量方法; 然后介绍和分析了目前分子云磁场的观测结果, 包括较高分辨率的观测和低分辨率的观测两部分; 最后综合这些观测结果, 讨论未来关于分子云大尺度磁场的研究前景。

2 分子云中的磁场及测量

1 分子云概况

分子云主要由氢分子 H_2 组成, 另外还有 He、HI 等分子和原子。目前在分子云中已探测到的各种分子有一百多种, 包括主要的示踪分子 CO (其丰度仅为 H_2 的 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ^[7]), 以及其他一些低丰度的分子, 如 CS、 H_2CO 等。由于直接探测 H_2 有困难, 人们主要通过对丰度较低的 CO 分子的观测来了解分子云的各种特性^[7]。从 1970 年第一次发现 CO 分子开始, 人们便对分子云做了各种不同的 CO 巡天。目前最完整的银河系 CO 巡天 (见参考文献 [3] 中的图 2) 是由美国天体物理中心 (CfA) 和 Cerro Tololo 美洲天文台 (CTIO) 的两台 1.2 m 毫米波望远镜共同观测完成。由于分子云中还充斥着大量的尘埃颗粒, 对尘埃颗粒的观测也是分子云研究的一种重要途径。

2.2 分子云中的磁场

分子云的磁场对于分子云的能量传输和动力学演化都起着重要的作用^[7]。比如磁压可以平衡引力, 从而在一定程度上减缓了分子云的塌缩速度; 磁制动效应通过输出云的角动量, 保证了分子云在塌缩过程中不会因过大的角速度而崩溃, 分子云的转动轴趋向于与磁场平行, 更易在磁场方向上发生塌缩; 双极扩散可以减小分子云塌缩过程中的磁流, 避免恒星形成时因磁通量守恒而导致出现高磁场星的问题。因此, 观测分子云中的磁场有助于了解分子云以及其中恒星的形成与演化。目前, 不清楚磁场在恒星形成过程中是主要决定因素还是辅助因素。这可分为两个最基本的问题^[1]: (1) 恒星形成过程中的主导因素是什么, 磁场还是湍流? (2) 磁场在恒星形成的各个阶段中分别起到什么作用?

如果磁场要抗衡分子云的塌缩, 必须要有足够高的强度。在有些分子云中, 磁场可以达到这种要求, 但大多数分子云的磁场并不是很强 (约 $1 \times 10^{-9} T$)^[8]。磁场只对带电粒子有作用, 所以分子云应有足够高的电离度才能保证通过磁场对其起到支撑的作用。另外在沿着磁力线方向上磁场对云的支撑作用不大。当磁场不够强, 或者分子云电离度很弱的时候, 尤其是在沿着磁力线的方向上, 磁场有可能没有办法与塌缩抗衡, 这就需要其他的机制来补充, 比如湍流。

现在的观点倾向于认为磁场与湍流结合起来通过磁流体力学过程共同支撑分子云^[7]。

另外,分子云在形成过程中其原始的磁场受到相应的扰动,那么经过各种阶段的演化之后,它的磁场相对于原始的磁场究竟发生了多大的变化?很可能云内的磁场虽然发生了变化,但其平均的大尺度磁场仍然被保留了下来,一些研究已经证实了这个观点^[9-11]。

2.3 分子云中磁场的测量方法

目前有多种方法可测得磁场的信息,比如说同步辐射、法拉第旋转等。同步辐射需要相对论电子,这种辐射在分子云中是非常微弱的;法拉第效应是沿视线方向所有磁场与电子密度的积分效应,没有办法得到特定分子云的磁场;另外利用 MHD 扰动导致的线宽也可用来估计磁场强度,但涉及到的运动过程太多。因此这些方法并不适用于分子云。探测分子云磁场常用的方法主要有以下三种^[12]:

(1) 塞曼分裂 (Zeeman splitting)。塞曼效应是唯一可以直接测量云中视线方向的磁场强度 B_{\parallel} 的方法。云中的磁场一般都很弱,只有强的脉泽源(如 OH、H₂O 脉泽)以及一些低频的原子或分子谱线(如: OH、HI、一些射电复合线、CH、C₄H、C₂S 等^[2])可用于测量塞曼分裂。分子密度大的区域磁场会相对强一些,也会产生更明显的塞曼分裂,如猎户座星云(OMC1)中某些地方的磁场 B_{\parallel} 高达 10^{-8}T ^[2]。用塞曼分裂的方法无法得出磁场方向的分布。

(2) 被排列的尘埃颗粒 (dust grains) 引起的偏振^[4]。尘埃颗粒因各种因素(如所附的顺磁性掺杂物受到磁场的影响)会沿磁力线排列,通常其短轴趋向平行于磁场方向。从图 1 可以看出,如果有不带偏振的背景星光经过尘埃颗粒,沿颗粒长轴方向的电矢量比短轴方向的电矢量衰减更为严重,使得星光产生短轴方向的偏振。从图中可以看出星光偏振的方向是平行于当地磁场方向的。另一方面,被排列的尘埃颗粒本身的热辐射在长轴方向强于短轴,导致尘埃热辐射的偏振,其偏振电矢量方向与当地磁场方向垂直。目前,尘埃颗粒的排列机制并不十分清楚^[4],有可能颗粒长轴是平行而非垂直于磁场,则星光偏振或热辐射偏振的方向与磁场方向之间的关系就与前面所描述的相反。通过观测这种尘埃颗粒的偏振辐射,可以反推出分子云及介质中的磁场分布。可以利用偏振位置角的弥散程度粗略地估计出磁场的强度,但仅在角度弥散较小的情况下有效(如角度弥散小于 25°),这种方法称为 Chandrasekhar-Fermi(C-F) 方法^[13]。

