

星际介质物理学

L. 斯必泽 著

科学出版社

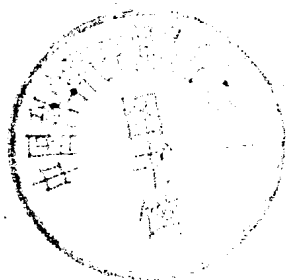
P14
616

星际介质物理学

L. 斯必泽 著

蔡贤德 译

卮振隆 校



科学出版社

1988

内 容 简 介

本书著者 L. 斯必泽是当代著名天体物理学家, 此书乃是他的一部名著。书中介绍了发生在星际介质中的各种物理过程。对于原子和分子的激发、电离和离解, 对于辐射转移和谱线形成、宇宙尘的影响、激波和电离前沿的传播、星际气体云的引力坍缩和原恒星的形成等问题, 都进行了很好的阐述。

本书可供天体物理方面的研究人员、教师和学生阅读, 也可供从事物理、光谱学、气体动力学的工作人员阅读参考。

L. Spitzer
PHYSICAL PROCESSES IN THE
INTERSTELLAR MEDIUM
John Wiley & Sons, Inc. 1978

星际介质物理学

L. 斯必泽 著

蔡贤德 译

邹振隆 校

责任编辑 夏墨英

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1988 年 7 月 第 一 版 开本: 787 × 1092 1/32

1988 年 7 月 第一次印刷 印张: 10 7/8

印数: 000 - 1,300 字数: 245,000

ISBN 7-03-000371-3/P · 63

定价: 4.10 元

序 言

在《星际空间弥漫物质》(Diffuse Matter in Space)一书出版后的八年间,星际物质的研究突飞猛进,开辟了一些全新的研究领域,包括脉冲星射电测量,超新星残骸 X 射线研究,星际云红外辐射观测,吸收线和选择消光的紫外测定等。另外,在已经确立的研究领域中也获得了新的重要成果,包括 21 厘米氢线观测, H II 区连续谱和复合线发射的射电分析以及银河系内暗弱 $H\alpha$ 发射的探测等。近几年的理论研究已使我们对这些研究领域的认识大为改观了。

显然,现在给研究生写一本有关星际物质的新教程是很合时宜的,同样很明显,如果要使这本书篇幅合适,无论怎样安排都无法写得面面俱到。所以,本书的侧重面与前书略有不同,描述的物理过程有所增加,但涉及观测部分比前书还少。尤其在发展迅速的领域,牢固掌握变动较少的物理学原理,要比泛泛知道可能很快就会过时的观测事实更为有用。因此,本书适量介绍一些观测结果是用来作为例子,说明怎样运用物理理论获得星际气体的知识。但为了给对星际研究感兴趣的科学家提供最起码的观测指导,在每个领域对这些结果的叙述看来还是足够详尽的。

由于篇幅所限和著者本人知识不足,高能天体物理学这一颇具魅力的领域完全略去了。讨论涉及相对论性粒子的各种过程所用到的物理学领域,与研究大部分星际物质的物理领域完全不同。因此,尽管在本书中,尤其在第一章里概述了一些宇宙线和同步加速辐射的基本观测资料,但是全书几乎

没有对这些论题作什么讨论。不可避免，著者的学识和兴趣对各种论题的侧重颇有影响。因此，本书对星际吸收线（特别在紫外区）的测量，要比对分子线发射或红外研究注重得多。文章压缩的程度也反映了著者个人的偏爱。正如前书一样，论述更为全面和详细，会使阅读更加方便，然而却不能提高本书的教育效果。

本书编排在许多方面与前书有所不同。特别是，对各种形态星际介质的观测结果均概括于第一章中，用以说明有关物理体系的总体性质，支配这类物理体系的各种过程将在后面几章中讨论。从第二章到第六章讨论气体中的各种局部现象，而第七、八、九章则讨论尘粒的各种局部现象。虽然多数星际研究的主题并非常常是弹性碰撞，但是第二章整章都用以论述它，因为存在动力学平衡乃是弹性碰撞的结果，而这正是以下所有理论叙述必备的基础。第三章讨论即使不详细地分析激发条件也能理解的那类气体与辐射的相互作用。第四章基于稳恒态方程对激发条件进行分析。从本质上说，同样方程在第五章里是分析电离和离解的基础，第六章乃是分析气体加热的基础。尘粒的光学特性以及有关尘粒半径、组成、平均密度的相应结果在第七章中给出。另外，光学偏振研究结果同尘粒排列的分析一起归入第八章。第九章探讨电荷、温度、辐射加速等尘粒性质的理论，并研究多少带有几分推测的尘粒演化问题。第十章到第十三章讨论星际气体的总体平衡和力学问题，包括 H II 区和超新星壳层的爆发以及恒星的形成过程。

