

星际磁场的演化

胡文瑞

(中国科学院力学研究所)

一、宇宙中的磁场与星际磁场

几千年前,我们的祖先就认识到了地磁场的存在,并且发明了指南针。随着磁场测量的原理和手段的不断进展,人们对于宇宙中磁场的认识越来越深了。现在知道,宇宙中几乎到处都存在着磁场。一些高能天体中的磁场强度,比实验室里可能得到的最强的场还要强百万倍;而另一方面,又可以在极大的尺度上充满着较弱的磁场。因此,研究宇宙中磁场的演化,研究磁场与其他物质的相互作用的规律,就必然是天体物理学的一个重要课题。这些研究也必然会促进我们地面的科学试验。某些天体物理问题的研究对等离子体物理学和磁流体力学的理论和应用的促进,就是一个很好的例证。

当人们发现地磁极飘移和反转时,就研究用地核内部的液态金属流体的运动来解释地磁场的维持问题,这就发展成了“发电机理论”。随着射电天文学及空间探测的进展,人们发现,在太阳系的行星中除地球以外,木星上还有较强的磁场。

在太阳表面上,人们观测到一个只有几高斯强度的普遍场,以及在局部可达三、四千高斯的黑子磁场。黑子附近活动区中经常发生的太阳耀斑现象,只能用黑子磁场的部分磁能释放来解释。被太阳风带出来的太阳表面磁场,在行星际空间形成相对稳定的螺旋线型的扇形结构,在地球附近观测到这个场强约 5×10^{-5} 高斯。太阳的这些现象,估计也会存在于许多恒星上。特别地,在一些年轻的恒星上具有较强的、经常变化的磁场,这类恒星被称为磁(变)星,目前已发现了一百多颗,其磁场强度一般为几百高斯,最高的为34,400高斯。而在白矮星上却一般地存在着 10^5 — 10^7 高斯的强磁场。据估计,脉冲星上的磁场强度的量级可高达 10^{12} 高斯!在超新星遗迹中也观测到了磁场。1054年,北宋期间我国观测到的一颗著名的超新星爆发后形成了蟹状星云,目前的直径约1秒差距,而其中的磁场强度却高达 3×10^{-4} 高斯(其通量比一般恒星的要大 10^{11} 倍)。

对更大的层次,应该讨论星系的磁场。我们将着重于银河系,以及和它类似的盘状星系中的星际磁场。

可以分析出,由于星系有很强的较差自转,而星际磁场的扩散效应又很弱,大尺度的星际磁场应该基本上沿着旋臂的方向;对于密度较高的区域,磁场也就较强。因此,旋臂中应该具有较强的磁场,而在星系盘的臂际空间中,磁场强度将较弱。当然,这些推论都需要观测的证实。利用某些射电频率的塞曼效应,可以较好地确定星际磁场的大小和方向。由脉冲星的法拉弟旋转测量和讯号的色散测量的比值,可以直接估计出沿观测方向磁场分量的平均值。而非热射电源的偏振,以及星际云的取向也可以分析局部磁场的方向。虽然目前已进行了许多观测,并提出了一些观测模型,但主要结果仍集中在太阳附近的区域内。可以将主要观测结果归纳如下^[1]。

第一,沿着旋臂的方向存在着一个大尺度的普遍场,它具有平均场的性质。因为观测的结果还取决于一些不完全确定的因素,但可以认为星际磁场的平均强度为几个微高斯。如果将已知密度气云中的磁场强度的观测值进行分析,可以得到星际气体密度 n_H 与星际磁场 B 之间的关系,如图1所示。根据外推,当星际气体的平均密度为 0.7 — 2 /厘米³时,该处的磁场强度应为 1 — 3 微高斯。星际空间的平均磁场可以取为 (2 ± 1) 微高斯。

其次,星际空间磁场有很大的局部涨落。涨落磁场的特征尺度是 10^3 秒差距,其强度的量级与平均场相同。马修生等人分析了几千颗星的偏振数据后认为,涨落场在椭圆形管的表面,绕着旋臂呈空间螺旋型

