

天体的磁场

叶式辉 编著

科学出版社

天体的磁场

叶式辉 编著

科学出版社

1978

内 容 简 介

宇宙间的许多天体都具有强度不等的磁场,天体的物态、运动和演化同磁场有密切关系,我们观察到的许多天文现象也都同磁场有直接联系。因此,天体磁场的研究已成为目前天体物理学的重要内容之一。本世纪,特别是近二十多年来,对于太阳、恒星以及其他天体的磁场的研究取得了很大进展,利用空间探测技术直接测量了月球和一些行星的磁场。本书综述介绍这方面的进展,包括天体磁场的测量方法、资料分析的结果以及理论研究的概况等,其中对于太阳磁场的介绍比较详细。

本书可用作天体物理、地球物理、空间物理等方面的科学工作者和高等学校有关专业师生的专业参考书。

天 体 的 磁 场

叶式辉 编著

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

天津市第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1978年4月第 一 版 开本:787×1092 1/32
1978年4月第一次印刷 印张:8 1/4
印数:0001—11,100 字数:184,000

统一书号:13031·719

本社书号:1033·13—5

定 价: 1.00 元

序 言

磁性是物质的基本性质之一。自然界的许多现象都与磁性有关。电磁力同万有引力、强相互作用力和弱相互作用力一起,并列为物理世界的四种基本力。

人类发现和应用磁性经历了一个漫长的途程。在这方面,我国古代劳动人民作出了巨大的贡献。伟大领袖毛主席指出:“**中国是世界文明发达最早的国家之一**”。**“在很早的时候,中国就有了指南针的发明。”**具体说来,早在公元前三世纪的战国时代,《吕氏春秋》上就有“磁石召铁”的记载,可见当时已经知道磁石能吸铁。在公元一世纪初,即东汉初年,王充《论衡》说磁勺柄指南,说明当时已发现了磁石的指极性。十二世纪初,在宋徽宗时,朱彧《萍洲可谈》和徐兢《宣和奉使高丽图经》都谈到了航海用的指南针,这表明当时指南针的使用已经非常普遍。宋代杰出的科学家沈括(1031—1095年)发现磁偏角¹⁾,比1492年哥伦布横渡大西洋时发现这一现象早四百多年。所有这些,都反映出我国古代对世界文化的重要贡献。

从十七世纪以来,对地球磁场的研究逐渐变成一门成熟的自然科学。但是,直到二十世紀初期,人类才开始研究地球以外广阔宇宙的磁场。将近七十年来,经过许多天文工作者的辛勤探索,人们愈来愈深刻地认识到,日月星辰以及浩瀚无垠的宇宙空间到处都弥漫着磁场,许多天文现象(太阳黑子、

1) 见《梦溪笔谈》卷二十四。

耀斑、太阳风、极光、宇宙射线、非热射电辐射……)都与磁性密切相关。因此,天体磁场的研究已成为当代天体物理学的一个重要组成部分。最近二十多年来,这方面的工作发展得特别迅速,取得了许多重大的成果。本书打算对这些情况作一概括介绍。

本书主要讲述天体磁场的测量方法,资料分析结果,以及理论研究的概况。一些基本原理和公式不再从头叙述或推导。关于若干专门的技术细节和烦琐的理论计算,我们一般只列举参考文献。由于天体磁场现象十分复杂,观测对象众多,有关文献资料也相当浩繁,所以本书的内容不可能是很完整的和详尽的。我们希望只着重阐明一些基本概念和主要现象,以使读者对天体磁场的研究能获得一个比较全面和比较清晰的认识。作者努力这样去做,然而错误和遗漏在所难免,切盼读者提出宝贵意见。

必须指出的是,从天文学的角度来看,地球作为太阳系内的一颗行星,也是一个天体。因此,地球磁场也可以属于天体磁场的范畴。但是,考虑到地磁学早已成为一门完整的学科,已有许多专门书籍加以介绍,本书可以略去不谈。我们只是在有关章节里,就太阳磁场对地球(主要是近地空间)磁场的影响作些简略介绍。

