

宇宙磁场*

韩金林^{1,2,†} 徐钧¹

(1 中国科学院国家天文台 北京 100101)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

2020-04-30收到

† email: hjl@nao.cas.cn

DOI: 10.7693/wl20200601

Cosmic magnetic fields

HAN Jin-Lin^{1,2,†} XU Jun¹

(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 磁场在宇宙中无处不在, 贯穿各种天体。磁场对天体形成、辐射和演化起重要作用, 也是宇宙线研究的基础。以前人们对宇宙磁场的理解主要是来自对地球和太阳磁场的测量和物理解释。近20年来, 对宇宙更大尺度天体的磁场测量取得很大进展: 发现了银河系具备沿着银河旋臂的几万光年尺度磁场, 强度为2—4 μG ; 发现了银河系晕里具有环向磁场, 在银道面上下方向相反; 发现了银河系中心有极向磁场的观测证据; 发现了邻近旋涡星系可能具有万光年尺度磁场的证据; 发现了星系团几千万光年范围内磁场存在的证据。宇宙学模拟也显示在宇宙超大纤维结构中应该有磁场存在。这些磁场可能都是宇宙早期产生并在天体形成和演化过程中得以发扬光大。

关键词 天体, 磁场, 银河, 星系

Abstract Magnetic fields are ubiquitous in the universe, threading through all kinds of celestial bodies. They play a critical role in the formation, radiation and evolution of all kinds of these objects, and are an agent for cosmic ray propagation. Previously, our understanding of cosmic magnetic fields mainly came from observations and theoretical explanations of the solar and geomagnetic fields. In the last two decades, much progress has been made in the measurement of magnetic fields on larger scales: ordered magnetic fields along the spiral arms have been discovered in our Milky Way with a strength of 2—4 microGauss and a scale of several tens of thousand light years; toroidal magnetic fields have been found in the halo of the Milky Way with reversed directions below and above the Galactic plane; evidence for poloidal magnetic fields has been found near the center of the Galactic center; large-scale ordered fields with a scale length of several tens of thousand light years have also been revealed in nearby spiral galaxies and even in the clusters of galaxies with a scale length of tens of million light years. Simulations of cosmological structure formations also show that magnetic fields should exist in the filament structure. These magnetic fields are probably primordial fields generated in the early universe and then amplified during the formation and evolution of the structure and stars or galaxies.

Keywords celestial bodies, magnetic fields, the Milky Way, galaxies

* 国家自然科学基金(批准号: 11833009, 11988101)资助项目

1 引言

宇宙中的天体分多个层次,从小到大,有行星、恒星、星系、星系团、星系超团,到宇宙大尺度结构以至宇宙整体。我们生活在地球上,地球是一颗绕太阳公转的行星。太阳是银河系中千亿颗恒星之一。银河系是我们在宇宙中的家园,是一个扁平的、由亮星组成的旋涡状的星系。太阳在银河系旋涡接近边缘的地方。银河系是更大尺度的天体层次即本星系团的成员之一。星系团是宇宙中大尺度纤维结构中的节点。特别要强调的是,人类已经在所有层次的天体上探测到磁场或发现磁场存在的迹象^[1, 2]。但宇宙中的磁场是如何产生和演化的,一直是物理上和天体物理上的重大难题^[3]。

以前人们对宇宙中磁场的理解,主要是来自对地球和太阳磁场的详细测量。地球的磁场是我们熟知的,是偶极磁场,有南北两极,磁场强度大约0.5 G(注:天文界习惯地使用高斯作为磁场强度的单位,1 G=10⁻⁴ T)。如果地球没有磁场,没有电离层对地球的保护,地球上的人类生存环境就是另一种情形了。太阳的磁场是一个倾斜的偶极场,在日面宁静区的磁场强度约为1 G,在活动区黑子附近磁场强度高达上千高斯。太阳风就是沿磁场向外吹散的高能粒子流,波及地球。太阳风暴会影响地球的电离层和磁场结构,影响我们的通讯。目前人类只能测量地球和太阳表面和外围的磁场,对内部由动力学调制的磁场和磁场的产生维持过程永远无法探测。通过对地球和太阳磁场的观测,包括对部分太阳系行星和少量恒星磁场的探测,人类已经对行星和恒星这两个层次的小尺度天体磁场了解得比较多,建立了天体磁场的物理概念和演化图像,而对更大天体层次如银河系的微弱磁场和结构的了解相对较少。人们希望将小天体磁场的物理知识向更大宇宙尺度推演,企图理解宇宙更大尺度的磁场。

比恒星更大的天体层次是星系。银河系是我们居住的星系,大小约十万光年,是一个由亮星和气体组成的旋涡状星系,主要包括银核、银盘

和银晕几个部分。银河系有上千亿颗恒星,主要集中在银盘的几条旋臂上。银河系磁场极其微弱,但尤为重要。它不仅影响分子云及恒星的形成和演化,也对旋臂结构、星际气体动力学起平衡作用,还使宇宙射线产生偏转,甚至影响宇宙微波背景辐射偏振的测量。此外,宇宙线是来自宇宙空间的高能粒子。当带电荷的宇宙线在星际空间传播时,磁场对宇宙线高能粒子产生洛伦兹力,使宇宙线偏离原先的传播方向。因此,银河系磁场是研究宇宙线的成分、荷质比、传播路径和起源时不可缺少的基本要素。

在银河系之外,有很多星系。星系特别聚集的区域,就是星系团。20世纪80年代国际上开始掀起星系磁场研究的热潮。经过很多努力,用世界上大射电望远镜进行偏振成像,也只观测了几十个邻近旋涡星系的磁场强度分布和磁场空间取向分布,很难测量磁场的方向和极性。观测邻近星系中的磁场和星系团磁场,对理解星系磁场的起源和演化也非常重要。本文首先介绍银河系磁场的研究现状,然后简要介绍邻近星系和星系团的磁场观测结果。