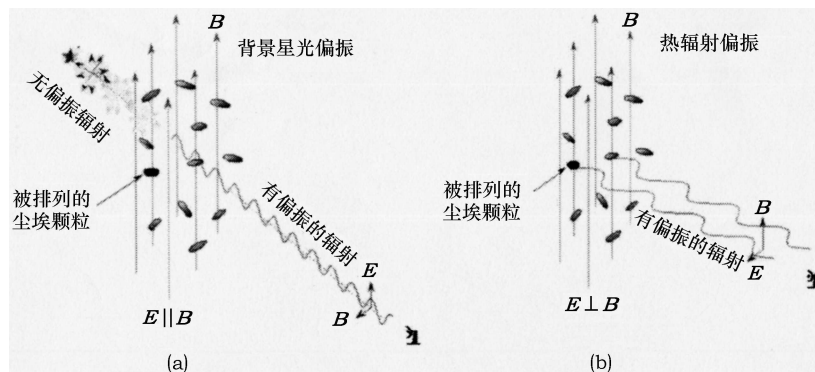


图 1 被磁场排列后的尘埃颗粒示踪磁场方向的原理图^[4]

(a) 因尘埃散射引起的星光偏振; (b) 尘埃热辐射的偏振

(3) 谱线线偏振。Goldreich 和 Kylafis 提出星际介质可以产生带有一定程度线偏振的谱线 (Goldreich-Kylafis 效应^[14,15]), 它也可以用来表征分子云中磁场的分布情况。这时 C-F 方法在一定程度上仍然可用于估计磁场强度。即使是在磁场微弱无法测得塞曼分裂时, 对谱线线偏振的测量仍然可以推断平行于天空平面磁场 B_{\perp} 的分布。但是, 这个方法使用得很少, 主要问题在于谱线不是很强时, 探测谱线偏振的难度比较大。

原则上, 将方法 (1) 得到的视线方向的磁场与方法 (2)、(3) 得到的天空平面方向的磁场结合起来, 可以推导出分子云中磁场的三维结构^[16-18]。但实际情况是, 方法 (2)、(3) 只给出磁场的方向, 间接推出的强度置信度很低。另外, 这几种方法所探测到的磁场未必来自于同一个区域, 因此结合起来推断 3D 磁场结构的难度是很大的。

3 尘埃导致的偏振与分子云磁场

由前面的讨论可以看出, 得到分子云磁场方向分布最有效的方法就是观测尘埃颗粒所导致的偏振。下面举例介绍星光偏振和尘埃热辐射偏振的有关观测结果。

3.1 星光偏振

Pereyra 等人^[19] 曾经测量了一个纤维状的暗分子云 Musca 的背景星光偏振。图 2 就是其中一部分区域的偏振星图, 可以很容易看出分子云的轮廓。因为云中尘埃对光学的消光很严重, 只能在靠外层的部分才能看到很多背景星的星光偏振, 这也是单靠星光偏振揭示不了分子云内部磁场结构的原因。

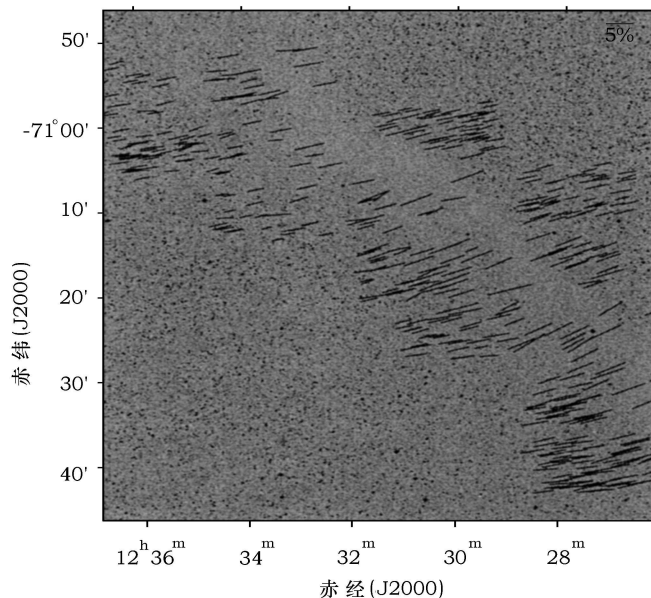


图 2 Musca 暗云的背景星的星光偏振图^[19]

该分子云的一部分区域, 黑色短线代表线偏振电矢量的方向, 长短代表了线偏振的程度, 右上角给出了偏振度为 5% 时偏振矢量的长度

Heiles 和 Crutcher [2] 将 Heiles [20] 编入的 8 662 个星光偏振数据画在银道坐标中 (见参考文献 [2] 中的图 1)。星光偏振分布表明 [21], 银河系以及其他旋涡星系的磁场大致都是沿银道面 (旋臂) 分布的。在附近暗云成分中 (如 Taurus), 磁场显现出与其尺度相似的起伏 (约 10 pc)。

