

p353
111

日 地 空 间 物 理

〔日〕大林辰藏 著

冯克嘉 译



北京师范大学出版社

31409

内容简介

本书是一本介绍“日地空间物理”的著作，全书以太阳风和行星际空间、太阳耀斑粒子、地球磁层的边界范围、辐射带、磁层大气、磁层内的波动现象为重点，系统地介绍了日地空间物理的发展情况以及有关课题的研究状况。

本书可供天体物理、空间物理、地球物理和宇航工程等领域的专业同学和工作人员参考。



日地空间物理

[日]大林辰藏 著

冯克嘉 译

*

北京师范大学出版社出版

新华书店北京发行所发行

西安新华印刷厂印刷

*

开本：850×1168 1/32 印张：20 字数：492千字

1984年5月第1版 1984年5月第1次印刷

印数：1—2,850

统一书号：13243·26 定价：(平) 2.90 元
(精) 3.70 元

译 者 的 话

本书是根据日本裳华房1976年出版的《物理学科选书》第五卷《宇宙空间物理学》的第四版译出的。原书的作者是日本东京大学宇宙航行研究所的教授大林辰藏博士。本书是一本介绍“日地空间物理”的著作，全书以太阳风和行星际空间、太阳耀斑粒子、地球磁层的边界范围、辐射带、磁层大气、磁层内的波动现象作为重点，比较系统地介绍了日地空间物理迅速而有节奏的发展情况以及有关课题的研究情况，并附以参考文献、述评性文章和参考书的目录。为了促进中日科学文化交流，将该书译出，供有关教学和科研人员参考。

在本书翻译过程中，承蒙北京师范大学出版社的热情帮助，由北京师范大学天文系的堵锦生、朱光华、李宗伟和地理系彭望禄等同志审阅了译稿，在此向他们致谢。

由于译者水平的限制，译文中错误和不妥之处在所难免，请读者批评指正。

前 言

在广阔无垠的宇宙空间，我们的太阳只是银河系恒星大集团中的一颗恒星。太阳系空间除了存在着包括地球及其卫星在内的行星系统、彗星、流星等天体外，还布满了从太阳抛出的高温等离子体流和各种辐射线。地球是一颗位于太阳系内离太阳比较近的行星，地球表面覆盖着陆地和海洋以及深厚的大气层，随着四季的变迁在经常变化。由于地球具有强磁场，极地附近的大气有时被所谓极光光幕包围，而围绕地球的高能粒子带却可以延伸到几万公里。

一般认为，包括地球大气在内，发生在行星际空间的各种自然现象，它们的起因基本上都是由于太阳辐射的巨大能量和等离子体流，而且从很早以前就作过许多观测和研究。尤其是最近，不仅停留在从地面进行观测，利用科学实验卫星和空间探测器，已经能够直接探测遥远的大气外空间，开始从事更加积极的研究工作。

所谓空间科学的研究领域，就是把历来的天文学、地球科学以及与其有关的基础物理学、化学、生物学和宇航工程等包括在内的综合科学，而本书叙述的只是发生在以太阳——地球系统为中心的空间内的自然现象，并且把它作为主题来解释，命名为日地空间物理。因而在这里把所谓宇宙空间局限在日地周围；可是，这种思路未必适当。希望读者理解，这里所说的宇宙空间，只是现在以及不久的将来我们使用各种空间探测器直接进行观测和研究的可能领域。本书的内容也是以现代的重要研究课题为重点，对于研究的对象则不拟扩大或者缩小，因而把概论性的内容尽可能简略地归纳在绪论之中。

日地空间物理学的研究，在过去十年间，相对于以往的科学分支而言，虽然经验不足，却在迅速而有节奏地发展，估计这种形势会继续下去。考虑到今天出现的新观点明天有可能变成旧观念，因而在回顾发展概况时甚至舍弃了事态发生的起因，在不少章节中只停留于介绍这些课题的研究现状。关于参考文献等，只列举出一部分颇有代表性的参考书和述评性的文章，此外请读者参见专门杂志。