在本书编写过程中,南京大学天文系戴文赛同志、中国科学院紫金山天文台尤建圻、王振一等同志曾给予热情帮助,提出过宝贵意见,作者谨向他们表示衷心感谢。

编著者

1976年9月于南京紫金山天文台

目 录

序言	v
第一章 绪论	1
§ 1 历史概述	1
§ 2 天体磁场研究的意义	3
§ 3 天体的电磁性质	4
§ 4 天体磁场研究的概况	6
第二章 天体磁场测量原理	10
§ 1 塞曼效应	10
§ 2 逆塞曼效应	15
§ 3 汉勒效应	24
§ 4 同步回旋辐射	25
§ 5 形态研究	28
§ 6 理论计算	30
第三章 天体磁场测量技术	33
§ 1 太阳黑子磁场测量装置	33
§ 2 光电磁象仪	41
§ 3 新型的光电磁象仪	49
§ 4 照像磁象仪	56
§ 5 显像磁象仪	58
§ 6 杂散光和仪器偏振的影响	61
§ 7 磁场敏感谱线的选择	63
第四章 太阳黑子磁场	68
§ 1 黑子磁场的特征	68
§ 2 黑子磁场的方向	73

§ 3	黑子磁场的精细结构	76
§ 4	黑子磁场的模型	80
§ 5	黑子磁场与物质的运动	84
§ 6	黑子群的磁场	86
§ 7	磁场对黑子光谱的影响	90
第五章	日面局部磁场	95
§ 1	小尺度磁场	95
§ 2	大尺度磁场	99
§ 3	耀斑与磁场的关系	105
§ 4	日珥的磁场	112
第六章	太阳大气磁场	118
§ 1	米粒组织磁场	118
§ 2	色球磁场	120
§ 3	日冕磁场	123
§ 4	太阳大气的磁场梯度	127
第七章	太阳普遍磁场	131
§ 1	普遍磁场的强度	131
§ 2	普遍磁场的极性变异	133
§ 3	普遍磁场的精细结构	136
§ 4	普遍磁场的快速变化	138
§ 5	太阳的整体磁场	142
第八章	太阳系的磁场	148
§ 1	行星际空间磁场	148
§ 2	近地空间磁场	154
§ 3	月球的磁场	158
§ 4	行星的磁场	160
第九章	恒星的磁场	166
§ 1	恒星磁场的观测	166
§ 2	磁星的特征	171
§ 3	磁星的化学成分	175

§ 4	磁星的模型	179
§ 5	磁场与恒星的自转	183
§ 6	脉冲星的磁场	185
§ 7	白矮星的磁场	189
第十章	银河系和星系际空间磁场	192
§ 1	星际空间磁场	192
§ 2	银河系的磁场结构	198
§ 3	麦哲伦星云的磁场	201
§ 4	星系际空间磁场	202
第十一章	天体磁场的一些理论课题	205
§ 1	磁场内的谱线形成理论	205
§ 2	太阳黑子磁场的理论	214
§ 3	磁场与太阳活动周期	220
§ 4	磁场与恒星的结构和演化	227
§ 5	天体磁场的起源	232
§ 6	星际磁场与宇宙射线	235
附录		242

第一章 绪 论

§1 历史概述

人们对地球以外天体磁场的研究，只有六、七十年的历史。但是，这也是一部不断地“有所发现，有所发明，有所创造，有所前进”的历史。

虽然早在十九世纪末期，已经有人从日食时拍得的日冕照片，看出太阳两极附近日冕的羽毛状精细结构很像磁力线，猜测太阳具有和地球类似的普遍磁场，但正式的可靠的资料，却是从1908年起才开始取得。1908年，美国天文工作者黑尔(G. E. Hale, 1868—1938年)在威尔逊山天文台太阳塔，通过光谱线的塞曼(Zeeman)效应测量太阳黑子的磁场，发现黑子具有强达三、四千高斯的磁场。这是人类第一次测量地球外面大宇宙中的磁场，是天体磁场研究的开端。从此以后，太阳磁场的研究蓬勃发展起来，至今在天体磁场工作中仍占居主导地位。