背景星光偏振对于冷密的气体云来说并不是一个很理想的磁场示踪。通过尘埃热辐射偏振给出的磁场结构与通过背景星光偏振得到的同一区域的磁场结构也可能不一致 [21]。

3.2 分子云尘埃热辐射偏振的观测窗口和探测区域

星际尘埃的偏振热辐射几乎在分子云里的每一个部位都可以探测得到, 它可以示踪各种不同区域的磁场, 如分子云核、亮云的包层、金牛 T 型星周围的盘、年轻星体的包层, 以及其他源的尘埃辐射 [22]。通过热辐射偏振可以得到磁场的方向和强度信息。

分子云的热辐射谱峰通常落在大约 40~300 μm [22]。图 3 显示了在地面从远红外至毫米波的大气窗口。图 3(a) 表明 SOFIA (代表高空) 和 Mauna Kea (地处夏威夷, 代表地面大气窗口) 在这个频段范围的透明度, 说明辐射在这个范围内基本被大气所吸收, 只有在空间才可能更好地探测。图 3(b) 显示地面远红外、亚毫米、毫米波观测大多集中在 60, 100, 350, 450, 850, 1 300 μm 等这些波段, 由大气窗口和地面环境综合决定。我们有很多波段窗口可以用来观测分子云, 波长越短, 观测到的区域温度越高, 物理过程也更激烈, 磁场方向的变化要更剧烈。不同波段观测同一个分子云的偏振, 可揭示不同温度区域的磁场情况 [23,24]。分子云比较稠密时只有较大的尘埃颗粒才会被磁场重新排列 [9]。尘埃颗粒对更短波长 (如光学 / 近红外的) 的遮挡很严重, 难以观测其偏振。

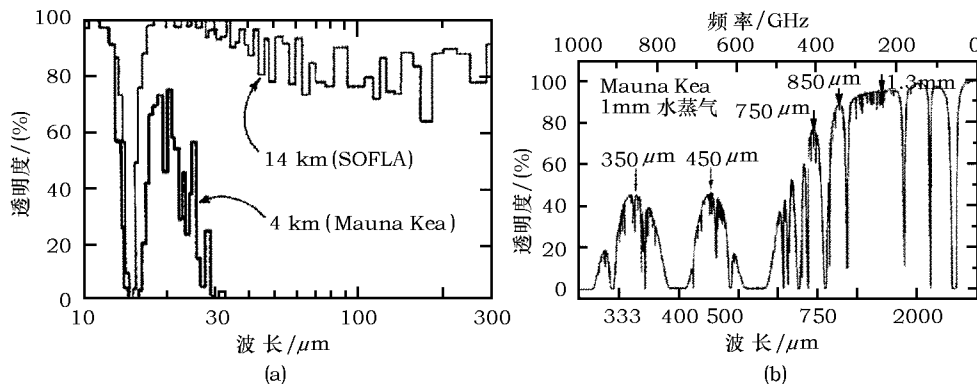


图 3 从远红外至毫米波的大气透明度情况 [22]

(a) 分别表示了 SOFIA 和 Mauna Kea 的观测窗口, 在这些波段下地面观测的透明度很低, 可观测波段范围很窄, 但 SOFIA 作为红外空间望远镜处于高空, 能观测的效率和波段范围就大大提高了;

(b) 主要是在更长波长上的地面大气透明度 (以 Mauna Kea 为例)

以下给出几个比较典型的例子来进一步说明。

同一分子云中, 越往分子云的外层, 温度越低, 尘埃热辐射的波长就越长。Schleuning 等人 [6] 比较了大质量恒星形成区 W3 区域热尘埃 (60 μm) 和冷尘埃 (100 μm 、350 μm 和光学的) 的磁场构形 (参见参考文献 [6] 中的图 4 和图 5)。对其冷尘埃的偏振测量揭示出这 3 个波段所示踪的磁场分布相互比较吻合, 拥有典型的沙漏形, 而热尘埃中呈现出的磁场明显受到了

剧烈扰动, 与外层冷尘埃的结果很不相同。

Kandori 等人^[25] 比较了 NGC 2024 中 $1.63\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$ 和 $850\ \mu\text{m}$ 3 个波段的观测 (如图 4 所示), 其中 $1.63\ \mu\text{m}$ 探测到的是星光偏振, 另外 2 个波段是云中尘埃热辐射的偏振。发现这 3 个波段在非中心区域中显现的磁场方向基本一致, 但在 $1.63\ \mu\text{m}$ 中靠近中心区域的星光偏振所示踪的磁场跟另外两个波段有所不同。Kandori 等人^[25] 认为这是因为 $1.63\ \mu\text{m}$ 的偏振主要是由云的外层尘埃引起的, 反映的是云外层的磁场, 而在其他两个波段测得的是分子云内部的磁场, 近红外波段下的偏振不能揭示冷密分子云内部的磁场^[21]。