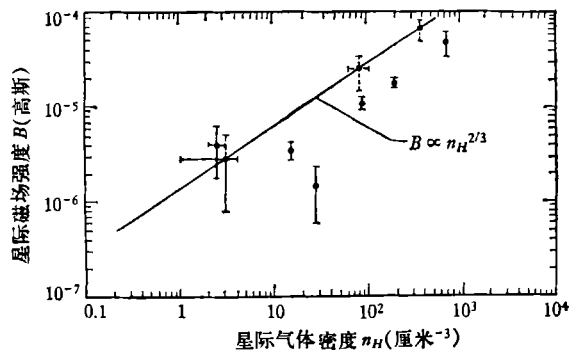


图1 星际气体密度与星际磁场的关系图,其中的实斜线表示磁场冻结在气体中所应满足的 $2/3$ 次方关系。

结构。大量气云中磁场强度的方向的观测,与这个模型相符。

我们可以借助于银河系磁场的分析,去认识盘状星系中的星际磁场结构。但要注意,有少数星系核发射很强的射电,这证明那里有强磁场存在。射电星系中的非热辐射也表明其中存在着强磁场。一般认为,在类星体中很可能也有相当强的磁场。

至于总星系的磁场,目前人们对它的认识甚微,主要还是推测性的。观测到的一些星系际空间的磁场也是总星系中的局部现象。看来不大可能存在均匀的总星系磁场。如果存在星系际磁场的话,估计其强度的上限不超过 10^{-8} 高斯^[2]。

在宇宙的磁场问题中,星际磁场具有某种承上启下的作用。一方面,星系磁场可能是在其演化的初期捕获到星系际空间的磁场,在星系演化过程中将场放大,并可能又漏曳给总星系一部分,而逐渐形成的。研究星系磁场与星系际磁场之间的关系是天体物理学中的一个非常重要的问题。另一方面,恒星磁场的演化应与星际磁场密切相关。恒星早期演化中的磁场以星际场为背景;恒星晚期形成的具有强磁场的天体(如超新星遗迹,脉冲星等)会影响星际磁场的结构;既使对一般恒星,由恒星风带出的磁场与星际磁场也会相互影响。所有这些问题,以及与其它紧密相关的问题,构成了天体物理学的一个重要方面。

二、星际磁场的演化理论

我们的讨论将主要针对银河系中星际磁场的演化,这些讨论原则上也可应用于一般的盘状星系,有些原理对天体物理学中的一般磁场演化问题也适用。

如果认为,星际气体的运动可以用磁流体力学方程组来描述^[3],那么磁场的演化应服从磁感应方程

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \Delta \mathbf{B}, \quad (1)$$

其中 \mathbf{B} , \mathbf{v} , η 分别为磁感应强度、速度场、磁粘性系数。一般地,速度场 \mathbf{v} 和磁感应强度 \mathbf{B} 是耦合在一起的。这样,研究磁场的演化必须同时研究速度场及星际介质的热力学状态参数的变化,作为一种运动学处理,人们时常在假定的速度场下,讨论磁场的演化问题。这种理论显然具有先天的缺欠。当我们还要研究恒星和宇宙射线气体的影响时,就必须讨论更一般的宇宙气体动力学的关系^[4]。

根据(1)式,可确定磁场扩散时间的量级为

$$\tau = 0(L^2/\eta), \quad (2)$$

对于星系,其特征尺度 L 非常大,星系磁场的衰减时间远远地超过了星系的年龄。因此有人认为,星系磁场基本上是在星系坯中捕获到的总星系的磁场,随着星系坯的收缩而放大成的。所以它是宇宙中“原发场”的