在本书写作过程中，承蒙“物理学科选书”编委永田武教授、裳华房书店的远藤恭平和菅沼洋子两位的帮助，又承日本东京大学宇宙航行研究所的同事们讨论和校阅了本书的原稿，给作者很多鼓励和支持，对此，同时表示感谢。

大林辰藏

1970年2月11日



照片 猎户座马头状星云

目 录

绪论 宇宙——太阳——地球	(1)
1. 宇宙空间	(1)
1.1 太阳系	(1)
1.2 银河系	(2)
1.3 河外空间	(4)
2. 太阳	(6)
2.1 太阳作为一颗恒星	(6)
2.2 太阳大气	(8)
2.3 太阳辐射谱	(11)
2.4 太阳活动区	(13)
3. 行星际空间	(17)
3.1 行星	(17)
3.2 固体微粒	(22)
3.3 行星际等离子体	(25)
4. 地球和月球	(28)
4.1 地球	(28)
4.2 大气层	(31)
4.3 磁层	(34)
4.4 月球——地球的卫星	(43)
5. 观测宇宙的窗口和大气外观测	(45)
5.1 来自宇宙的信息	(45)
5.2 从地面进行观测	(46)
5.3 空间探测器的大气外观测	(55)
1. 太阳风和行星际空间	(62)
6. 太阳的等离子体流	(63)

6.1	日冕	(63)
6.2	帕克的太阳风理论	(67)
6.3	太阳风的观测	(77)
6.4	太阳风的特性	(79)
7	行星际磁场	(90)
7.1	黑子磁场的成因	(90)
7.2	太阳磁场的延伸	(95)
7.3	行星际磁场的结构	(101)
8	宇宙线和行星际空间	(103)
8.1	宇宙线粒子	(103)
8.2	地磁效应和能谱	(104)
8.3	宇宙线粒子的扩散效应	(108)
9	太阳等离子体区的界限	(123)
9.1	电离氢区	(123)
9.2	太阳风的势力范围	(127)
9.3	边界区和中性氢粒子	(130)
I	太阳耀斑粒子	(140)
10	太阳耀斑现象	(140)
10.1	耀斑的结构和发展过程	(140)
10.2	耀斑的能源	(148)
10.3	磁能的转换机制	(150)
11	太阳射电爆发	(155)
11.1	太阳射电; 热辐射	(155)
11.2	耀斑射电爆发	(162)
11.3	射电的辐射机制	(168)
12	太阳宇宙线	(174)
12.1	高速耀斑粒子的发现	(174)
12.2	太阳宇宙线的各种特性	(180)
12.3	耀斑粒子的加速机制	(188)
13	太阳等离子体云	(196)

13.1	耀斑等离子体	(196)
13.2	爆炸波理论	(198)
13.3	耀斑等离子体云的结构	(205)
14.	地球暴	(207)
14.1	地球暴的概貌	(207)
14.2	异常电离现象	(211)
14.3	地磁暴及其有关的各种现象	(221)
II.	地球磁层的边界范围	(233)
15.	地球磁场的界限	(233)
15.1	地球的外部磁场	(233)
15.2	行星际等离子体和地球磁场	(235)
15.3	利用空间探测器观测	(237)
16.	磁层形成的经典理论	(240)
16.1	查普曼——费拉罗问题	(240)
16.2	自由分子流	(244)
16.3	地球外部磁场的模型	(246)
17.	边界区的结构和弓形激波	(248)
17.1	边界区的等离子体和磁场	(248)
17.2	弓形激波理论	(254)
17.3	无碰撞激波	(261)
18.	磁尾	(270)
18.1	磁尾的磁场结构	(270)
18.2	磁中性片与高温等离子体	(273)
18.3	磁尾的成因	(276)
18.4	彗星、月球、行星和太阳风	(283)
IV.	辐射带	(295)
19.	辐射带	(295)
19.1	范艾伦带的发现	(295)
19.2	磁场内带电粒子的运动	(298)
19.3	斯陶莫理论	(302)