2 银河系磁场的测量

银河系磁场在天体物理和宇宙线研究中非常重要。最早在1949年, Fermi提出银河系磁场对穿行在星际空间中的宇宙线粒子的作用成功地解释了银河背景辐射的起源^[4]。同年, Hiltner和Hall分别观测到了恒星星光的偏振^[5, 6],这是人类首次发现银河系磁场的存在,至今已有70年的历史了。后来,人们发现磁场在银河系中普遍存在,小到一天文单位(AU,即地球公转轨道的平均半径),比如恒星和恒星形成区或电离氢(HII)区中脉泽源的磁场,大到数千秒差距(kpc, 1 pc=3.26光年)沿旋臂的大尺度规则磁场。

对宇宙天体和弥漫介质中的磁场,人们是无法直接测量的。但在天体辐射产生和传播过程中,磁场会产生一些观测效应,因此可以利用磁场产生的物理效应来测量磁场。探测宇宙天体和

星际空间磁场的方法主要有五种：(1) 星际尘埃热辐射的偏振：星际空间有少许尘埃，其热辐射在毫米波、亚毫米波比较强。如果星际空间有磁场，磁场可使得形状不规则的尘埃微粒排列有序化，使得辐射呈现偏振。这个方法主要揭示星际云团内垂直视线方向的横向磁场的空间取向；(2) 星光偏振：恒星辐射的光一般不是偏振的，由于存在星际尘埃和磁场，使星光在星际介质中传播时因为沿磁场排列的尘埃会对星光产生各向异性吸收(消光)和散射，使得观测到的星光有少许(百分之几)偏振。这样的测量主要揭示恒星与我们之间所有云团尘埃消光的总效果，得到垂直视线方向概括性的磁场取向；(3) 塞曼分裂：宇宙中分子、原子的云团会产生谱线辐射，因为云团中磁场的存在，谱线会发生塞曼分裂。测量塞曼分裂谱线的强度比、谱线的圆偏振和线偏振，原则上可以推断云团中的磁场的三维矢量；(4) 弥漫星际空间的相对论电子在星际磁场中回旋运动，会产生同步射电辐射。测量同步辐射的强度和偏振，可以推断星际空间的磁场，特别是揭示垂直视线方向上的磁场在天空平面内的空间取向；(5) 河外背景射电源和脉冲星的法拉第旋率：射电源的偏振信号穿过星际甚至星系际介质时，因为弥漫于星际空间的磁场和热电子，其偏振电磁波的偏振面会产生法拉第旋转(图1)。偏振面旋转的角度 $\Delta\psi$ 与法拉第旋率(Rotation Measure, RM)和波长 λ 平方相关，即 $\Delta\psi = \psi - \psi_0 = \text{RM} \cdot \lambda^2$ 。法拉第旋率可以揭示视线方向上射电源到观测者之间的所有自由电子密度和磁场乘积的积分量，即

$$\text{RM} = 0.810 \int_{\text{source}}^{\text{Sun}} n_e \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l},$$

其中法拉第旋率RM的单位是 $\text{rad} \cdot \text{m}^{-2}$ ； n_e 是自由电子密度，单位是 cm^{-3} ； \mathbf{B} 是磁场，单位 μG ； $d\mathbf{l}$ 是指向我们的单位矢量，单位是pc。RM为正，表明磁场朝向我们；RM为负，表明磁场远离我们。通过测量多个频率上的偏振位置角就可以确定出射电源的RM值。对脉冲星而言，还可以通过脉冲在不同频率到达时间的差异确定电子密度，这样结合起来可以直接揭示银河系银盘大范围的磁场结构。

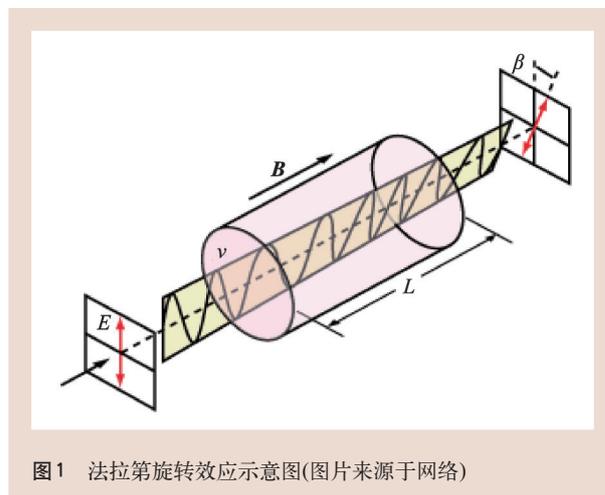


图1 法拉第旋转效应示意图(图片来源于网络)

银河系磁场发现之后的三四十年内，研究进展相对缓慢，主要是由于各种观测及校准很难，数据稀少，一些测量局限在太阳附近几千光年之内，更远一些的区域因缺乏探针而无法测量，因此难以研究银河系磁场的整体结构。从20世纪80年代后期开始，随着观测数据的积累，尤其是大量脉冲星的偏振测量，使得银河系磁场研究进入快速进展时期。

2.1 银盘区域的磁场

银盘是银河系内恒星最为集中的扁平盘状区域，有多条恒星明亮的旋臂。银河系的旋臂结构和位置可通过分子云和明亮恒星周围的电离氢区分布来示踪^[7]。邻近旋涡星系的偏振观测结果表明，大尺度磁场与旋臂结构具有很好的相关性^[8]。

几十年来陆续测量的9000多颗恒星的星光偏振只能揭示太阳附近几千光年范围内磁场的空间取向，不能给出磁场强度和方向信息。星光偏振测量结果^[9]表明银盘附近的磁场取向平行于银盘面。美国、日本、芬兰和其他国家仍有一些团队在红外波段测量更远的恒星星光偏振，揭示银河系更大范围的磁场。新近的红外和中红外波段星光偏振测量^[10]进一步验证了银盘中的磁场平行于银盘面这个结论。

两个测量宇宙微波背景的卫星 WMAP 和 Planck 卫星^[11, 12]在毫米波段测量了全天的同步辐射和尘埃热辐射，希望扣减银河系前景的辐射之

后得到宇宙微波背景的偏振。在测量得到的辐射中，90%以上的辐射都是银河系的贡献。因此，WMAP和Planck卫星给出了银河系内分子云中的尘埃热辐射偏振最好的观测(图2)。从图上的数据可以解读出，无论在哪个区域，分子云中的磁场都平行于银道面或者沿着分子云分布的纤维结构方向。随着观测设备灵敏度的提高，在毫米波段对云团磁场进行热辐射偏振测量的方法已经拓展到邻近的旋涡星系。