某种“化石”遗迹。这种观点的星际磁场演化理论被称为“化石场理论”,也有人称之为“原发场理论”。

提出原发场理论的时候,只是一种设想。这个理论是与所谓的“宇宙起源”的大爆炸模型紧密相关的。因为观测上并未证实存在着均匀的总星系磁场,这个理论就缺乏事实根据。最近皮丁顿提出的设想中,实际上只要求在星系坯附近有一个相对均匀的星系际磁场,这个场与一团旋转气体(尺度约 3×10^4 秒差距,质量约 10^{11} 太阳质量)相互作用而逐渐形成的^[5]。只存在一个特征参数,即星系际局部磁场与气体的角速度矢量之间的夹角 β 。当 $\beta = 0$ 时,可形成 SO 型星系;当 $\beta = \pi/2$ 时,可形成 E 型星系;而当 $0 < \beta < \pi/2$ 时,就得到一般盘状星系的“斜场模型”。斜场模型假设星系际的局部磁场为 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ 高斯。由于冻结效应,星系坯的收缩可使磁场增加一、两个量级。星系的旋转效应使星系外的磁场被扭曲成两个相反的螺旋形状,并将星系外被压缩的磁场在星系附近放大了。星系盘内子午场方向的磁场分量随位置而变化,可以得到切向不均匀的磁场分量。而由于星系盘内的较差自转,将径向磁场分量伸展成切向为主的星系普遍磁场。这个斜场模型的定性讨论显然还缺乏理论上的进一步分析;另外,关于星系磁场的结构,以及与星系际磁场的联系等论断也缺乏观测上的证据。这些困难也是一般原发场理论之疑难所在。

在我们银河系中,星际气体湍流运动的动能,宇宙射线的能量,以及星际磁场能量的密度大体相同,这表明它们之间有很强的相互作用。在星系演化的过程中,星系内部的物质运动可能已经把原发场的痕迹抹掉了,看来应从星系内部的物质运动来研究星系磁场的演化。人们就把讨论地磁场和恒星磁场的发电机理论推广到星系的问题中。而星际磁场的演化问题主要是讨论星际介质的磁流体力学湍流与星际磁场的相互作用,这种理论称为“湍流发电机理论”。星际气体都是导电的,我们可以认为星际气体与星际磁场是冻结在一起的。盘状星系中很强的较差自转,很容易产生湍流,气体的湍流运动将使磁力线不断地畸变,被扭曲和拉长。这样就使磁力线管扩大了,将原来是微不足道的“种子磁场”不断地放大成目前的量级和形态。“种子场理论”是至今研究得最多,但仍尚未解决的星际磁场演化理论,我们将在下节集中进行讨论。

在种子场的发电机理论中,主要讨论星际磁场的放大机理,或者说其他物质形态的能量如何转换成磁能的。这种理论的前提,要求初始有一个虽然微弱,但确实存在着的“种子”磁场。因此,有人将这种发电机理论称为“次级”发电机理论;无种子场,直接从无磁场而产生和放大磁场的理论称为“初级”发电机理论^[6]。

除去上述两大类型理论外,还有一种强调星系磁场局部特点的理论。一般认为,星系中的一些高能

活动区域(如超新星爆发,脉冲星,及某些星系核)会产生高能宇宙射线,因而那里存在着强磁场。一般恒星风也会把恒星磁场带到星际空间。在星系盘内,这些局部磁场被较差自转拖曳成环向为主的磁场,星系磁场就是这些局部场的迭加(参看[2],以及[1]和[4]后边的讨论),也有人称此为“蜂窝场模型”^[7]。这种观点主要是受观测资料的启发,它着重于说明星系磁场的目前结构。这种观点依赖于恒星磁场的位形,而恒星磁场的演化,特别是高能天体中磁场的演化问题,在理论上也是正在探讨的难题。

三、种子场理论

初期研究限于估计在星际磁能与星际气体湍流的涡能之间可能会达成某种“能量均分”。开始,涡能转换成磁能,当磁场逐渐增强以后,磁刚性将阻止磁能进一步增长,使磁能与动能之间实现某种能量均分。巴契勒对能量均分问题首先给以理论分析(参看[3]的第五章)。因为种子场十分微弱,在磁能增长的初期,我们可以略去洛伦茨力的影响。这样,可以写出不可压缩流体的涡量 $\omega = \nabla \times v$ 的方程

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nabla \times (v \times \omega) + \nu \Delta \omega, \quad (3)$$