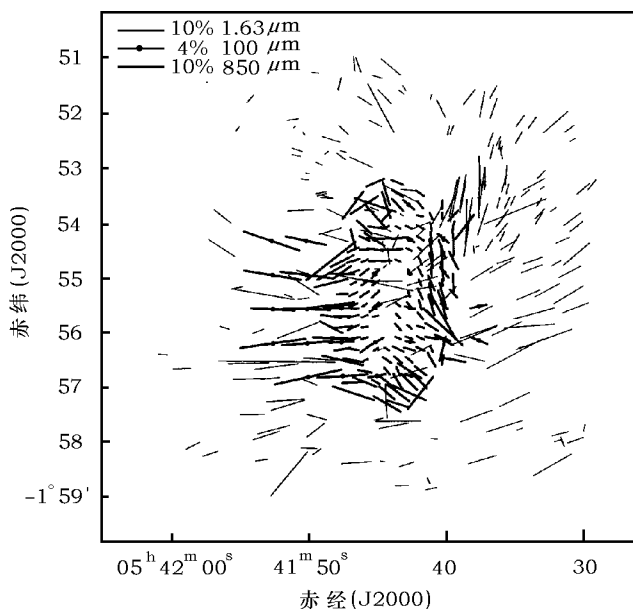


图 4 NGC 2024 在 3 个波段测量的磁场 (原图见参考文献 [25] 中 Fig.11)

图中为 \mathbf{B} 矢量, 线的长短表示测得的 \mathbf{E} 矢量的偏振度大小 (左上角标出了 3 个波段各自的长短标准)。

细线表示 $1.63\ \mu\text{m}$ ^[25]; 粗线表示 $850\ \mu\text{m}$ ^[26]; 粗线加点表示 $100\ \mu\text{m}$ ^[27,28] ($850\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$ 的数据是 \mathbf{E} 矢量的, 为便于比较, 将其角度旋转了 90° 得到磁场方向)

4 观测分子云尘埃热辐射偏振的主要设备及主要结果

世界上已有一些望远镜可以做远红外、亚毫米的偏振观测。限于灵敏度, 可精确地测量偏振的分子云并不多。下面总结世界上主要远红外、亚毫米望远镜的观测情况, 以反映目前分子云磁场结构的观测研究现状。

我们注意到, 一些设备的分辨率可高达亚角秒 (如 SMA), 而有些只能到角分甚至度的量级 (如 SPARO、Archeops 等)。我们重点总结了目前所有的分辨率低于 $10''$ 的大视场偏振观测 (如表 1 所示), 其中分辨率在 $10''\sim 1'$ 之间的观测都是相对较高分辨率的观测, 成图范围一般都在 10 平方角分以内。表 1 给出了观测使用的望远镜和偏振计, 观测的分辨率以及观测波长, 观测到偏振的分子云数目及参考文献。JCMT 的分辨率比较高 ($14''$), 探测了很多包裹在分子云中原恒星核 (prestellar-core) 的偏振。原恒星核中已经发生了塌缩甚

至已经形成恒星, 对大尺度磁场有强烈的扰动, 尺度很小。由于单个核的偏振观测对大尺度磁场的研究没有太多意义, 因此本文没有将原恒星核的观测收集进来, 留待下次专门讨论。列在表 1 中的 JCMT 的观测, 虽然也是 $14''$ 的分辨率, 但视场比较大, 不仅观测了同一片天区多个核的偏振, 同时还观测了核与核之间的云介质的偏振情况, 可以反映出分子云中相对核在更大结构的磁场信息^[33]。同一个分子云可能是多个望远镜都进行了观测, 表 2 列出了所有的分子云各个波段的观测情况。从表 1 可以看到, 分辨率低于 $1'$ 的偏振观测比较少。鉴于低分辨率对于揭示分子云大尺度有很重要的意义, 下面通过介绍这些仅有的几个低分辨率观测设备, 来了解一下目前分子云大尺度磁场的研究情况。

表 1 分子云尘埃热辐射偏振的观测设备及分子云数目统计 (分辨率低于 $10''$)

望远镜 / 偏振计 ¹⁾	分辨率	观测波长 / μm	观测分子云数目	参考文献
KAO/Stokes	$22''$	60	3	[27]
	$35''$	100	7	[27]
CSO/Hertz	$20''$	350	7	[6, 42, 49]
	$18''$	450	1	[30]
JCMT/Aberdeen	$14''$	800	1	[51]
JCMT/SCU-POL	$14''$	850	9	[33, 44–46, 48, 50]
		800	1	[43]
NRAO/MILLIPOL	$30''$	1300	6	[41]
SPARO	$5'$	450	1	[40]
	$4'$	450	4	[9]
Archeops	$13'$	850	9	[10]
WMAP	2°	3.2 mm ~ 13 mm	全天	[37]

1): KAO, Kuiper Airborne Observatory^[29]; CSO, Caltech Submillimeter Observatory^[30]; JCMT, James Clerk Maxwell Telescope (<http://www.jach.hawaii.edu/JCMT/>); MILLIPOL, a millimeter/submillimeter wavelength polarimeter^[31]; SPARO, Submillimeter Polarimeter for Antarctic Remote Observations^[9,32]; Archeops^[10], a balloon bolometer experiment (<http://www.archeops.org>)