相当长一段时间以来，人们也希望测量银河系的同步辐射，揭示银河系的磁场。由于太阳处在银盘之中，能够测量到的银河系弥漫射电辐射其实是银盘内各区域偏振同步辐射经过星际空间介质的传播和法拉第旋转之后叠加在一起的综合数值。不同区域的辐射强度会因为距离不同而在叠加时有距离平方反比的加权。在同步辐射总强度图上，越靠近银道面、越往银河系中的区域，银河系的射电辐射总强度会越强。观测偏振时，不同距离的电磁辐射本身的偏振不同，又经受不同的法拉第旋转再耦合在一起，一定会产生消偏振。因此很难借此揭示银河系的磁场特征，因为远距离的偏振辐射更容易受星际介质的法拉第旋转而出现消偏振。在几百MHz频段的射电偏振观测结果一般仅反映离太阳1—2 kpc以内的小尺度磁场；在几个GHz频段的射电偏振辐射能够看得远一些，比如在5 GHz可以达几kpc远。能够清晰测量到偏振的区域往往是叠加效应不太严重的银河系外围区域。这种观测对研究银河的局部磁场是非常成功的^[13]。频率升高以后，法拉第旋转

效应和消偏振效应减弱，所以WMAP和Planck卫星在20 GHz以上观测的同步射电辐射，因为法拉第旋转效应比较小，反而能够显示银盘内磁场平行于银道面。

在银盘背后，有一批河外射电源辐射偏振信号。测量它们的法拉第旋率数据可以揭示银盘的磁场结构^[14—16]。它们的法拉第旋率包含银河系边缘到太阳系之间的银盘内星际介质的所有法拉第旋转，但与视线相切的旋臂区域的电子密度较高，更重要的是磁场基本与视线平行，因此法拉第旋转的贡献大。路径上其他区域的磁场与电子密度起伏一起随机叠加，会抵消其对法拉第旋转的贡献。因此河外射电源的平均法拉第旋率随银经的变化反映出一些旋臂切向区域的贡献及旋臂之间可能的磁场反转。在忽略射电源的本征RM和星系际空间的RM贡献的前提下，平均法拉第旋率随银经的变化被认为是内银河系方向磁场反转的标志。有人借助电子密度模型，根据法拉第数值的分布，构建出磁场模型^[14, 17—20]。注意到河外射电源的法拉第旋率是路径上的所有贡献的积分，旋臂之间的多次磁场方向反转的观测效应可能被抵消掉，因此据此还是难以揭示银盘磁场的三维结构。

银盘磁场的最佳测量来自于脉冲星数据。银河系发现了大量脉冲星，它们辐射偏振信号。脉冲星在银河系三维空间中广泛分布，其本身的法拉第旋转贡献几乎为零，测量到的法拉第旋率的数值反映了脉冲星到地球之间星际介质中磁场和电子密度的积分贡献。特别重要的是，脉冲星的脉冲在不同频率有到达时间的延时，即脉冲的色散 $DM = \int_0^D n_e dl$ ，它是测量星际热电子分布的唯一手段。结合脉冲星的RM和DM物理量，可以直接测量脉冲星到地球之间路径上的平均磁场 $\langle B_{||} \rangle = 1.232 \frac{RM}{DM}$ 。在20多年前，由于脉冲星的法拉第旋率数据比较稀少，同河外射电源的研究一样，人们只能通过磁场模型和电子密度分布模型综合拟合分析脉冲星数据研究磁场分布和强度^[21—23]。近年来因为大量脉冲星的发现，测量数据逐步增多。考虑到同一方向上距离分别为 d_0

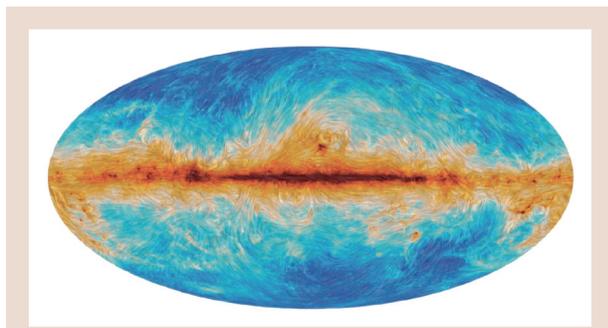


图2 Planck卫星在353 GHz观测得到的银河系分子云团的尘埃热辐射的全天偏振图^[12]。中间的亮带是银河的盘。银河系的中心在图的中心

和 d_1 的一对脉冲星，它们之间的平均磁场则可通过两者 RM 和 DM 差值直接估计出来，即 $\langle B_{\parallel} \rangle_{(d_0-d_1)} = 1.232 \frac{\Delta RM}{\Delta DM}$ ，这样可以用相近方向一组

脉冲星拟合脉冲星的 RM/DM 的梯度关系独立测量特定区域的磁场强度和方向。利用银河系各处的大量脉冲星，可以像 CT 一样对银河系磁场做断层扫描，反解出银河系的磁场结构。在过去 20 多年间作者所在的团队利用澳大利亚 64 m 射电望远镜测量了大量的远距离微弱脉冲星的法拉第旋率数据^[24-26]。在已有 1167 颗脉冲星的法拉第旋率测量数据中，约 2/3 是我们测量得到的。脉冲星的法拉第旋率数据在银盘上的分布如图 3 所示。通过分析多个旋臂切向区域的脉冲星数据，我们揭示了银盘上大范围的磁场结构^[25]：在旋臂上的磁场基本是逆时针方向，而旋臂之间区域的磁场基本沿旋臂指向顺时针方向；银盘上的大尺度磁场的强度大约 2—4 μG ，往银心方向明显有增强的趋势。图 4 是目前最新的银盘磁场测量结果。所以，远距离脉冲星 RM 数据的测量使得银河系磁场的测量范围从几 kpc 扩展到了十几 kpc。即使靠近银河系中心区域的矩尺座(Norma)旋臂，也测量得到了沿旋臂逆时针方向的和谐有序的磁场^[27]。再回到太阳附近，更多的脉冲星数据也说明本地银盘的规则磁场与大尺度磁场结构保持一致^[28]。这种测量方法显然比其他方法优越，因为它能够独立测量磁场的强度还能够判断磁场的方向。它的缺陷是脉冲星的距离估计或测量还不够准确。