19.4	粒子运动的绝热不变量	(309)
20.	粒子辐射的结构	(318)
20.1	粒子通量的空间分布	(318)
20.2	粒子能谱	(324)
20.3	粒子通量随时间的变动	(326)
21.	辐射带的起源	(331)
21.1	高能粒子源	(331)
21.2	粒子加速和消失机制	(335)
21.3	辐射带粒子的输运理论	(339)
21.4	太阳等离子体粒子的流入过程	(349)
V.	磁层大气	(360)
22.	磁层等离子体大气	(360)
22.1	啸声空电和等离子体层	(360)
22.2	温度分布和离子组成	(365)
22.3	高温等离子体区域	(374)
23.	等离子体大气的电动力学 (I)	(376)
23.1	电离层的特性	(376)
23.2	电离层的发电机理论	(382)
23.3	磁场变动的电流系统和磁层电场	(392)
24.	等离子体大气的电动力学 (II)	(405)
24.1	磁层等离子体粒子的运动和加热	(405)
24.2	磁层的对流模型	(410)
24.3	磁层的粒子分布	(419)
24.4	太阳风和磁层电场	(421)
25.	地磁暴、极光耀斑	(424)
25.1	地磁暴的结构	(424)
25.2	极光现象	(433)
25.3	磁层亚暴	(439)
VI.	磁层内的波动现象	(460)

26. 磁层内的电磁辐射	(460)
26.1 等离子体内的电磁波动模式	(460)
26.2 啸声波的各种现象	(471)
26.3 等离子体声波	(490)
26.4 地磁脉动	(491)
27. 等离子体内的电磁波理论	(511)
27.1 电磁波的基本方程	(511)
27.2 电磁波的传播	(524)
27.3 热等离子体波动理论	(533)
28. 粒子与波动的相互作用	(547)
28.1 粒子和波动的共振现象	(547)
28.2 粒子流引起的波动激发	(559)
28.3 电磁波的共振衰减	(576)
29. 等离子体的不稳定现象	(583)
29.1 等离子体的稳定性	(583)
29.2 微观不稳定	(585)
29.3 宏观不稳定	(593)
29.4 等离子体湍动	(599)
附录 1 物理常数和单位系统	(615)
附录 2 描述自然现象的基础微分方程	(616)
附录 3 麦克斯威的电磁场方程	(619)
附录 4 矢量变换公式	(620)
附录 5 粒子速度、能量、动量和刚性	(622)
附表	(623)

绪论 宇宙——太阳——地球

记述日地空间发生的各种自然现象，理解其事实，是日地空间物理学的目的。在进入这个主题之前，对即将作为研究对象的宇宙空间有必要作一般的概观性叙述。因此，应当理解太阳系在宇宙空间所处的位置，叙述簇拥着它的空间内的主要能源——太阳——的作用。接着，打算说明行星系空间的结构，作为行星的地球及其卫星，关于地球大气内的各种现象。最后，也简单地涉及作为接收来自宇宙信息的窗口，我们利用它进行测定和有关观测的方法等。

1. 宇宙空间

1.1 太阳系

太阳是我们银河系内一颗明亮的恒星。在被称为直径10万光年的银河系空间内，受太阳支配的空间还不到它的一亿分之一；即使如此，也占据着直径120亿公里的宽阔空间。太阳系内的主要天体由9颗行星所组成，地球属于包括水星、金星、火星在内的类地型内行星，它们是离太阳最近的集团。与此相反，木星、土星、天王星、海王星等巨行星却远得多，利用以地球和太阳的平均距离作为基准的天文单位距离（ $1\text{AU} = 1.495 \times 10^8$ 公里）量度，它们分别位于5~30AU的轨道上。到行星系空间边界冥王星为止的距离，实际上约有40AU。

从前，人们相信，太阳系空间除了有围绕着太阳运行的行星、小行星、彗星以及偶尔飞来的流星之外，是毫无它物的真空世界。然而，现在已经知道，这个空间充满了稀薄的高温气体，