(1) SPARO(the Submillimeter Polarimeter for Antarctic Remote Observations)^[9,32]: 它是由美国西北大学设计的亚毫米偏振计, 安装在位于 Amundsen-Scott 南极站的 2m 望远镜 Viper 上, 其分辨率只有 $4'$ 。目前已经发表了 NGC 6334、Carina Nebula、G333.6-0.2 和 G331.5-0.1 四个巨分子云的磁场 (见参考文献 [9] 中的图 1), 每个分子云都观测了 $1^\circ \times 1^\circ$ 的天区。除了 NGC 6334 外其他三个分子云的大尺度磁场基本与银道面平行。Li 等人^[9]利用 Heiles^[20] 的星光偏振数据估计了 NGC 6334 所处的银河系局域的大尺度磁场, 发现分子云 NGC 6334 的大尺度磁场与银河系局域大尺度磁场基本一致, 这些观测一定程度上肯定了分子云在形成过程中保留了银河系大尺度磁场的说法。

(2) Archeops^[10]: 它是承载在高空气球上的 1.5m 望远镜, 目的是为了研究宇宙微波背景辐射 (CMB)。它有几个可观测波段, 其中在 $850 \mu\text{m}$ (353GHz) 可以观测偏振, 分辨率为 $13'$ 。

银河系中的分子云的尘埃热辐射无疑是对 CMB 的一种前景污染。图 5 显示了 CMB 与各种前景辐射的相对贡献, 包括了同步辐射、自由-自由辐射、尘埃热辐射。可以发现, 在 70GHz 左右观测 CMB 时所受到的前景污染是最小的, 而 Archeop 353GHz 所观测到的主要是来自分子云尘埃热辐射的贡献。因此 353GHz 的偏振观测是分子云大尺度磁场研究的一条途径。Benoit 等人^[10] 已经计算出 Cassiopeia、Taurus 和 GemOB1 巨分子云在 353GHz 下的

平均磁场方向,同时还计算了银盘附近正负两度范围内弥散介质的平均磁场方向。其结果均很好地支持了分子云大尺度磁场沿银道面分布的观点。这个项目的最新观测^[35,36]覆盖了更大的范围,但是作者没有给出更多的平均磁场信息。

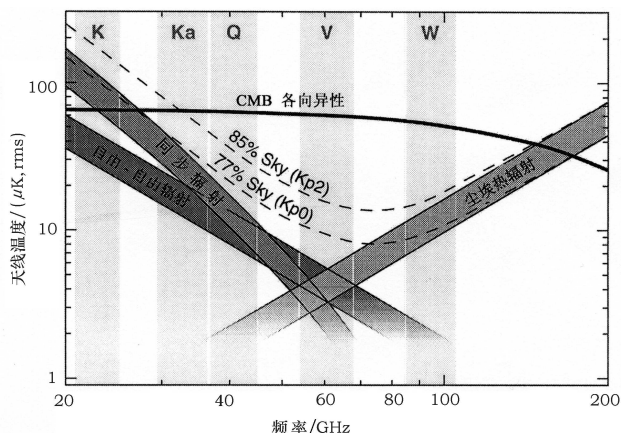


图 5 CMB 以及各种银河系前景辐射的相对贡献的波段示意图^[34]

其中 K-W 这 5 个阴影带表示了 WMAP 所观测的 5 个波段

(3) WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)^[37]: 它是研究 CMB 各向异性的卫星,图 5 标示 K-W 五个波段,均可偏振观测,各波段成图分辨率均平滑到 2° 。由图 5 可看出,在 W 波段测得的对 CMB 的污染主要是尘埃热辐射偏振,在这个波段下的偏振图应该能够从一定程度上反映出银河系分子云大尺度磁场的信息。图 6 是已发表的 WMAP 在 W 波段下的全天空偏振图。可以看到主要的偏振明显集中在银盘上,偏振电矢量与银盘垂直,这说明分子云中大尺度磁场是与银道面平行的。但 W 波段观测到的应该是很冷的尘埃颗粒,可能是很靠分子云边缘的区域,可以认为是盘间弥漫的星际介质成分。因此,关于分子云形成过程中保留了原始大尺度磁场信息的说法,得到了一定程度的证实,但要了解分子云内部不同空间层次的大尺度磁场的残留情况,需要更高频段(大于 300GHz)的低分辨率观测。

目前类似于 WMAP 这种全天性的偏振观测项目除了 Archeops 以外,有些还未正式观测,有些还未发表数据。

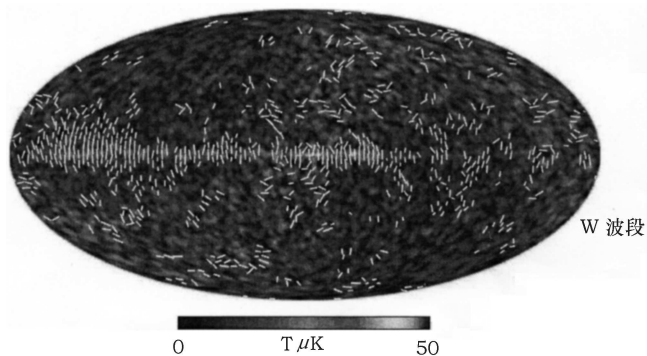


图 6 W 波段的全天空偏振图^[37](E 矢量)