另外，关于银盘磁场的补充性观测手段是大质量形成区附近的脉泽磁场测量。脉泽谱线非常细，其塞曼分裂测量可以揭示这些云团的磁场。将大量观测数据搜集起来进行分析，结果显示银河系大范围内的很多恒星形成区中小尺度脉泽源的磁场竟然与银河系旋臂的大尺度磁场有明显相关并保持类似的磁场方向翻转^[29]。这说明，星际云团在形成时，磁场一方面随密度增加而逐步增强，并且磁场方向还得以保留。云团形成的过程中云团应该没有旋转的。目前，脉泽塞曼分裂的测量数据非常有限，国际上已经有大规模的观测项目验证这样的结论，如澳大利亚的 MAGMO 项目^[30]。

目前银盘磁场的探测范围主要是太阳所在的

半个银盘。对于另外的半个银盘，无论是旋臂结构还是磁场探测都很少。

2.2 银晕区域的磁场

星光偏振和同步射电辐射观测揭示了离银盘比较远的高银纬区域的一些磁场特征，它们表现出的一些结构与本地银晕磁场相关^[9]。银道面之

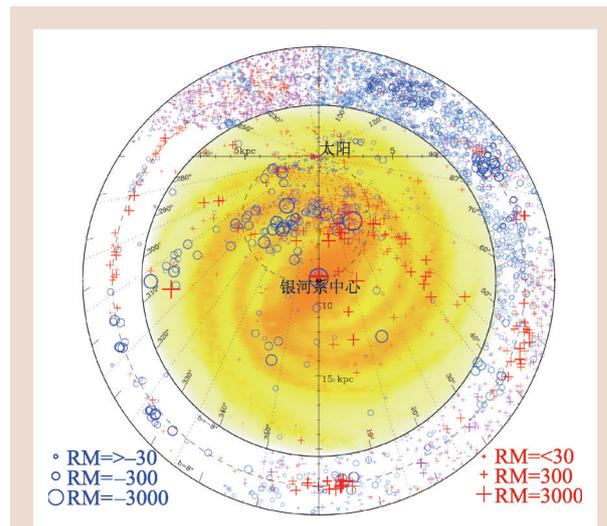


图3 脉冲星和河外射电源的法拉第旋率分布^[26]。RM 为正，表示路径上的平均磁场朝向我们。图中外围环区是河外背景射电源法拉第旋率数据，里面是脉冲星的法拉第旋率数据。中心区域背景是旋臂结构

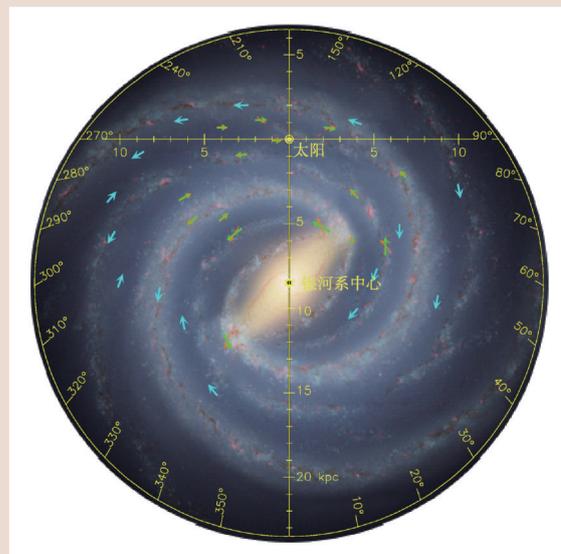


图4 银河系大范围磁场结构^[26]。绿色箭头是脉冲星数据揭示的磁场方向，淡蓝色箭头是同一方向上的远距离脉冲星和河外射电源推断的磁场方向

外区域的同步射电辐射提供了银晕磁场存在的最直接证据。目前最好的全天偏振观测图像是WMAP在23 GHz和Planck卫星在30 GHz观测得到的^[11, 12],展示了银道面以外的延展辐射成分,很可能与银晕磁场有关。

法拉第旋转效应是探测银晕磁场的最佳手段。太阳系处于银河系的银盘边缘,大量的河外射电源和银河系中的脉冲星是探测银晕中的磁场的优良探针。河外射电源的法拉第旋率包括三方面的贡献:射电源本征的RM贡献,星系际空间的贡献和银河系内星际介质的贡献。对于一组相邻的射电源来说,银河系的RM贡献是它们的共同部分,射电源本征RM和星系际空间的RM贡献之间互不相关,因此这组射电源的平均RM恰好反映银河系的RM前景贡献。河外射电源的法拉第旋率在全天的分布可以被用来推断银晕的磁场。

太阳处在银河系的边缘位置,在内银河的中

高银纬区域,河外射电源的法拉第旋率相对于银道面和银心子午线呈反对称分布特征^[31](图5):银河系第一象限($0^\circ < l < 90^\circ$)银道面之上RM为正,之下为负;第四象限($360^\circ > l > 270^\circ$)RM正负号相反。这个反对称分布特征可以用银晕中上下对称但方向相反的环型磁场来解释^[24, 31],并认为可能是银河系尺度的A0型发电机运行的结果。更多的法拉第旋率数据^[32-34]也已经验证这个法拉第旋率反对称分布结果。尽管一些太阳附近的星际介质的局部射电辐射也会显示类似的法拉第旋率分布^[35],从脉冲星的法拉第旋率与河外射电源的法拉第旋率有相似的分布且幅度总体上小于河外射电源,说明反对称分布特征并不是由局部结构引起^[24]。另外证实这种模型的观测依据是在银河系中心区域观测到的射电纤维^[36-38],其反映的垂直磁场正好是这种发电机机制下的极向磁场成分。但是这种极向磁场究竟多强,磁场的分布是弥漫的,还是仅仅在射电纤维里面,这些疑问目前还没有弄清楚^[29, 39]。