其中吹刮着速度大于300公里/秒的太阳风和高能宇宙线粒子群，是既有磁场又有电磁波的令人眼花缭乱和丰富多彩的空间。位于其中心的灿烂辉煌的恒星就是太阳。来自太阳辐射的巨大能量是发生于太阳系空间和行星大气内的各种现象的能源。正如即将叙述的那种情况，它已经成为日地空间物理课题的重点。

1.2 银河系

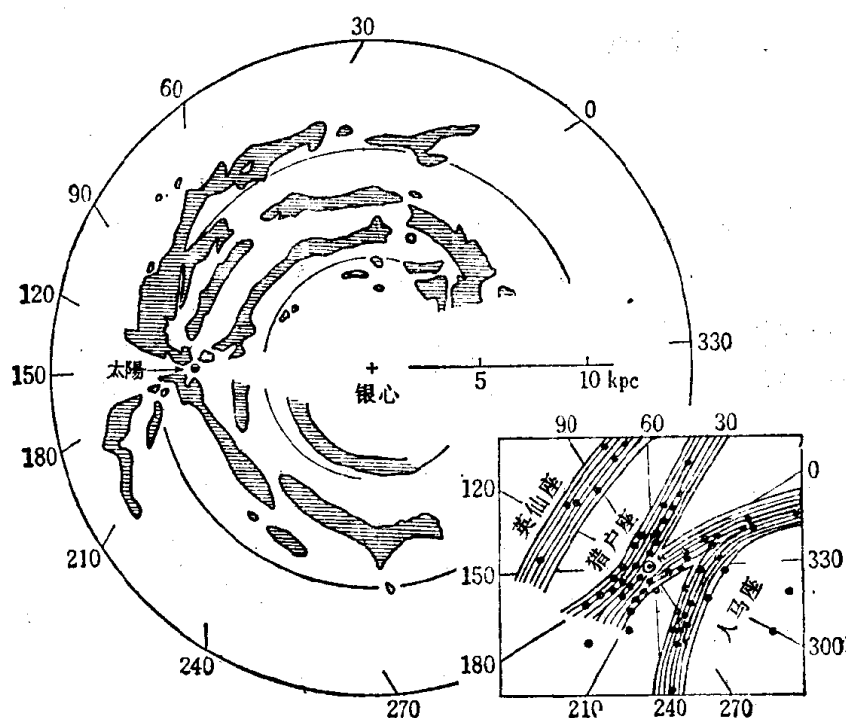
太阳系空间的外侧是浩茫、宽广而巨大的银河系空间。据估



照片 仙女座星云的巨大旋涡结构

计，银河系的直径为10万光年（ 10^{18} 公里），有1,000亿颗恒星充塞于银河系内。很早以前，有人曾经错误地认为地球是宇宙的中心，所有的天体都在围绕着地球转动，直到1543年，哥白尼提出并且证实地球和其它行星都在围绕着太阳转动的模型。之后，才知道太阳也位于银河系这个恒星集团内，太阳只不过是位于银河系稍靠边缘的一颗平凡的恒星而已。如果说，在河外星系中与我们银河系同量级的星系多到无法胜数也并不过份，我们现在只能观测到远方的位于100亿光年的星系。

为了了解我们银河系的姿态，最合适的样版就是离我们约为200万光年的仙女座星云（M31）。当18世纪发现仙女座旋涡星云后，康德和后来的拉普拉斯就把仙女座星云想象为激烈燃烧着的



图片 根据21厘米银河射电波的研究而了解到的银河系旋涡结构

气体旋涡，并且流传着从那种旋涡星云中可能诞生类似于我们太阳系的佳话。然而，这样的星云并不仅仅是气体团块，现在已经清楚地了解到，仙女座星云是与我们银河系匹敌的河外星系之一。

在银河系内，太阳系位于距银心大约30,000光年(3×10^{17} 公里)的区域。最近，根据射电天文和恒星光度测量了解到，在我们太阳系附近，有称为英仙座、猎户座和人马座的旋臂，太阳可能是属于猎户臂或者人马支臂内的恒星。