5 数据汇总与讨论

本文汇总了已有的分子云观测数据, 并根据发表出来的偏振位置角数据计算了每个分子云的平均磁场方向, 得到平均磁场方向与银道面的夹角。计算平均磁场方向时, 利用高斯拟合的方法拟合同一个分子云的偏振位置角分布, 其峰值所对应的角度即为平均磁场方向。为了方便比较, 将这些角度全部归算到银道坐标系中, 北银极方向为 0° , 自东向西逆时针增大。最后的结果列于表 2, 表中包含了从 $60\sim 1300 \mu\text{m}$ 的数据; 角度值表示的是分子云在对应波

表 2 根据目前已发表的分子云偏振观测得到的各波段下平均磁场方向与北银极的夹角 (自东向西逆时针增大)

名 称	$60\mu\text{m}$	$100 \mu\text{m}$	$350 \mu\text{m}$	$450 \mu\text{m}$	$850 \mu\text{m}$	$1300 \mu\text{m}$	参考文献
G359.9-0.05(SgrA)		62°			81°		[27, 40]
G0.67-0.03(SgrB2)	126°	128° (N) 66° (S)	-			170° (N) 122° (S)	[27, 41]
G15.0-0.7(M17)	170°	174°	144°		161° (SW)		[27, 42, 43]
G43.17+0.01(W49)						7°	[41]
G49.5-0.4(W51)		45°				121°	[27, 41]
G81.68+0.54(DR21)		170°			165°	157°	[27,41,44]
G81.72+0.57(DR21OH)					146°		[44]
G103.0+1.8(Cassi0)					121°		[10]
G105.8+0.6(Cassi1)					102°		[10]
G109.7+2.1(Cassi2)					134°		[10]
G113.2-2.7(Cassi3)					5°		[10]
G113.6-1.2(Cassi4)					93°		[10]
G115.0+2.4(Cassi5)					91°		[10]
G133.7+1.2(W3)	173°	145°	141°			36° (W)	[6,27,41]
G159.2-20.1(Barnard1)					138°		[45]
G159.3-20.1(Taurus1)					79°		[10]
G165.6-9.0(Taurus2)					47°		[10]
G193.0+0.0(GemOB1)					95°		[10]
G205.1-14.1(NGC 2071)					55°		[46,47]
G205.3-14.2(LBS23N)					43°		[46]
G205.4-14.4(NGC 2068)					116°		[48]
G206.55-16.35(NGC 2024)		20°			4°		[25,27,46]
G209.0-19.4(OMC1)		57°	56°	58°	58°	58°	[27,30,41,49,50]
G208.8-19.3(OMC2)			152°				[49]
G208.7-19.2(OMC3)			160°		160°		[33,49]
G209.2-19.5(OMC4)			14°				[49]
G287.3-0.6(Carina)					75°		[9]
G331.5-0.1					76°		[9]
G333.6-0.2					82°		[9]
G351.4+0.67(NGC 6334)					22°		[9]
G353.1+16.9(ρ OphA)					86°		[51]

段下测得的平均磁场方向与北银极方向的夹角(自东向西逆时针增大), 没有数值的说明目前还没有相应的观测, 符号“-”说明虽有观测但是因为数据的原因(太少或未给出)没有得出平均方向; 银心 SgrA 的观测情况没有收全, 因为这个地方的磁场情况比较复杂, 大尺度磁场不是很好描述, 仅仅将 Dotson 等人^[27]和 Novak 等人^[40]的观测列了出来, 后者是一个大范围低分辨率的观测, 很有代表性; 另外在这里只列出了从 60~1 300 μm 的观测数据, 没有包括 NGC 2024 的 1.63 μm 的观测(平均磁场方向与北银极夹角为 142°), NGC 2071 在 2.14 μm 也有观测(因为数据本身的原因未能计算出其平均角度); 最后, M17 和 ρOphA 在 850 μm 的数据其实是 800 μm 的观测, 为方便起见在这里归类到 850 μm 中。

如果分子云在形成中留下了银河系大尺度磁场的信息, 理想的情况下, 磁场与银盘平行, 偏振磁矢量与北银极的夹角接近于 90°。图 7 中显示多个波段的分子云磁场测量情况, 图中偏振矢量的长度与分子云成图尺度的平方根成正比。对于大质量分子云来说, 其云核的典型尺度大约为 1pc^[38], 低于 1pc 大小的观测很难反映分子云大尺度的信息。可以看出大部分分子云磁场角度分布比较凌乱, 只有 450 μm 和 850 μm 观测的分子云, 其平均磁场大部分倾向于与银盘面平行, 大致符合分子云大尺度磁场与银河系大尺度磁场的关系。这些偏振成图范围大的分子云数量不多, 总共只有 10 个左右。