基于法拉第旋率反对称分布推断出的环型磁场构型是一个银晕磁场的定性描述。此构型被广泛采纳用于银河系磁场的模型构建^[19, 20, 28, 40, 41],以大同小异的参数描述银晕环型磁场的特征,但是环型磁场的强度特征和分布范围(标高和标长)尚不清楚。最新的脉冲星观测推断银河系第一二象限区的银晕磁场的标高大约为2 kpc^[42];环型磁场的最大强度位置距银道面1 kpc以上^[28],本地银晕中的环型磁场强度至少有1.6 μG 。

一些观测表明,银晕中可能还存在垂直于银道面的垂直磁场,太阳附近区域的垂直磁场应该就是银晕极向磁场的一部分^[43, 44]。邻近侧向星系的星系晕射电观测已经发现了垂直磁场的观测证据^[45, 46]。银晕中的极向磁场构型对星系发电机模型的限制非常重要^[47]。球状星团杜鹃座47(NGC 104)中的脉冲星的偏振观测支持了垂直磁场的存在^[48]。银晕磁场的理论模型中,垂直磁场成分是大尺度磁场的一部分^[49-51]。

目前人们对银晕中的磁场的认知还非常有限。对银晕中的环型磁场构型仅为定性表述,具体的环型磁场的标高、标长、分布范围和强度大小有待观测银晕中大批脉冲星进一步确定。利用

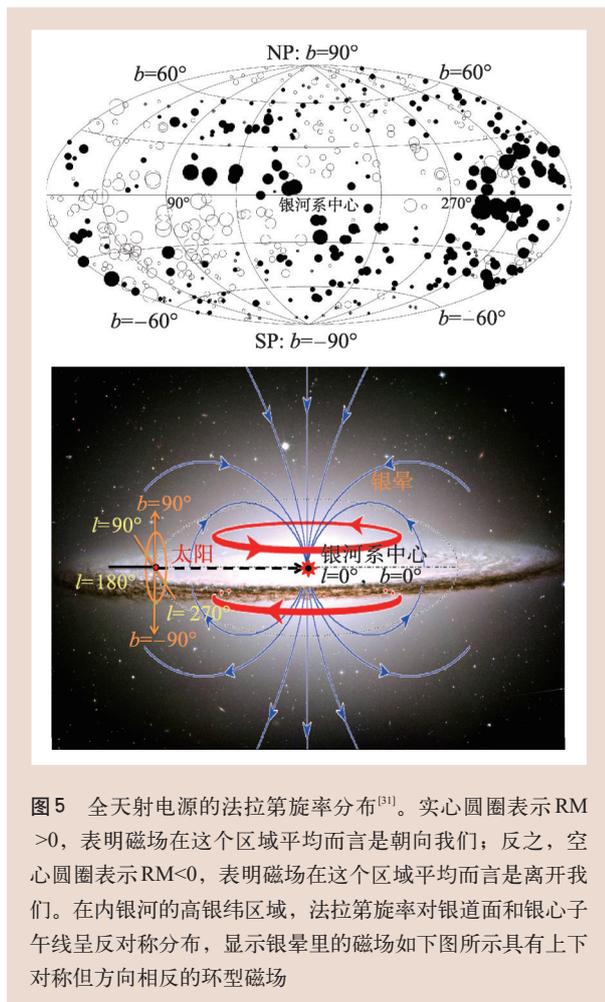


图5 全天射电源的法拉第旋率分布^[31]。实心圆圈表示RM > 0,表明磁场在这个区域平均而言是朝向我们;反之,空心圆圈表示RM < 0,表明磁场在这个区域平均而言是离开我们。在内银河的高银纬区域,法拉第旋率对银道面和银心子午线呈反对称分布,显示银晕里的磁场如下图所示具有上下对称但方向相反的环型磁场

脉冲星的RM和DM数据探索银晕磁场结构应该是银晕磁场测量的终极途径,需要利用中国新近建成的世界最大的500 m口径球面射电望远镜FAST和世界上许多国家一起推动建设的平方公里阵列射电望远镜SKA对大批脉冲星进行观测^[52, 53]。

2.3 银河系磁场在不同尺度的统计性质

磁场在银河系中普遍存在,并在不同尺度表现出不同的强度起伏特征。在银河系的星际介质中,磁场贯穿所有空间并冻结于星际气体中,随星际气体一起运动。当弥漫星际介质集结和冷却形成分子云时,磁场随气体的密度增加而增强。分子云内特别是云核区域的磁场能够对抗气体云团的引力,阻止气体的引力塌缩,因此磁场成为恒星形成区的重要物理因素。

那么,银河系磁场在不同尺度上的强度或能量是怎样分布的呢?利用银盘上的大样本脉冲星数据,通过分析脉冲星的法拉第旋率对不同尺度磁场的积分平滑效果,揭示了尺度在0.5—15 kpc范围的空间磁能谱^[54],如图6所示,这是目前在星系尺度上的磁场能量分布的唯一测量。

3 银河之外更大尺度磁场的研究

邻近星系中的磁场主要是用射电偏振观测方法测量的。来自超新星爆发、恒星形成区的相对论电子在星系的磁场中回旋,发出同步辐射。如果磁场完全是随机分布的,那么,同步辐射就没有任何偏振特征。在邻近的旋涡星系中,磁场一般有一大部分是随机的,但也有相当大的比例是规则磁场或非各向同性压缩的磁场。相对论电子在非随机磁场中回旋就产生了偏振的射电辐射。银河系和其他星系中弥漫射电辐射必定是相对论宇宙线粒子和磁场能量长期达到平衡的结果。与宇宙线的能量相比,如果磁场太强,宇宙线会很快辐射掉能量。如果磁场太弱,高能宇宙线会逃逸出银河系。所以,在一定体积里,相对论粒子的总能量与磁场能量 $B^2/8\pi$ 相比应该是近乎相等的,即能量均分原理:

$$\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E \cdot N(E) dE \sim \frac{B^2}{8\pi}.$$