其中 ν 为流体的运动学粘性系数。比较(1)式与(3)式, B 与 ω 的方程具有完全相似的形式。这两个关系式右端的第一项都表示磁场和涡量场与流体冻结在一起的效应,而第二项则代表场的扩散效应。假设对于确定的 ν 值,速度场及涡量场有一湍流分布;如果在某一初始时刻,磁场与涡量场具有完全相同的初值分布;当 η 与 ν 完全相同时, B 与 ω 也将以同样的形式变化下去。对于定常的湍流,涡量不随时间增长,因而磁场也不可能放大。但是,对于同样的初条件,如果 $\eta < \nu$, 磁场的扩散效应比涡量的扩散效应减弱了,因此磁能将被涡能放大。物理上可以看出,流体的涡量增加是通过伸展涡线来实现的,在定常情况下,这个增加的值恰好与扩散效应使涡量减少的值相等。对于磁场强度,也存在磁力线被流体伸展而放大和扩散效应而减少两个作用。当磁场扩散效应比涡量的扩散要慢的时候,如果湍流是定常的,那么磁场就应该是放大了。随着磁能的增加,将使(3)式中忽略了洛伦茨力的作用逐渐地重要,而洛伦茨力将阻止磁能的进一步增加。这样,磁能与涡能将达到某种“能量均分”。在星际空间中,确实满足条件 $\eta < \nu$ 。用这个理论来解释星际磁场的演化显然有一些不完善的地方,但对能量均分的认识进了一大步。

对于磁能被放大的问题,经过了许多人的工作,直至克拉克南和长柄的研究^[8],才给清理出了一些头绪。从前面的分析可以看出,磁场和涡量场是耦合在一起

的。因此应该研究磁流体力学湍流的速度关联函数,以及速度与磁场耦合的关联函数的变化,由此来讨论湍流能谱与磁能谱之间的能量转换,以及磁能谱本身不同波段之间的能量转换规律。可以分析出,对于不同的波段,磁能既可能增加,也可能减小,存在着磁能与涡能之间的能量转换;同时,磁能增加的波段还要将它从湍流动能那里获得的能量向磁能不增加的波段传递。只有当存在着总磁能的净增加时,磁场才被放大了。由于动力学问题的极端困难性,在目前仍难于解决动力学发电机的问题,这是湍流理论缺乏根本的突破所带来的困难。

为了避免动力学问题的困难,许多人在运动学发电机理论方面作了大量的工作。在这类湍流发电机理论中,不一般讨论与磁场耦合在一起的小尺度涡漩如何放大星际磁场;而是假设湍流速度场是已知的,研究某些类型的流场对星际磁场的影响。我们必须注意到运动学发电机理论的局限性,即假设为已知的流场是否合理,是否确实反映了星际气体的运动规律。

在分析处理时,都将速度场及磁势场分为平均值与涨落值两部分,即

$$a = A + \delta A, \quad v = V + \delta v. \quad (4)$$

代入(1)式,不难导出湍流发电机的方程为^[9]

$$\begin{cases} \left(\frac{d}{dt} - \eta \Delta \right) A_i = -A_j \frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \epsilon_{ijk} \langle \delta v_j \cdot \delta B_k \rangle, \\ \left(\frac{d}{dt} - \eta \Delta \right) \delta A_i = -\delta A_j \frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \epsilon_{ijk} \delta v_j \cdot B_k. \end{cases} \quad (5)$$

即使是在运动学的假设下,要一般地求解这个问题也是十分困难的。如果认为,湍流运动中涨落速度的特征尺度 L 和涡漩的衰减时间都分别地比问题的特征尺度和特征时间要大得多,我们就得到“长慢过程”这种近似,这就是布拉金斯基的发电机理论,它在解释地磁场和恒星磁场的演化时有一定成果。帕克的发电机理论是建立在“短快过程”近似上,即认为涡漩的特征尺度很小,而衰减时间却很快。对于这两类特殊情况,可以将方程化简并讨论磁场的放大过程。

