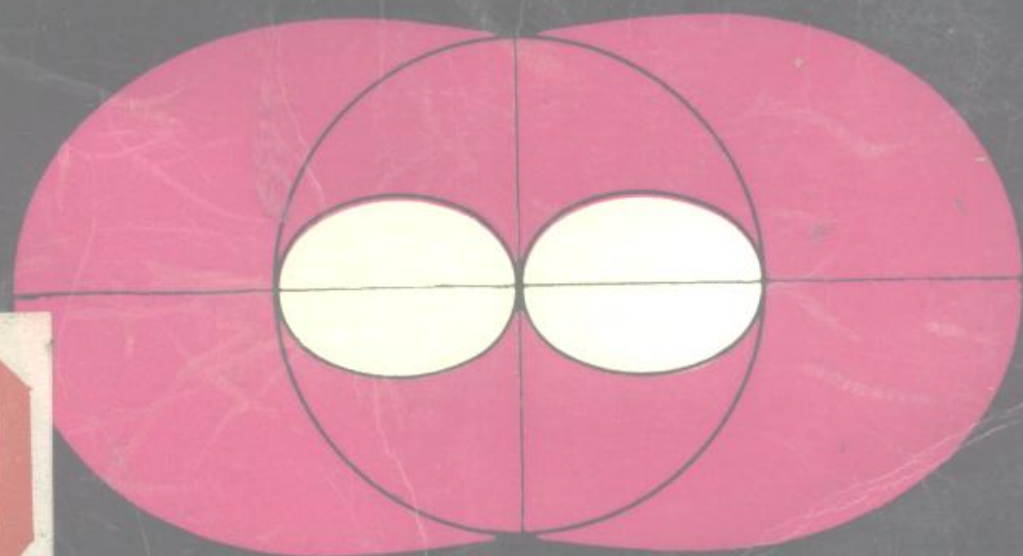


大气光学

分子和粒子散射

(美) E.J.麦卡特尼 著



科学出版社

P427.1

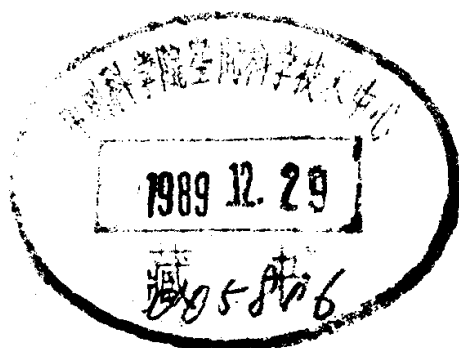
MKTN

大气光学

分子和粒子散射

TW253/美] E. J. 麦卡特尼 著

潘乃先 毛节泰 王永生 译



科学出版社

1988

0005816

内 容 简 介

本书从光散射的基本性质出发,阐述了与散射有关的大气光学现象,介绍了光学工程中因涉及大气所用到的种种大气模式和计算方法。特别详细论述了与散射有密切关系的大气气溶胶粒子,如霾、雾、云、雨等粒子的性质。书中着重从应用的角度讨论了 Rayleigh 散射以及单分散与多分散系的 Mie 散射问题。书末附有大量实用的数据、图表及参考文献。

本书可作为从事大气物理学,特别是大气光学工程的科技人员,以及有关专业的研究生、大学生的参考书。

Earl J. McCartney
OPTICS OF THE ATMOSPHERE
Scattering by Molecules and Particles
John Wiley & Sons, Inc. 1976

大 气 光 学

分子和粒子散射

[美] E. J. 麦卡特尼 著

潘乃先 毛节泰 王永生 译

责任编辑 许贻刚

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1988年9月第一版 开本: 787×1092 1/32

1988年9月第一次印刷 印张: 13 1/2

印数: 0001—1,050 字数: 301,000

ISBN 7-03-000500-7/P·91

定价: 7.50元

译 者 的 话

大气光学不仅是大气科学工作者关心的课题,而且与光学有关的其他学科的科技工作者也日益需要大气光学的有关知识。自从利用光作为通讯和探测目标物的手段以来,大气对光的散射和衰减作用就开始受到重视。六十年代又出现了激光技术,以此为基础发展起来的通讯、探测和武器系统等工程都需要考虑大气对它们的影响。不充分考虑大气(它的物理状况在各种天气条件下是不断变化的)对光传播的影响就会使光学系统工程的效能、适应性降低,有时甚至使工程目的无法达到。大气光学就是讨论各种天气条件下大气(包括其中某些不同的成分)对光传播的影响,对光的散射、吸收、衰减和消光等物理效应,从而为解决某些光学工程问题提供物理依据和计算方法。大气对光的作用同样被用来研究大气的某些属性,例如光的散射和吸收被用来探测大气中特定的污染物,使激光雷达成为监测污染的手段之一。

本书主要着眼于满足工程技术人员的需要,所以作者在中等技术水平上陈述大气光学这一课题。除上述对象外,在大气物理、大气污染和气象等领域工作的专业人员需要了解有关光在大气中的散射问题时,也可参考本书。它是目前仅见到的一本大气光学著作,所以也可以作为大气物理专业学生的参考书。因为本书的读者范围较广,在某些问题的理论阐述上就不够充分和严谨,例如多次散射问题几乎没有提到。不过这并不影响本书成为上述读者的一本实用的常备参考书。

本书第一章由王永生译,第四、五、六章由毛节泰译,其余部分由潘乃先译。全书由潘乃先校定。本书的术语涉及光

学、天文学、气象学、云和降水物理学、气溶胶力学等等方面。其中有的名词尚未见有统一的译法，且读者也不一定都熟悉各专业领域里的用语，为此我们把一部分名词用英汉对照方式列在书后。为便于读者查找文献，原书的参考文献目录全部附上。