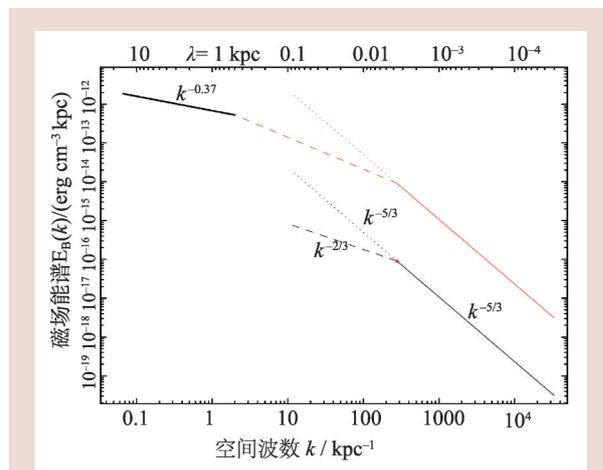


图6 银河系0.5—15 kpc尺度磁能谱^[54]。粗实线是用脉冲星的法拉第旋率数据得到的大尺度磁能谱。细实线和虚线分别是小尺度的Kolmogorov谱和二维湍流谱

这里, $N(E)$ 是能量为 E 的电子的密度。因此测量了同步辐射的总强度,可以利用能量均分原理估计出星际介质中的磁场总强度。同步辐射的偏振方向与辐射区域的磁场方向是垂直的。如果测量了同步辐射的偏振强度和偏振方向,还可以估计非随机磁场所占比重和方向。

利用美国甚大阵(VLA)这样的既灵敏又有很好分辨本领的射电望远镜,已经探测来自邻近旋涡星系的不同旋臂间微弱的射电偏振信号。这些信号告诉我们,旋涡星系中存在很大尺度(10 kpc)的规则磁场,磁场的结构与旋涡的形状非常相似。规则磁场的磁力线可以近似认为从星系的中心开始,在旋涡星系的旋臂内侧,沿着旋臂向星系的外边沿一直盘旋出去。当然,随机磁场分量仍然占主导,搅扰磁场的方向。在旋臂上,由于大量的恒星形成过程和超新星爆发,磁场的绝大部分被放大和搅乱成随机磁场。磁场的总强度都是利用能量均分假设或能量最小化方法,由观测的同步辐射总强度估计出来的。规则磁场的强度由射电偏振辐射的偏振度(即偏振强度占总辐射强度的百分比)求得。目前已详细观测的上百例星系的磁场强度均在4—13 μG 之间^[55]。星系晕内的磁场要弱一些,大约在1 μG 左右。

对于更大尺度的天体——星系团,近十几年来天文学家用类似的射电观测探测到了100多个

星系团的弥漫射电辐射。有些射电辐射弥漫至整个星系团，即所谓星系团的射电晕；有些弥漫射电辐射是两个星系团碰撞和合并过程中产生的激波加速了相对论电子，并且在压缩的磁场中回旋产生偏振辐射，弥漫辐射云的尺度有几千万光年。根据同步辐射的能量均分原理估计的磁场强度大约可以达到微高斯量级。在星系团后面的背景射电源也呈现出法拉第旋率的明显增强，意味着星系团的星系际空间有磁场和热电子介质。

最近国际低频射电阵的观测，不仅发现了一批星系团的射电晕和碰撞引起的射电遗迹，还发现了星系团之间的射电桥(图7)，它们是联接星系团之间的射电辐射。据此，可以断定比星系团更大尺度的宇宙纤维里有磁场的存在，但磁场强度和结构目前还难以测量。

4 磁场的起源和演化

宇宙中所有天体，行星如地球，恒星如太阳，星系如银河，星系团如Coma，甚至另类天体

如脉冲星、超新星遗迹、行星状星云、星系团际介质等，现在都已发现磁场存在的证据甚至直接探测到了磁场^[2, 57]。长期困扰物理界和天文界的一个根本问题是，宇宙中这些天体的磁场是如何起源、如何演化的？这是天体物理学中的一个重大难题，是现今天文研究的前沿领域之一。

对磁场的起源和演化进行纯粹的理论研究比较困难，国际上的研究要么是讨论某种因素对星系大尺度磁场的影响^[58-60]，要么就利用数值模拟研究磁场可能在磁流体动力学中的形成和演化^[61, 62]。理论工作的结论需要客观的测量来检验和驱动。在研究地球和太阳磁场时，大家的注意力往往集中在它们的磁场是如何维持和放大，并解释各种观测到的磁现象。关于磁场的起源，一般有两种主要的理论假说，一种是原初起源，即磁场是天体诞生时就有的，至少有相当多的“种子”磁场；另一种是理论学家更加相信的发电机(Dynamo)理论，认为天体诞生时或诞生前某种物理过程形成了一点点种子磁场，然后通过该天体的磁流体力学过程将种子磁场放大，形成我们今天所观测到的天体磁场。磁流体力学过程确实存在于所有天体，并在一定的条件下(如湍流、涡旋、扭曲等动力学过程中)确实能够放大和维持天体的磁场^[2]。这需要“种子”磁场，天体中部分电离的气体因为动力学运动可能使得电荷有一点点分离从而形成电场，该电场因为随介质运动，产生了我们需要的种子磁场，这就是所谓的Biermann电池。

恒星和行星是在分子云中形成的。近年来对正在形成恒星的分子云进行毫米波射电偏振成像观测，揭示出云团确实存在大尺度的磁场^[63]，这些磁场可以压缩和保存，成为所形成恒星的磁场^[64]。因此，尽管恒星和行星可以有发电机放大和维持磁场，但恒星和行星磁场起源的问题，因为最新