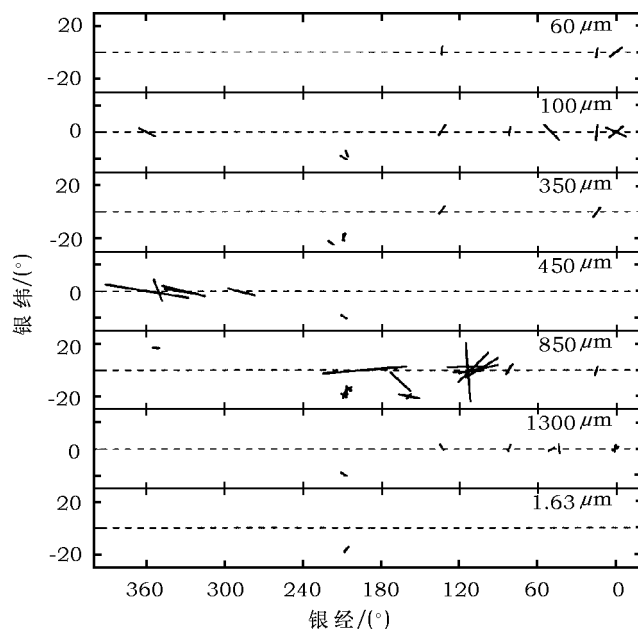


图 7 不同波段测量的分子云平均磁场方向分布(数据来自表 2)

分子云实际大小与图中矢量长度的平方成正比, 其范围从 0.043 pc(850 μm 的 ρOphA) 到 170 pc(450 μm 的 SgrA)。对于尺度小于 1 pc 的分子云, 本图均按 1pc 表示

为了研究分子云内部恒星形成区的结构以及物理过程, 目前分子云观测领域研究重点集中在发展更高精度的观测。目前可以使用的亚毫米阵 SMA(Submillimeter Array, 夏威夷) 可以看清云核中喷流或者分子外向流更靠近中心星体部分的结构, 可以更精准地研究吸积盘的形成和云核内部的磁场情况。地处阿尔卑斯山的毫米波天线阵 PdBI(Plateau de

Bure Interferometer)、加利福尼亚东部的毫米波阵 CARMA(Combined Array for Research in Millimeter wave Astronomy) 均可达到亚角秒的高分辨率。它们极高的灵敏度以及越来越大的带宽, 可以做更多的谱线研究。另外, 未来 5 年内可投入使用的还有 ALMA (the Atacama Large Millimeter Array) 和 EVLA(the Expanded Very Large Array), 以及更加长远规划中的 SKA(Square Kilometre Array)。这些高分辨率设备的出现为包括恒星形成在内的各种毫米、亚毫米波的研究带来了许多新的机遇。

但是, 高分辨率的设备无法提供足够大的视场, 从分子云大尺度磁场和结构的角度来说, 不利于大尺度磁场的研究。分子云尘埃热辐射偏振对宇宙微波背景是前景污染, 为了更好地研究这些偏振情况, 目前天文学家们已经提出了多个做前景偏振的全天空观测项目(见参考文献 [39]), 包括了 Archeops、BOOMERanG 2K、MAXIPOL、PILOT 和 Plank HFI。这些项目大部分覆盖了两个以上的波段, 分辨率均低于一个角分。其观测数据是研究分子云大尺度磁场的一种重要途径, 可以大量补充现在的结果。

致谢

非常感谢两位审稿人的认真审阅以及为本文提出的详尽的修改意见。感谢李葭博士认真阅读本文稿, 并给出了许多非常宝贵的建议。

参考文献:

- [1] Bourke T L, Goodman A A. IAUS, 2004, 221: 83
- [2] Heiles C, Crutcher R. Magnetic Fields in Diffuse HI and Molecular Clouds, Lect. Notes Phys. 2005, 664: 137
- [3] Dame T M, Hartmann D, Thaddeus P. ApJ, 2001, 547: 792
- [4] Lazarian A. JQSRT, 2007, 106: 225
- [5] Schleuning D A. ApJ, 1998, 493: 811
- [6] Schleuning D A, Vaillancourt J E, Hildebrand R H, et al. ApJ, 2000, 535: 913
- [7] 孙锦, 李守中. 分子天体物理学基础下册, 北京师范大学出版社, 2004
- [8] Downes D. IAUS, 1987, 115: 93
- [9] Li H, Griffin G S, Krejny M, et al. ApJ, 2006, 648: 340
- [10] Benoît A, Ade P, Amblard A, et al. A & A, 2004, 424: 571
- [11] Han J L, Zhang J S. A & A, 2007, 464: 609
- [12] Crutcher R M. mpge.conf. 2005, 103
- [13] Ostriker E C, Stone J M, Gammie C F. ApJ, 2001, 546: 980
- [14] Goldreich P, Kylafis N D. ApJ, 1981, 243: L75
- [15] Kylafis N D. ApJ, 1983, 275: 135
- [16] Myers P C, Goodman A A. ApJ, 1991, 373: 509
- [17] Lai S-P, Velusamy T, Langer W D. ApJ, 2003, 596: L239
- [18] Houde M, Bastien P, Dotson J L, et al. ApJ, 2002, 569: 803
- [19] Pereyra A, Magalhães A M. ApJ, 2004, 603: 584
- [20] Heiles C. AJ, 2000, 119: 923
- [21] Goodman A A. ASPC, 1996, 97: 325
- [22] Hildebrand R H, Davidson J A, Dotson J L, et al. PASP, 2000, 112: 1215
- [23] Brogan C L, Troland T H, Roberts D A, et al. ApJ, 1999, 515: 304
- [24] Hildebrand R H, Dotson J L, Dowell C D, et al. ApJ, 1999, 516: 834
- [25] Kandori R, Tamura M, Kusakabe N, et al. PASJ, 2007, 59: 487
- [26] Matthews B C, Fiege J D, Moriarty-Schieven G. ApJ, 2002, 569: 304