帕克利用“短快过程”近似,找到了几种可以有效地放大种子场的发电机模型^[4]。他认为,由于星系的较差自转,使星际气体的湍流运动具有迴旋的特征。迴旋湍流可以把较差自转所形成的切向磁场拉到子午方向,在星系盘上、下各分布着一层小涡漩产生许多的子午方向的磁迴路,这些磁迴路的迭加就造成一个平均的大尺度径向场,星际气体的较差自转将重新把径向场拖曳成大尺度的切向场。在这个模型中,磁场的更迭时间约为 10^8 年,通过这种磁场的更迭而不断增加磁能,使种子场被放大。对于帕克模型,存在着一些不同的看法,值得进一步分析和研究。

阿尔文提出了另一种类型的种子场理论^[10]。在

等离子体物理的实验中已经证实,由于等离子体中发展的扭曲不稳定性,可以使等离子体中的磁通量在某些情况下增加数倍。阿尔文认为,等离子体中的不稳定性可用来解释天体物理学中的磁场起源。讨论一团较差自转的等离子体中存在着子午方向的种子磁场,它由一环向种子电流来维持。较差自转沿磁力线激发阿尔文波,当较差速度与阿尔文波速差不多时就可以产生一个相当的切向磁场(假设由一子午方向的电流来维持)。在某些情况下,电流将不稳定,会发生扭曲变形,而产生新的环向电流。新的环向电流与种子场的环向电流加起来就使子午方向的种子场被放大了。由这种等离子体不稳定机制也可以得到一个种子场理论。当人们考虑集合等离子体现象时,还可以提出一些星际磁场的放大机制(见[1,4]后的讨论)。但是这种理论在解释星际磁场的演化时可能有两个困难:一个是如何用这种小尺度的相互作用去解释大尺度星际磁场的演化;另一个是我们不仅要给出一个星际磁场的放大机制,同时还要给出星际磁场的正确位形。

直至现在,星际磁场演化的理论还是远不能令人满意的。由于湍流理论的困难,动力学发电机理论的发展受到很大的限制。利用运动学的处理,我们必须对星际气体的运动规律进行深入的研究,并找出流场与磁场间的相互联系。这些都有待于更进一步的研究。

四、星际磁场在天体物理学中的重要性

在天体物理学中,星际磁场的演化和维持问题本身就是一个尚未解决而又引人注目的重要课题。人们研究这个课题,还因为有许多重大的课题都与它紧密相关^[1]。

首先,在天体演化的理论中,存在着唯心论和辩证唯物论的激烈斗争。辩证唯物论认为,宇宙在时间和空间上都是无限的,而一些修正主义和资本主义的学者却大肆贩卖所谓宇宙的“起源”,以及研究膨胀宇宙的“有限边界”。在磁场演化的原发场理论中,所谓“原发磁场”就是指“宇宙起源”的大爆炸时刻所产生的宇宙磁场。在各向异性的宇宙初期模型中,要求存在一个宇宙磁场。在原发场的思路下有人讨论“早期”宇宙中星系环的物理条件下,星际磁场是如何产生的。我们要坚持辩证唯物主义的宇宙观,批判那些所谓“宇宙起源”之类的唯心主义宇宙观。

其次,在宇宙射线物理学中,一个非常重要的问题是提供星际磁场的结构。在几个微高斯的星际磁场中,高能宇宙射线的拉摩半径将比星系盘的厚度大得多,而宇宙射线在星系盘中的寿命却有几百万年,这就构成一个悖理。为解释这个疑题,有人认为宇宙射线是存储于银晕中,或存储在局部星系群内,或者在整个

宇宙中。因此,一个重要的问题就是提出一个星际磁场模型,不但要能够约束宇宙射线,还要能解释宇宙射线的极低的各向异性程度^[12]。为此,费米提出星际磁场应具有随机的分量。沿着这个思路,近来有人研究星际磁场的统计理论^[13]。显然,要正确地理解宇宙射线的存储和输运机制,必须首先确定星际磁场的大小和结构,以及星际磁场与星系际磁场之间的关系。银河宇宙射线的起源(特别是非常高能宇宙射线),以及宇宙射线的加速机制等重大问题,也都是与磁场紧密相关的。