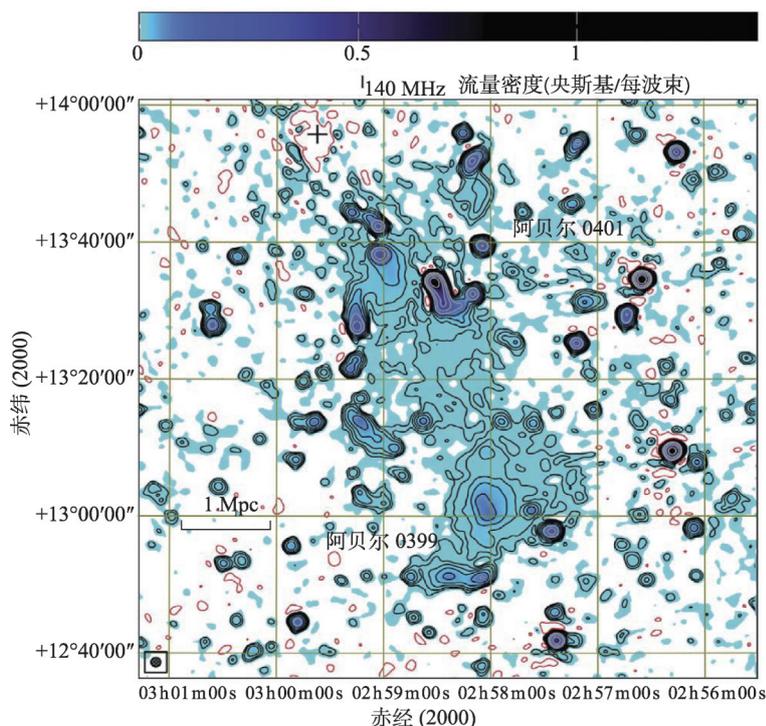


图7 欧洲的低频射电望远镜阵列新发现的星系团之间的射电辐射桥^[56]

的恒星形成区的磁场观测，磁场显然是“原初”起源的。接下来的问题是，分子云中的磁场是从哪里来的？

分子云是弥漫星际介质中密度较高、温度较低的区域。它是由于引力或其他不稳定性导致的星际介质气体聚集区域。目前观测表明，分子云中的磁场与弥漫的星际介质中的磁场密切相关^[29]，并且分子云中形成大质量恒星的磁场还与星际介质的磁场相关。这说明，从弥漫星际介质至分子云，再至形成的恒星，磁场有相当的留存和记忆。

那么星际介质中的磁场哪里来的^[2, 65]？有人提出，恒星星风可以充满星际空间，星风携带的磁场可以磁化星际介质。但这只能在星际空间非常小的尺度上有一定效果。对于已经观测到的很大尺度的星际介质磁场，标准的解释是发电机理论。它要求有一个最初的微弱磁场，称为“种子场”。种子场冻结于星际气体的等离子体中，在星系的较差自转和湍流运动中被涡旋运动放大。人们从数学上证明发电机理论可以将微弱磁场放大。与发电机理论相对立的是磁场原初起源假设。它认为在星系形成前的早期宇宙中就存在磁场，星系形成过程中磁场和气体冻结在一起。

那么，更大尺度如星系际空间的磁场，又是如何起源的^[66]？有人提出是活动星系核喷出的介质磁化了星系际空间，也有人提出星系团内的湍流可以导致发电机机制放大星系团内的磁场。目前积累的观测事实是，早期宇宙的天体已经具有磁场，在星系超团结构上也探测到磁场存在的证据，这些证据都支持磁场原初起源的说法。很可能的情形是，在星系形成之前或形成期间，发电机理论已经起了作用，形成了所谓最原初的磁场。这些磁场可以在宇宙早期产生的，可能在复合前的早期宇宙中形成，也可能在复合后形成^[67, 68]。如果是宇宙复合前产生的磁场，那真的是最为原初的磁场了，可以解释所有天体的磁场起源问题。但在暴涨后至复合前的宇宙辐射期产生的磁场，其空间相干尺度太小。暴涨期产生的磁场可以有相干的尺度但强度太小。宇宙早期的磁场因其产生的洛伦兹力和各向异性应该对宇宙结构形成有一定的影响，比如阻碍密度波动的增长，各向异性的磁压也会使早期宇宙结构形成时产生的

引力波发生异常。目前人们一方面需要更加详尽的观测了解星系中磁场的基本特征^[69]；另一方面，需要利用计算机模拟等各种办法去调查星系和宇宙结构形成过程中磁场的演化和所起的作用。

5 结语和展望

几十年来人们通过各种观测手段不懈观测，揭示了很多银河系内星际介质和银河系外星系际介质的磁场。利用星光偏振、尘埃偏振热辐射、同步射电辐射、塞曼效应和法拉第旋转效应揭示了银河系磁场不同尺度、不同区域的测量结果。

银河系磁场尤为重要，因为它影响分子云和恒星的形成和演化，并维持星际介质的静力平衡，还使宇宙线的传播发生偏折，又直接影响宇宙微波背景辐射的测量。银河系的磁场极型研究还能限制星系磁场的起源机制。脉冲星和河外射电源的法拉第旋率测量是揭示银河系大范围磁场最好的探针。在过去20多年，我们测量出银河系盘中大范围的磁场结构，分析出不同尺度分布的空间磁能谱。利用天空中广泛分布的射电源法拉第旋率数据，揭示了银河系晕的磁场结构。结合银河系中心局部区域已知的垂直磁场，构建了银河系总体磁场图像，获得了银河系磁场的很多新的知识。

目前银河系大尺度的规则磁场仅测量了约三分之一的银盘区域，在银河系银心另一侧半边几乎没有直接的磁场测量。银晕中的磁场的分布范围和强度特征还没有确定。中国新近建成的世界最大的500 m口径球面射电望远镜(FAST)是发现和测量脉冲星偏振的利器。应该可以在这个领域发挥重要作用，做更多的观测，以探索更远的区域、更精细的磁场结构。

对银河系之外的星系和星系团中的磁场研究，期待中国与许多国家正在一起推动建设的平方公里阵列射电望远镜(SKA)能够最后做出更大进展。该国际重大科研设施的五大关键课题之一就是宇宙磁场。它将测量上千万个河外射电源和上万颗脉冲星的法拉第旋率，测量几百个星系和星系团的磁场细节，以前所未有的灵敏度诊断宇宙更大尺度磁场的性质，为理解宇宙磁场的起源和演化提供核心观测基础。