- [27] Dotson J L, Davidson J, Dowell C D, et al. *ApJS*, 2000, 128: 335
- [28] Hildebrand R H, Dotson J L, Dowell C D, et al. *ASPC*, 1995, 73: 97
- [29] Platt S R, Hildebrand R H, Pernic R J. *PASP*, 1991, 103: 1193
- [30] Schleuning D A, Dowell C D, Hildebrand R H, et al. *PASP*, 1997, 109: 307
- [31] Clemens D P, Kane B D, Leach R W, et al. *PASP*, 1990, 102: 1064
- [32] Renbarger T, Chuss D T, Dotson J L, et al. *PASP*, 2004, 116: 415
- [33] Matthews B C, Wilson C D, Fiege J D. *ApJ*, 2001, 562: 400
- [34] Bennett C L, Hill R S, Hinshaw G, et al. *ApJS*, 2003, 148: 97
- [35] Ponthieu N, Macías-Pérez J F, Tristram M, et al. *A & A*, 2005, 444: 327
- [36] Macías-Pérez J F, Lagache G, Maffei B, et al. *A & A*, 2007, 467: 1313
- [37] Page L, Hinshaw G, Komatsu E, et al. *ApJS*, 2007, 170: 335
- [38] Garay G, Lizano S. *PASP*, 1999, 111: 1049
- [39] Martin P G. *EAS*, 2007, 23: 165
- [40] Novak G, Chuss D T, Renbarger T, et al. *ApJ*, 2003, 583: L83
- [41] Kane B D, Clemens D P, Barvainis R, et al. *ApJ*, 1993, 411: 708
- [42] Houde M, Bastien P, Dotson J L, et al. *ApJ*, 2002, 569: 803
- [43] Vallée J P, Bastien P. *A & A*, 1996, 313: 255
- [44] Vallée J P, Fiege J D. *ApJ*, 2006, 636: 332
- [45] Matthews B C, Wilson C D. *ApJ*, 2002, 574: 822
- [46] Matthews B C, Fiege J D, Moriarty-Schieven G. *ApJ*, 2002, 569: 304
- [47] Tamura M, Kandori R, Hashimoto J, et al. *PASJ*, 2007, 59: 467
- [48] Matthews B C, Wilson C D. *ApJ*, 2002, 571: 356
- [49] Houde M, Dowell C D, Hildebrand R H, et al. *ApJ*, 2004, 604: 717
- [50] Coppin K E K, Greaves J S, Jenness T, Holland W S. *A & A*, 2000, 356: 1031
- [51] Holland W S, Greaves J S, Ward-Thompson D, Andre P. *A & A*, 1996, 309: 267

Magnetic Fields in Molecular Clouds and Polarization from Dust

SHI Hui, HAN Jin-lin

(*National Astronomical Observatories, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*)

Abstract: Molecular clouds are the birthplace of stars. How does a molecular cloud collapse to form stars? Quasi-static model shows that magnetic field is the main force to balance gravitational force, while the turbulence model emphasizes that turbulence plays a more important role than magnetic field. It is not clear how important the magnetic field is during the star formation process. Measuring magnetic field of molecular clouds is very crucial to many unanswered questions.

There are three methods to measure the magnetic field of molecular clouds: Zeeman splitting, dust polarization and spectral linear polarization. Magnetic field strength in the clouds can be measured with the first method. Polarization of dust thermal emission is widely used to trace

the field orientations in clouds. Observations at different wavelengths probe different regions of clouds, from a whole cold cloud to the hot core. Magnetic fields are always strongly disturbed near the core because of drastic physical processes. Low resolution observations can reveal the large scale magnetic field structures of molecular clouds. Though magnetic fields inside clouds have been disordered, the large scale magnetic field structures may still be preserved from the fields frozen in interstellar medium, which are expected to be predominately parallel to the Galactic plane.

We summarized the low resolution polarized observations of dust thermal emissions, and collected all the results of observed thermal polarization from dust grains. The mean polarization angles of those clouds were calculated and displayed according to the measured scale. Only a few clouds have low resolution observations done, which show the magnetic field aligned to the Galactic plane. Much more powerful telescopes in mm (sub-mm) wavebands have been proposed to do observations with much higher resolutions and sensitivities. We noticed that some lower resolution ($> 1'$) observations in the same wavebands covering the whole sky in future will show much clearer images of large scale magnetic field structures of molecular clouds.

Key words: molecular clouds; magnetic fields; dust thermal emission; polarization

* * * * *

《天文学进展》 2009 年征订启事

《天文学进展》创刊于 1983 年，为中国天文学会学术期刊。被收录为中国科学引文数据库来源期刊。

《天文学进展》主要刊登内容：反映国内外天文学科最新研究进展的评述性文章、高水平的科研论文、学科前沿介绍、科研简讯、专题讲座、学术活动报道。

读者对象：天文学及相关学科的科研人员、高等院校教师、研究生及具有相当天文学基础知识的天文学爱好者。

《天文学进展》为季刊，每季末 20 日出版，16 开本；每期定价 25 元，全年 100 元。

统一刊号：CN 31-1340/P，邮发代号：4-819，全国各地邮局均可订阅。

欢迎订阅 2009 年《天文学进展》！

《天文学进展》编辑部

2008 年 12 月