鉴于涉及范围、重点与编排方式同前书有许多不同之处，所以本书的大部分都重新改写了。但是，在各章中，叙述基础概念的段落大体上仍遵循前书的相应内容，尤其在后面几章更是如此，讨论新观测结果比较少。纠正了前书中一些已发

现的错误,例如在讨论激波时的某些错误。另外,其他一些理论讨论,包括 1.6 节的 Oort 极限和 12.1b 节的 H II 区膨胀,则更为简短。新论及的理论课题有星际闪烁、 H_2 转动能级的光抽运、含尘 H II 区的电离、尘粒自转的加速、Rayleigh-Taylor 不稳定性、银道面内的静磁平衡、吸收流和旋涡密度波等。

《星际空间弥漫物质》一书中使用的符号大多数情况下仍予采用。有少数重大改变,其一是用下标“d”代替“g”来表示与星际尘粒有关的量,以避免和有关气体的量相混淆。用下标“G”表示在气体与尘埃一起运动的那类力学讨论中出现的气体。另外,为了同现在的一般用法相一致,采用以百分比表示的偏振 P 来代替以星等表示的偏振 p 。除了特别声明以外,所有方程中的数值均取 cgs 单位。

本书书末附有参考书目和文献,选择这些文献的出发点主要是考虑到一般性和便于讲英语的学生使用。因此,常援引的是评述文章而不是个别有关的论文。当然,不论对于哪个课题,在所有重要论文中都只选列了很少的一部分。第一章引用的著作多半是后面各章所未列出的。在正文中常常需要参考其他章节。用方括号表示本章或其他章参考文献。例如,[7]表示本章所列文献中的第 7 款,而[S4.2b]则表示参见本书第四章 4.2 节中的 b 项。书末的符号表将有助于查找定义各种符号的方程。

(致谢略)

L. 斯必泽

1977 年 6 月于新泽西州普林斯顿

目 录

第一章 星际物质概述	1
1.1 中性气体	1
1.2 光子电离气体	6
1.3 碰撞电离气体	9
1.4 磁场和宇宙线	11
1.5 银河系内的分布	13
1.6 引力质量	17
第二章 弹性碰撞与运动平衡	20
2.1 平方反比力	21
2.2 短程力	24
2.3 速度分布函数	27
2.4 热动平衡	31
第三章 辐射过程	35
3.1 辐射转移	35
3.2 发射系数和吸收系数	37
a. 吸收系数 κ_ν	39
b. 受激发射对 κ_ν 的影响	42
3.3 发射线	43
a. 光学复合线	43
b. 氢 21 cm 发射线	45
c. 射电脉泽线	48
3.4 吸收线	50
a. 氢 21 cm 线	51
b. H 和 H ₂ 的宽光学吸收线	54

c. 窄光学吸收线.....	56
3.5 热电子产生的连续谱发射和吸收.....	62
a. 射电和 X 射线的自由-自由发射.....	64
b. 射电源的连续吸收.....	65
3.6 自由电子产生的折射.....	66
a. 脉冲星信号的频散.....	67
b. 星际闪烁.....	68
c. Faraday 旋转.....	70
第四章 激发	74
4.1 碰撞致激发.....	75
a. 碰撞速率系数.....	76
b. 2 能级或 3 能级系统的理论.....	81
c. 观测到的重原子光学发射线.....	83
d. 分子的射电谱线.....	86
4.2 复合致激发.....	94
a. 低量子能级.....	95
b. 高量子能级.....	96
c. 射电复合线.....	99
4.3 光子抽运.....	102
a. 原子能级.....	103
b. H_2 的转动能级.....	104
第五章 电离和离解	111
5.1 氢的电离.....	113
a. 吸收系数和复合系数.....	113
b. 无尘 H II 区.....	116
c. 尘埃对 H II 区的影响.....	120
d. 因高能粒子而引起的电离.....	123
5.2 重原子的电离.....	126
a. 光子电离.....	127
b. 碰撞电离.....	128