1947年，H. W. 巴布科克(Babcock)用大型恒星望远镜测出室女座78星的磁场强度约为1500高斯。这是除太阳外第一次观测到恒星的磁场，是天体磁场探索史上的第二个里程碑。

第三个里程碑，是在1957年以后，天文工作者通过21厘米氢线的塞曼效应测量出星际物质的磁场。这为天体磁场的研究开辟了一个广阔的新领域。

从1957年开始的星际航行时代，使天体磁场的研究工作又跃进到一个新的高度。由于一系列人造天体发射的威

功，人们已可以直接测量行星际空间、月球以及行星的磁场。

天体磁场的探索，其范围就是这样一次又一次地扩充，观测资料也愈来愈丰富。

伟大领袖毛主席教导说：“认识有待于深化，认识的感性阶段有待于发展到理性阶段”。观测天体磁场所积累的大量资料，为进行理论分析提供了良好的条件。在丰富多彩的感性认识的基础上，出现了许多深入细致的理论研究，例如磁场内的谱线形成理论、太阳活动的机制、宇宙射线粒子的加速、天体磁场的起源，等等。这方面的成果为现代天体物理学增添了许多珍贵、生动的新内容。为了总结和交流天体磁场的研究成果，除了经常举行国际性的学术活动（例如1955年在斯德哥尔摩召开了“宇宙物理学中的电磁现象”讨论会^[1]，1963年在慕尼黑附近举行了“恒星和太阳的磁场”会议^[2]，1970年在巴黎举行了“太阳的磁场”会议^[3]）外，还经常有一些规模较小的天体磁场讨论会（例如见文献[4、5、6]）。当前，随着时间的推移，天体磁场研究的重要性愈来愈明显，投入这方面工作的人力和仪器也不断增加。因此，不难预料，今后将会取得更重大、更深刻的成就。

在表1.1中，我们按时间顺序列举出天体磁场研究工作的一系列事件，读者从中或许可以了解到大半个世纪来天体磁场研究进程的梗概。表中各项工作的具体内容和有关参考文献，请看本书有关章节的叙述。

我国在解放前，处于半封建、半殖民地的反动统治下，天体磁场的研究完全是一片空白。解放以来，在毛主席、共产党的英明领导下，我国天文事业得到蓬勃发展，天体磁场的工作也从无到有地建立起来了。现在中国科学院北京天文台、紫金山天文台和云南天文台都在开展正规的太阳黑子磁场观

表 1.1 天体磁场研究进程一览表

年 代	工 作 内 容	年代	工 作 内 容
1908	太阳黑子磁场测量	1960	太阳黑子磁场方向测量
1912	太阳普遍磁场测量	1961	日珥磁场测量
1947	恒星磁场测量	1961	太阳磁场的较差自转理论
1953	太阳光电磁象仪制成	1962	太阳向量磁象仪制成
1956—58	逆塞曼效应和磁场内 谱线形成理论	1962	金星磁场探测
1957—58	首次发现太阳普遍磁 场的极性反转	1965	行星际空间扇形磁场的发现
1957—60	星际空间磁场测量	1965	火星磁场探测
1958—	日面局部磁场的研究 和耀斑的中性点理论	1970	恒星磁场的磁象仪观测
1959	月球磁场的初次探测	1970	月球岩石磁性的实验室测定
		1972	多通道太阳磁象仪制成
		1973	木星磁场探测

测,而且已积累了大量的资料。一些新型的太阳磁场观测仪器正在积极研制中。有关的理论工作也逐步开展起来。我们已经取得的成就完全表明,天体磁场的研究在我们社会主义的祖国有着广阔的发展前景。