参考文献

- [1] Han J L. *ARA&A*, 2017, 55: 111
- [2] Widrow L M. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74: 775
- [3] Giovannini M. *IJMPD*, 2004, 13: 391
- [4] Fermi E. *PhRv*, 1949, 75: 1169
- [5] Hiltner W A. *Sci.*, 1949, 109: 165
- [6] Hall J S. *Sci.*, 1949, 109: 166
- [7] Hou L G, Han J L. *A&A*, 2014, 569: 125
- [8] Beck R. *A&A*, 2015, 578: 93
- [9] Heiles C. *ApJ*, 1996, 462: 316
- [10] Clemens D P, Pavel M D, Cashman L R. *ApJS*, 2012, 200: 21
- [11] Bennett C L, Larson D, Weiland J L *et al.* *ApJS*, 2013, 208: 20
- [12] Planck Collaboration, Ade P A R, Aghanim N *et al.* *A&A*, 2015, 576: 106
- [13] Xiao L, Han J L, Reich W *et al.* *A&A*, 2011, 529: A15
- [14] van Eck C L, Brown J C, Stil J M *et al.* *ApJ*, 2011, 728: 97
- [15] Brown J C, Haverkorn M, Gaensler B M *et al.* *ApJ*, 2007, 663: 258
- [16] Roy S, Rao A P, Subrahmanyam R. *MNRAS*, 2005, 360: 1305
- [17] Simard-Normandin M, Kronberg P P, Butten S. *ApJS*, 1981, 45: 97
- [18] Sofue Y, Fujimoto M. *ApJ*, 1983, 265: 722
- [19] Pshirkov M S, Tinyakov P G, Kronberg P P, Newton-McGee K J. *ApJ*, 2011, 738: 192
- [20] Jansson R, Farrar G R. *ApJ*, 2012, 757: 14
- [21] Thomson R C, Nelson A H. *MNRAS*, 1980, 191: 863
- [22] Han J L, Qiao G J. *A&A*, 1994, 288: 759
- [23] Indrani C, Deshpande A A. *New Astronomy*, 1999, 4: 33
- [24] Han J L, Manchester R N, Qiao G J. *MNRAS*, 1999, 306: 371
- [25] Han J L, Manchester R N, Lyne A G *et al.* *ApJ*, 2006, 642: 868
- [26] Han J L, Manchester R N, van Straten W *et al.* *ApJS*, 2018, 234: 11
- [27] Han J L, Manchester R N, Lyne A G *et al.* *ApJ*, 2002, 570: L17
- [28] Xu J, Han J L. *MNRAS*, 2019, 486: 4275
- [29] Han J L, Zhang J S. *A&A*, 2007, 464: 609
- [30] Green J A, McClure-Griths N M, Caswell J L *et al.* *MNRAS*, 2012, 425: 2530
- [31] Han J L, Manchester R N, Berkhuijsen E M *et al.* *A&A*, 1997, 322: 98
- [32] Taylor A R, Stil J M, Sunstrum C. *ApJ*, 2009, 702: 1230
- [33] Xu J, Han J L. *RAA*, 2014, 14: 942
- [34] Oppermann N, Junklewitz H, Greiner M *et al.* *A&A*, 2015, 575, 118
- [35] Wolleben M, Fletcher A, Landecker T L *et al.* *ApJ*, 2010, 724: L48
- [36] Yusef-Zadeh F, Morris M, Chance D. *Nature*, 1984, 310: 557
- [37] Yusef-Zadeh F, Roberts D A, Goss W M *et al.* *ApJ*, 1999, 512: 230
- [38] Yusef-Zadeh F, Hewitt J W, Cotton W A. *ApJS*, 2004, 155: 421
- [39] Han J L. *IAU Symp.*, 2009, 259: 455
- [40] Prouza M, Šmída R. *A&A*, 2003, 410: 1
- [41] Sun X H, Reich W, Waelkens A *et al.* *A&A*, 2008, 477: 573
- [42] Sobey C, Bilous A V, Griebmeier J M *et al.* *MNRAS*, 2019, 484: 3646
- [43] Han J L, Qiao G J. *A&A*, 1994, 288: 759
- [44] Mao S A, Gaensler B M, Haverkorn M *et al.* *ApJ*, 2010, 714: 1170
- [45] Krause M, Wielebinski R, Dumke M. *A&A*, 2006, 448: 133
- [46] Stein Y, Dettmar R J, Wezgowiec M *et al.* *A&A*, 2019, 632: 13
- [47] Haverkorn M, Heesen V. *Space Sci. Rev.*, 2012, 166: 133
- [48] Abbate F, Possenti A, Tiburzi C *et al.* *Nature Astronomy*, 2020. Doi: <http://doi.org/10.1038/s41550-020-1030-6>
- [49] Ferriere K, Terral P. *A&A*, 2014, 561: 100
- [50] Terral P, Ferriere K. *A&A*, 2017, 600: 29
- [51] Shukurov A, Rodrigues L F S, Bushby P J *et al.* *A&A*, 2019, 623: 113
- [52] Han J L, van Straten W, Lazio T J W *et al.* *Proceedings of Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)*, 2015, 41
- [53] Haverkorn M, Akahori T, Carretti E *et al.* *Proceedings of Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)*, 2015, 96
- [54] Han J L, Ferriere K, Manchester R N. *ApJ*, 2004, 610: 820
- [55] Beck R. *SSRv*, 2001, 99: 243
- [56] Govoni F, Orrù E, Bonafede A *et al.* *Science*, 2019, 364: 981
- [57] Han J L, Wielebinski R. *ChJA&A*, 2002, 2: 249
- [58] Davies G, Widrow L M. *ApJ*, 2000, 540: 755
- [59] Balsara D S *et al.* *ApJ*, 2004, 617: 339
- [60] Balsara D S, Kim J. *ApJ*, 2005, 634: 390
- [61] Balsara D S *et al.* *ApJ*, 2001, 557: 451
- [62] Blackman E G. *ApJ*, 2000, 529: 138
- [63] Crutcher R M, Hakobian N, Troland T. *ApJ*, 2009, 692: 844
- [64] Donati J F, Landstreet J D. *ARAA*, 2009, 47: 333
- [65] Kulsrud R M, Zweibel E G. *Reports on Progress in Physics*, 2008, 71: 046901
- [66] Ferrari C *et al.* *Space Science Reviews*, 2008, 134: 93
- [67] Giovannini M. *Classical and Quantum Gravity*, 2006, 23: R1
- [68] Tsagas C G. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2009, 51: 124013
- [69] Beck R. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 2009, 36: 1