c. 电荷交换及与分子的反应	129
5.3 分子的形成与离解	133
a. H_2 的平衡丰度	134
b. HD 的平衡	137
c. 其他的分子	139
第六章 运动温度	141
6.1 H II 区	143
a. 加热函数 Γ	144
b. 冷却函数 Λ 和平衡温度 T_E	146
6.2 H I 区	150
a. 冷却函数	151
b. 加热函数	154
第七章 尘粒的光学特性	161
7.1 光学效率因子	163
7.2 选择消光	166
a. 尘粒的空间分布	167
b. 消光随波长的变化	170
7.3 一般消光	173
a. 一般消光与选择消光之比	173
b. 尘粒的平均密度和投影面积	175
c. 可见星云和云的主要类型	176
7.4 散射	178
a. 弥漫银河光	178
b. H II 区中的散射光	179
7.5 红外发射	180
第八章 偏振和尘粒排列	184
8.1 非球状粒子的光学性质	185
8.2 观测到的偏振	187
a. 与色余的关系	187
b. 与波长的关系	188

c. 与银经的关系	191
d. 圆偏振	195
8.3 尘粒排列	196
a. 守恒转矩	197
b. 加速碰撞转矩	199
c. 减速磁转矩	202
第九章 尘粒的物理性质	206
9.1 固体物质的温度	206
a. H I 区	207
b. H II 区	210
9.2 尘粒的电荷	213
a. 与电子和离子的碰撞	214
b. 光电发射	215
9.3 辐射加速	217
a. 绕磁场的迴转	218
b. 与气体的动力摩擦	219
9.4 尘粒的演化	222
a. 形成和生长	222
b. 表面侵蚀和碎裂	225
第十章 宇宙气体动力学原理	231
10.1 基本方程	231
a. 维里定理	234
10.2 激波前沿	235
a. $B=0$ 的理想气体	236
b. 磁流体激波	239
10.3 不稳定性	240
a. Rayleigh-Taylor 不稳定性	241
第十一章 银河系中的总体平衡	244
11.1 星际气体的参数	244
a. 物理状态	244

b. 云运动的能源	249
11.2 银河系的平衡	251
a. 球对称系统	251
b. 平面一维系统	252
c. 平面引力势内的平衡	254
11.3 云的平衡	259
a. 球形云, $B=0$	261
b. 磁化云	262
第十二章 爆发运动	265
12.1 H II 区	265
a. 电离前沿	266
b. 气体的初始电离	268
c. 电离气体的膨胀	270
12.2 超新星壳层	274
a. 超新星物质的初期膨胀	275
b. 中期非辐射膨胀	276
c. 晚期的等温膨胀	279
d. 数值解	280
12.3 爆发对云的影响	282
a. 被 H II 电离前沿淹没的 H I 云	283
b. 被激波前沿淹没的 H I 云	286
第十三章 引力运动	289
13.1 吸积	289
a. 冷气体的均匀流	289
b. 球对称的绝热流入	291
c. 均匀绝热流	294
13.2 旋涡密度波	296
a. 旋涡圆盘内的气体运动方程	297
b. 激波的产生	299
13.3 引力凝聚和恒星形成	301

a. 引力不稳定性.....	302
b. 球的引力坍缩.....	306
c. 碎裂.....	309
d. 角动量的转移.....	311
e. 磁通量的减小.....	314
参考文献.....	318
符号表.....	328
补充读物.....	336

第一章 星际物质概述

在银河系内星与星之间的广漠空间中，进行着许多不同类型的物理过程。恒星内部产生的能量被星际介质吸收和再发射，这可用来弄清星际介质内的各种物理条件。富含重元素的物质从星体抛出，同周围的气体混合，凝聚形成新一代星，决定了银河系历时几十亿年的演化。本书以下各章分析其中的一些过程，特别是那些看来已理解得相当清楚的过程，并且讨论怎样才能运用理论去说明观测资料和得到有关星际物质性质和演化的结论。