§ 2 天体磁场研究的意义

为什么要研究天体的磁场?这个问题可以从以下三个方面来回答。

首先,宇宙中绝大部份天体(太阳、恒星、星云)和星际物质都是由等离子体¹⁾组成的。像我们地球这样主要由固态物质形成的行星,反而是稀罕的例外(进一步说,地球上空的电离层也是等离子体)。既然等离子体基本上是由带电质点组成,那么,等离子体的物态、运动和变化自然都与磁场密切相关。因此,磁场对天体的物理状态的影响是巨大的、深刻的,

1) 等离子体又称为物质的第四态,即是电离度很高的气体。由于带正电和负电的两种粒子的电荷总量相等,所以称为等离子体。

也是具有实质意义的。这就告诉我们，要深入探索天体的物理状态，以及它们的运动、起源和演化，都必须去研究它们的磁场。

其次，强磁场对天体的辐射有着不容忽视的影响，黑子光谱就是一个明显的例证：磁场可以使黑子的谱线轮廓变宽，等值宽度增加，生长曲线变形。因此，必须充分估计并精细改正这方面的影响，才能正确理解来自天体的辐射信息。

第三，太阳风使日面磁场扩展弥漫到整个行星际空间，并将地球磁场压缩在一定范围内。这是地磁、电离层以及星际航行等方面工作都必须考虑的因素。因此，天体磁场的研究也有一定的实用意义。

此外还可以指出，天体物理工作的一个重要内容，是利用天文观测资料来验证一些新的物理理论（由星光在太阳引力场中的偏转来验证爱因斯坦的广义相对论，就是一个著名的例子），而在这方面，天体磁场研究也能发挥一定的作用。近年来，对白矮星和脉冲星的极强磁场（前者的磁场强度约为 10^5 — 10^7 高斯，后者则高达 10^{12} — 10^{14} 高斯！）的研究，已经初步证实了在超强磁场作用下的辐射理论。这方面的具体情况，将留待第九章§6和§7叙述。

§3 天体的电磁性质

在讨论天体的磁场以前，我们需要了解天体的电磁性质。只有这样，我们才能做到有的放矢，才能判断磁流体力学中所研究的若干现象[如磁耦合、引缩效应、阿尔汶(Alfvén)波等]在天体上面是否存在。当然，各种天体的物理状态千差万别，表征它们的物理量也有许多个，可是，一般说来，表征电磁性质的最重要的参数是导电率 σ 。它的表达式是

$$\sigma = \frac{\gamma_c \cdot 4}{\pi^{3/2} m^{1/2} Z e^4 L} \quad (1.1)$$

式中 γ_c 为一个随原子序数 Z 变化的系数:

当 $Z = 1$ 时, $\gamma_c = 0.58$;

$Z = 2$ 时, $\gamma_c = 0.68$;

$Z \rightarrow \infty$ 时, $\gamma_c \rightarrow 1$.

$L = 2 \ln(D/P_0)$, 这里 D 为德拜 (Debye) 半径, P_0 为两个质点之间的平均距离. 其余都是通用的符号. 从式 (1.1) 可知, σ 主要是温度 T 的函数. 采用文献 [7] 里的资料, 我们作成表 1.2. 由该表可以看到, 太阳 (作为恒星的代表)、星际气体云和地球电离层的导电率都很大. 作为比较, 我们可以举出一般低温中性气体的导电率只有 10^{-3} , 而铜 (这是用作电线的良导体) 的导电率也不过是 5×10^{17} .

表 1.2 太阳、星际气体云和地球电离层的导电率

	电子密度 (厘米 ⁻³)	原子密度 (厘米 ⁻³)	温度 (K)	碰撞截面 (厘米 ²)	平均自由程 (厘米)	导电率
太 阳: 光 球	3×10^{13}	10^{17}	5800	10^{-12}	3×10^{-2}	10^{13}
色 球	10^{10}	10^{10}	6000	10^{-12}	60	6×10^{12}
日 冕	10^8		10^6	10^{-16}	10^8	7×10^{15}
星际气体云: 电离氢	10	1	10000	10^{-12}	10^{11}	6×10^{12}
中性氢	10^{-3}	10	100	10^{-8}	10^{11}	7×10^9
电 离 层: F ₂ 区	10^6	2×10^8	1000	10^{-10}	10^4	3×10^{11}
E 区	10^5	10^{13}	300	10^{-9}	10^4	2×10^{10}