第三,星际磁场既然是星系的重要组成部分,它必然会对星系的演化和结构产生影响。在盘状星系的密度波理论中,一般都忽略洛伦茨力的影响。但是,星际磁场对于大尺度星系结构的影响,近来一直被人提起注意。如果存在大尺度星系激波的话,那将会对星系磁场的结构提出特殊的限制要求。

在研究星际气体的大尺度问题时,星际磁场,星际气体,宇宙射线,以及恒星之间的相互作用和能量转换关系,是星际气体动力学的主要研究课题。利用无碰撞等离子体的集合效应,还可以对宇宙射线的加速提出一种解释^[14]。

第四,星际磁场与恒星早期演化的关系。观测发现,星际气云有沿星际磁场取向的趋势。如果星际气体与星际磁场冻结在一起,当气云收缩时,其密度与气云尺度 R 的负3次方成正比,而气云中的磁场与 R^{-2} 成正比。由此给出冻结条件的 $2/3$ 次方关系,即 $B \propto n_H^{2/3}$ 。在图1中给出了观测结果,可看出在 n_H 的三个量级内大体满足冻结条件。进一步研究更高密度中的磁场结构,必将对恒星磁场的起源,以及气云和恒星的演化机制给予启发。另外,当我们研究磁流体力学的不稳定性机制时,会对恒星的早期演化提出新的可能机制^[15,16]。

显然,还有许多与星际磁场相关联的天体物理的课题。星际磁场的演化,以及与它紧密有关的这些问题一起,构成了天体演化理论的一个重要方面。人们通过观测和理论的研究,正在越来越深刻地认识这些现象。

参 考 文 献

- [1] Verschuur, G. L., *Observational Aspects of Galactic Magnetic Fields*, 载于 *Interstellar Gas Dynamics*, IAU symp. No. 39 (Habing, H. J. 编) D. Reidel Pub. Co. (1970), 150.
- [2] Brecher, K., *Galactic And Metagalactic Magnetic Fields*, 载于 *External Galaxies And Quasi-Stellar Objects*, IAU symp. No. 44 (Evans, D. E. 编) D. Reidel Pub. Co. (1972).
- [3] Cowling, T. G., 《电磁流体力学》(唐戈,郭均译), 科学出版社, (1960).
- [4] Parker, E. N., *The Origin And Dynamical*

- Effects of the Magnetic Fields And Cosmic Rays in the Disk of the Galaxy*, IAU symp. No. 39 (1970), 168.
- [5] Piddington, J. H., *Cosmic Electrodynamics*, **3** (1972), 129.
- [6] Reinhardt, M. 和 Rosenblum, A., *Astron. and Astrophys.*, **34** (1974), 23.
- [7] Michel, F. C. 和 Yahil, A., *Astrophys. J.*, **179** (1973), 771.
- [8] Kraichnan, R. H. 和 Nagarajan, S., *Phys. Fluid*, **10** (1967), 859.
- [9] Lerche, I., *Astrophys. J.*, **166** (1971), 627.
- [10] Alfvén, H. Fälthammar, C.-G., «宇宙电动力学» (戴世强译), 科学出版社 (1974).
- [11] Cameron, A. G. W., *Non-thermal Phenomena of Astrophysics And thier Relation to Plasma Physics*, 载于 *Plasma Instabilities In Astrophysics* (Wentzel, D. G. 和 Tidman, D. A. 编) Gordon and Breach (1969), 1.
- [12] Jokipii, J. R., *Comments on Astrophys. And Space Physics*, **5** (1973), 125.
- [13] Kaiser, T. B., *Astrophys. J.*, **181** (1973), 349.
- [14] Kaplan, S. A. 和 Tsytovich, V. S., *Plasma Astrophysics*, Pergaman Press, (1973).
- [15] Spitzer, L., *Dynamics of Interstellar Matter And the Formation of Stars*, 载于 *Nebulae And Interstellar Matter* (Middlehurst, B. M. 和 Aller, L. H. 编) Univ. Chicago (1968).
- [16] Parker, E. N., *Astrophys. J.*, **145** (1966), 811.

更 正

本刊第 4 卷第 1 期第 5 页左栏倒数第 15 行,“治政”应为“政治”。
同期第 7 页右栏附注第 2 行,“19”应为“1972”。