为了从正确的观点来看这些理论上的讨论，对所要分析的物理系统有一个总的了解是有益处的。本章即打算相当概略地并且非定量地介绍这方面的知识。所以下面几节分别按主要成分氢的电离态分类的三种不同相，讲讲我们对于星际气体的了解。这个讨论包括对气体各种成分的观测，除了氢气和氦气外，还包括微量的轻元素原子，微小的固体粒子亦即尘粒，星际磁场，被这个磁场约束的高能带电粒子和星际介质产生的引力场等。

1.1 中性气体

测定中性氢原子发射的波长 21.11 cm 辐射，提供了有关通常称为 H I 区分布的大量信息。在太阳附近，中性氢的粒子密度 $n(\text{H I})$ 的总平均值约为 $1\text{ 个原子}/\text{cm}^3$ [S11.1a]。这种气体的“有效厚度” $2H$ 随着到银心距离的增加而略有增加，在太阳附近，它约为 250 pc 。有效厚度定义为用银河系中央

面的 $n(\text{H I})$ 除以 $N(\text{H I})$ 得到的值, $N(\text{H I})$ 即所谓“柱密度”, 它是垂直银道面穿过银河系、截面为一平方厘米的圆柱体内包含的中性氢原子数. 一般认为, 星际介质的大部分质量(大概在 95% 以上)是属于这种中性相的氢和氦.

从地面和从大气外对原子吸收线进行测定, 在离太阳约 1 kpc 的范围内, 可以获得有关 H I 区中的气体分布和气体速度的更详细信息. 所作测定表明, 大部分中性气体多聚集成一些分离的“云”, 它们的特征是具有一定范围的视向速度值. 比较显著的 H I 云的视向速度弥散约为 6 km s^{-1} [S11.1a]. 有些云的视向速度 v_r (相对于本地静止标准) 比这要大得多, 其中一些甚至超过 50 km s^{-1} . 在距银道面 750 pc 以上的地方观测到的一些云就具有这样的速度值.

在这种中性氢云内, 表征原子随机速度的运动温度大抵在 50 至 150 K 之间, 平均约为 80 K. 观测河外射电源谱的 21 cm 吸收线以及由星际 H_2 (其紫外吸收线可借助大气外望远镜观测到) 的正氢与仲氢之比 [S4.3b] 都能得到大致相同的数值. 对于密度较高、更不透明的云来说, 测定波长在 0.26 cm 的 CO 发射说明, 气体温度一般小于 40 K. 在 H II 区周围, 云的平均温度约为 30 K, 内部可能没有强能源的暗云其平均温度约为 10 K. 在这些云的中心部分, 温度大概还要低些. 那里的运动温度接近于对宇宙黑体辐射测得的 $2.7 \text{ K}^{[1]}$. 另外, 由在波长 21 cm 的观测资料和紫外吸收线也都证明, 有相当一部分中性氢, 它们的分布似更近于均匀介质, 其 $n(\text{H I})$ 的范围从 0.05 到 0.2 cm^{-3} , 温度 T 可达 6000 K [S11.1a]. 显然, 在 H I 区, 气体的密度和温度范围都可能很宽.

除原子氢以外, 在星际云的其它成分中最显著的一种是尘埃, 也就是大量半径在 10^{-4} cm 以下的微小固体粒子 (即尘粒). 这些尘粒对所有波长的辐射都有吸收和散射作用, 由

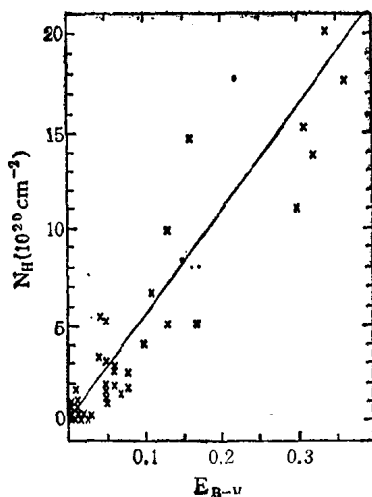


图 1.1 N_H 与 E_{B-V} 的关系。按色余 E_{B-V} 和不同恒星视线方向上氢原子的柱密度 $N_H(\text{cm}^{-2})$ 的关系作图。色余用来量度各视线方向上尘埃的总量。图上所标各点均取自第三章的文献[32]，它们都是由 $L\alpha$ 吸收求得的 $N(\text{HI})$ 和由 H_2 分子的谱线求得的 $2N(\text{H}_2)$ 之和。电离氢的柱密度 $N(\text{H II})$ 不计在内。