在天体磁场的研究中, 我们面临着一个重大的课题, 即电磁现象与流体运动的结合. 这两个范畴的现象, 有时必须合并处理, 有时可以分别对待. 决定怎样处理的判据, 是下面的不等式:

$$lH\sigma/\sqrt{\rho} > 1. \quad (1.2)$$

这个判据告诉我们, 研究对象愈大 (即线性长度 l 大), 磁场

(H) 愈强, 导电率(σ) 愈高, 而密度(ρ) 愈低, 则上式愈能满足, 此时磁场与流体相耦合, 必须合并处理. 对于行星大气低层(l 较大, 但导电率小, 仅为 10^{-3}) 以及地球上的海洋与湖泊(导电率甚大, 约为 10^{10} , 但 l 较小), 式(1.2) 不成立, 它们的电磁现象和流体运动当然必须分开处理. 但是, 对于地球电离层和绝大多数天体, 判据(1.2) 却是都满足的. 例如对于太阳大气,

$$lH\sigma/\sqrt{\rho} \approx 3 \times 10^6 \gg 1,$$

所以它们显然存在着磁耦合. 这是天体磁场研究的一个重要前提.

由能量的考虑, 也可以确定磁场对天体物理状态的作用. 当单位体积的磁场能量($H^2/8\pi$) 远大于气体热运动的能量($\frac{1}{2}\rho v^2$) 时, 磁场对等离子体的运动起支配作用. 在太阳光球的上层, 尤其在色球和日冕中, 磁场较强而密度甚低, 上述判据成立:

$$\frac{H^2}{8\pi} \gg \frac{1}{2} \rho v^2. \quad (1.3)$$

这时, 气体“冻结”在磁场中, 物质基本上沿磁力线分布和运动, 就好象一串由绳索贯穿的珠子, 只能沿着绳子移动. 正是由于这种情况的存在, 太阳单色象与磁场图形二者间的结构和细节几乎一一对应. 这些现象将在后面有关章节再详细介绍.

§ 4 天体磁场研究的概况

大半个世纪以来, 人们对天体磁场的研究取得了很大的进展, 在本章 § 1 里已经举出了一些. 概括说来, 已取得的成绩主要是: (一) 研制出一大批天体磁场测量仪器, 并建立起一整套对观测资料进行分析处理的方法; (二) 发现了一系列

天体的磁场,初步确定了它们的强度、模型和变化规律;(三)初步阐明了磁场对一些天文现象(例如太阳黑子的形成、耀斑的爆发、太阳的活动周,以及宇宙射线质点的加速)的影响;(四)就天体磁场的起源、磁场对恒星和星系演化的影响等方面开展了理论研究,并有了一个良好的开端。这些都是人类探索大宇宙这一伟大进军中的可喜收获。

但是,应当指出,现阶段我们对天体磁场的研究尚有比较大的局限性,这主要表现为:(一)除太阳外,我们对于一般天体磁场的观测资料都很粗糙。例如,恒星磁场的测量就做得很不够,已经确定的磁星不超过一百颗,这在繁星世界中不过是沧海之一粟。而且,已有的观测仅限于整个恒星的平均磁场强度,还谈不上对精细结构及其演变的研究。(二)除对月球和一些行星可用星际航行的手段对它们进行主动的探测外,现有的天体磁场测量基本上是被动地等待观测时机。至于模拟实验,还处于幼稚阶段。(三)理论研究基本上是对不同天体、不同现象零星地进行的,而且一般说来深度还嫌不够,不足以构成对天体磁场的一个系统的认识和深刻的理解。