正象仙女座星云的照片表示的那种情况，在旋涡星系盘内，聚集着浓密的星际气体和宇宙尘，它们在成长，形成壮大的旋涡结构，其中有新的恒星在不断地诞生。烟中武夫编著的《宇宙和恒星》一书完美地描述了星系内恒星的诞生、演化和消亡过程。

1.3 河外空间

位于银河系外的河外空间的星系有1,000亿个以上。其中，已经知道的就有类似于我们银河系的仙女座星云以及各种类型的星系。

从河外星系的观测一开始，就发现了令人惊奇的事实，也就是膨胀宇宙的模型。从著名的哈勃定理得知，各个星系都以惊人的速度相互远离，距离愈远的星系，退离速度愈大。据估计，在50亿光年的遥远空间，其退离速度几乎接近光速。哈勃定理暗示，100亿年以前，河外空间可能集聚在一起，由于大规模的爆发，才开始形成象现在所观测到的星系。对于河外空间开始时到底有没有这种诞生迹象的疑问，我们现在还找不到答案。它也许是由于100亿年前膨胀着的原始宇宙逐渐变凉，现阶段观测到的可能就是残留下来的温度为 3°K 量级的扩展着的稀薄星云气体。最近，对于利用从亚毫米波段到厘米波段（波长0.3~30毫米）的射电观测探测到的这种量级的热辐射很感兴趣。

我们现在观测到的星系群的平均密度，大致是每200光年的



照片 以具有强射电源而闻名的半人马座A星系

距离内只有一个星系；由于区域的不同，星系中也有由 100 个以上的星云密集而成的星云集团。在那样的区域中，星云和星云也能发生类似于碰撞的情况；一般认为，以强射电源而闻名的天鹅座A和半人马座A就是被发现的两个碰撞着的星系的形态。近年来，接连观测到比普通星系亮 100 倍的恒星状星系，即所谓类星

体，它们虽然是位于10亿光年以远的天体，但是从发射出所谓 10^{45} 尔格/秒的爆发能量来分析，把任何一个类星体都可以当作强射电源看待。作为发生大爆炸的星系，前述的射电星系等，也许能够与恒星演化过程中发生的超新星爆发对比。在我们银河系经历过的所谓100亿年的历史中，产生过几次这样的大爆炸，之后才形成现在的银河系的结构，它是否能够作为人们想象的依据？

2. 太阳

2.1 太阳作为一颗恒星

太阳是位于太阳系中心的恒星，它支配着包括地球在内的行星系统的运动。通过大量的光和热的能量辐射，转换为行星及行星际空间的生命和自然现象的能源。

有关太阳的各种常数

距离	太阳的内部成份 质量比 粒子数比
(近日点1月3日) 1.470×10^8 公里	氢 $X = 0.47$ 0.80
(远日点6月5日) 1.520×10^8 公里	氦 $Y = 0.41$ 0.19
日地平均距离 1.495×10^8 公里	重元素 $Z = 0.12$ 0.01
平均视半径 $15'59.63''$	平均分子量 $\mu = 0.76$
自转轴(北极)赤经 18^h44^m , 赤纬 $+64^\circ$	太阳中心压强 4.0×10^{17} 达因/厘米 ²
自转周期 25日~27日	密度 100克/厘米 ³
恒星周期 25.38日	温度 2.4×10^7 °K
自转轴与赤道的倾角 7.25°	太阳表面的重力 2.74×10^4 厘米/秒 ²
太阳奔赴点的方向赤经 18^h36^m , 赤纬 $+29^\circ$	温度 6000 °K
太阳朝向奔赴点的速度 19.7 公里/秒	太阳的光度 2×10^{33} 尔格/秒
太阳半径 6.96×10^5 公里	光谱型 G—2V
太阳的质量 1.99×10^{30} 千克	太阳常数 1.95 卡/分钟厘米 ²
平均密度 1.41 克/厘米 ³	1.35×10^6 尔格/厘米 ² 秒