于这两种过程的有效截面一般随波长减小而增加，因此透过云看到的恒星颜色会有所改变，波长较短的光减弱得要多一些。在从地球一直延伸到恒星、截面为一平方厘米的圆柱体内含有的尘粒质量可通过色余 E_{B-V} 来测出。色余 E_{B-V} 定义为被测恒星的色指数 $B - V$ 和光谱型相同且未经红化的近距恒星的色指数之间的差(以星等表示)。如图 1.1 所示，在 N_H (沿恒星视线方向的氢原子柱密度)和 E_{B-V} 之间显示出十分好的相关性，要比从它们与距离的相关性所预料的好得多，而这两个量与距离的相关性都很差。图上的一些点子零落散布，部分可能是因为某些沿视线方向的尘粒处于电离区，它们对 $N(\text{HI})$ 没有贡献。利用吸收和散射的理论截面解释这些

资料,可以得到星际空间的气体质量(包括 He)与尘埃质量之比约为 160,同大多数重元素以及约 $1/3$ 的 C, N, O 原子凝结在尘粒上的观点一致 [S7.3b]。H₂ 分子也是显著的 H I 吸收云的重要成分。分析 H₂ 的星际吸收线表明,在所研究的较不透明的云中,分子氢所占比例达 $2/3$ 。在不透明度大到不能进行这类分析的云中,大部分氢应取分子形式。

正如根据大量吸收线(特别在紫外区)的测量所确定的一样,星际气体的化学组成与表 1.1 列出的“宇宙组成”稍有不同^[2.3],后者系依据对太阳、恒星和陨石的研究测定的。表中的“宇宙丰度”一栏对每种元素 X 都给出了 $\log_{10} N_X$ 且都归一化到 H 的值 12.00。为了比较起见,还给出了星际气体中的各种原子在红化星 ζ Oph^[3] (蛇夫座 ζ 星,光谱型 O 9.5 V, $E_{B-V} = 0.32$ 星等)视线方向上减损的测定值,这颗星的光明显经过了 H I 云。

减损定义为,元素 X 和氢的柱密度对数比,减去对标准宇宙组成而言的相应对数比。在 ζ Oph 方向上的云中,看来已凝结的气体包含大约 $3/4$ 的 C, N, O 原子以及近乎百分之百的像 Fe, Ca 和 Al 那样的难熔元素。在未红化星的方向上,减损看来要小些,轻元素尤其是如此 [S3.4c]。如果“短缺原子”处在尘粒中,那么同上面提到过的尘埃-气体质量比的观测值大体一致。

有关云分布的统计信息最好由测量尘埃获得,因为几千颗距离已知的恒星都有 E_{B-V} 的值。这些资料可用两类云来说明,也就是比较透明的“标准云”和较不透明的“大暗云”,由它们引起的照相消光对每个云分别为约为 0.2 和 1 星等。可以认为,大暗云就是在银河中见到的直径约 70 pc 的吸收区(暗区)。典型标准云的直径可能在 10 pc 左右。两类云的氢原子密度看来都约为 20 cm^{-3} 。



图 1.2 H II 区 NGC 2237 (玫瑰星云)的一部分,这是用 Hale 天文台 Palomar 山的施密特望远镜拍摄的红外照片.

O 星协 I Mon 使气体电离. 该星协包含从 O5 型 (HD 46223) 到 O9 型的共 9 个 O 型星,中心位于图左下方的星团 NGC 2244.

这个系统距离太阳约为 1500 pc.

检查银河照片 (见图 1.2) 或者详细研究每个云都可说明, H II 区的物理性质所及范围实际上很宽,只有两类云的模型是个非常粗糙的近似. 显然,从大到几千秒差距到小至照