最后,我们要谈谈现阶段天体磁场工作中存在着的困难问题。至少可以举出以下几点:(一)除太阳磁象仪外,一般观测仪器的精度都比较差。例如,对于恒星,一般只能测出几百高斯以上的磁场。(二)对观测资料的解释相当困难,这突出地表现在对磁象仪记录的理解上。现阶段的天体磁场测量绝大部分是基于光谱线的塞曼效应,可是,由于谱线是在恒星大气中经过十分复杂的辐射转移过程才形成的,因此,要正确理解观测资料,会牵涉到磁场内谱线形成的理论,而这方面的研究,尽管已有很大进展,却远不能满足客观的需要。(三)天体(例如恒星大气)是高度不均匀的,处于不同状态的物质和产生不同效果的过程常常会一道出现。一般说来,观测资料

是一大堆对象、过程和现象的错综复杂的产物。此外，地球大气和仪器也往往会使观测资料蒙受种种限制和歪曲。天文工作者就是要凭借在数量和质量上都十分有限的资料去分析高度复杂、甚至无限复杂的事物，他们当然会经常感到力不从心。这种令人困惑的局面，在天体物理工作中随时都会遇到，不仅磁场研究是如此。因此，应当承认，当前在天体磁场的研究中，矛盾和问题是很多的。

伟大领袖毛主席教导我们：“一切事物中包含的矛盾方面的相互依赖和相互斗争，决定一切事物的生命，推动一切事物的发展。”天体磁场探索中存在着矛盾和困难，是十分自然的事，正是在克服现存的困难，解决已有的矛盾中，这门学科才得以大踏步地向前发展。这方面的实例很多。例如，向量磁象仪和多通道磁象仪的制成，把太阳磁场测量提高到一个新水平，并因此而发现了许多生动微妙的现象。采用 2.6 米反光望远镜配合磁象仪，人们已能测出 30—50 高斯的恒星磁场，这比以前的精度提高了一个数量级（详见第九章 § 1）。在理论方面，人们已对磁场的精细结构、快速变化和磁湍流的影响着手进行研究。通过空间探测，人们发现了行星际空间的扇形磁场结构，从而了解到太阳上不仅有南北相反的普遍磁场，还有东西对峙的整体磁场，这从根本上改变了人们关于太阳磁场的传统观念。脉冲星是六十年代天体物理学中的重大发现之一，一般都认为，脉冲星是快速自转的中子星。然而，中子星具有强达 10^{13} 高斯的磁场，在这样极度强烈的磁场中，必须对经典的电磁场理论作出重大的修改。目前，天体磁场研究正在迅速发展，今后必定会取得更加重大的成就。

必须指出，在天体磁场工作中，太阳磁场占有特别重要的地位。现有的天体磁场研究，无论是观测方面还是理论方面，很大部分的工作都是对太阳进行的。这种状况不难理解。太

阳是距离我们地球最近的一颗恒星，对于生活在地球上的人类来说，太阳是最亮、最大，也是唯一可以看到表面细节的恒星。从二十世纪初期起，天文工作者就一直用很大的精力研究太阳的磁场，而且已经取得了比较完整、比较可靠的成果。本书将在第四章至第七章，用四章的篇幅来介绍这方面的情况。

参 考 文 献

- [1] Lehnert B. (ed.), 1958, *Electromagnetic Phenomena in Cosmic Physics*.
- [2] Lüst R. (ed.) 1965, *Stellar and Solar Magnetic Fields*.
- [3] Howard R. (ed.), 1971, *Solar Magnetic Fields*.
- [4] Cimino M. (ed.) 1966, *Proceedings of the Meeting on Solar Magnetic Fields and High Resolution Spectroscopy*.
- [5] Goldsworthy F. A. et al., 1971, *Quart. J. Roy. Astr. Soc.*, 12, No. 4.
- [6] Canuto V. (ed.), 1975, *Role of Magnetic Fields in Physics and Astrophysics*.
- [7] Пикельнер С. Б., 1966, *Основы космической электродинамики*, 2-е изд.