原书中已发现的错误之处译者都已一一改正，除少数予以注明外一般不再申明。译者非常感谢王明星同志对本书译稿提出的宝贵意见。虽经修改和校对，译文中难免还会有错误或不当之处，欢迎读者批评指正。

本书所出现的非法定计量单位换算表

非法定计量单位名称	物理量名称	换算关系
英里 (mile)	长度	$1 \text{ mile} = 1609.344 \text{ m}$
英尺 (ft)	长度	$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$
英寸 (in)	长度	$1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m}$
码 (yd)	长度	$1 \text{ yd} = 0.9144 \text{ m}$
海里 (n mile)	长度	$1 \text{ n mile} = 1852 \text{ m}$
英亩 (acre)	面积	$1 \text{ acre} = 4046.85 \text{ m}^2$
达因 (dyn)	力	$1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N}$
尔格 (erg)	功	$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$
卡 (cal)	热	$1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$
磅 (lb)	质量	$1 \text{ lb} = 0.453592 \text{ kg}$
塔尔波特 (T)	流明秒	$1 \text{ T} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{s}$
辐透 (ph)	光照度	$1 \text{ ph} = 10^4 \text{ lx}$
熙提 (sb)	光亮度	$1 \text{ sb} = 10^4 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$
尼特 (nt)	光亮度	$1 \text{ nt} = 1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$
朗伯 (L)	尼特	$1 \text{ L} = 3183 \text{ nt}$

序 言

本书奉献给那些想要更多地了解大气中发生的散射过程及其对光在大气中传播的影响的读者。在大气物理、气象、空气污染控制和军事监视领域里都会找到有这种需要和兴趣的人。预计中的读者可能有科学家、设计师、开发工程师或技术人员——所有这些人都会不同程度地涉及到电子光学仪器或目视仪器以及大气性质的测量,或许还会有离开本身专业范围的涉猎者,这类读者想对我们的物理环境进行探究。作为一个与有关大气中光的传播问题打了多年交道的工程师,我在撰写本书期间始终考虑到这些未来的读者。

现在处理大气散射已经能够利用近些年获得的大量资料。在过去三十年间,地球环境的研究已经上至大气层顶下达海洋底部。这些研究活动一直在继续,现在,知识增长之快好比一次连续的爆炸。大气物理学和气象学在这一增长中名列前茅,因其兴趣的广泛和涉及到主题的范围使之成为交叉学科和全球性的学科。大气光学分享了这两门渊源学科的发展,它处理大气的物理性质和光的传播之间的关系。这些关系展现在可以观测到的所谓散射、吸收、放射和折射等过程中。

本书的目的是把大气物理性质方面和散射理论、原理方面的有关知识综合在一起,并将这些知识以适于直接使用的形式来描述和表达。这样,我们就要在光学和大气物理学领域的专门知识和那些并非在所有这些宽广的领域里都是专家的人们的需要之间进行协调。为适应背景各不相同的读者而

遵循这一折衷的原则,自然就带来了一个如何表达的难题.有关本课题的这一或那一方面的某些新的有价值的东西一定要介绍给每位读者,尽管他可能是另外某一方面的专家.

本书采用中等技术水平来表述.我相信这个水平在任一方面都适合已经确定技术方向的初学者的需要,但又不是太初步以致使这方面可能已经是专家的读者感到厌烦.已经作了各种努力,使本书作为深入一步研究的基础在理论上是充分的,而对于帮助解决具体问题来说在实用上是足够的.这卷书如它采用的书名所示仅处理散射问题.考虑到书的篇幅和题材单一性才加上了这个切实的限制.计划在第二卷中把大气的吸收和放射包括进去并采用类似本卷的处理方式.

我知道我是受益于很多人的.首先,当然是自从 Rayleigh 爵士那个时代起发表了研究和实验成果的许多大气光学工作者.本书主要取自 Humphrey 的《大气物理学》(*Physics of the Air*, 1940), Middleton 的《在大气中观察》(*Vision through the Atmosphere*, 1952), Johnson 的《物理气象学》(*Physical Meteorology*, 1954) 和 Van de Hulst 的《小粒子散射》(*Scattering by Small Particles*, 1957). 另一些见解和观点是从 Hulburt 及其海军研究实验室的同事, Elterman 和空军剑桥研究实验室许多其他工作人员、Deirmendjian 和 Penndorf 以及在本书中提到过他们的作品的许多人所发表的技术文献中得来的.

作者深深感谢那些无微不至的具体帮助.我在斯佩雷-兰德公司陀螺仪部当研究工程师的时候就计划好全书并写了一个初稿,那时 L. W. Holmboe 博士和 E. W. Cheatham, T. C. Hutchison 和 R. W. Jagoe 等给了我很多鼓励和帮助.我特别感谢斯佩雷工程图书馆的 Jimmie Aushman 夫人多年的亲切帮助.文献目录中引用的许多技术文献和报告是在她

的协助下得到的。我们常常不免把一个好的技术性图书馆所做的必不可少的服务工作看做是理所当然的。

我愉快地向我的好朋友美国交通部的 W. I. Thompson, III, 和汤普生-雷摩-伍尔雷奇集团的 H. M. Rathjen 对我的工作的热心和鼓励表示感谢。Mildred Anderson 夫人细心地打印了好几次修订稿, 在此我表示谢意。我要感谢《纯粹光学和应用光学丛书》的顾问编辑 Stanley S. Ballard 教授仔细地审阅了本书并提供了很多有益的建议。尤其是, 我要感谢威利出版公司的 Beatrice Shube 在长时期内所给予的专家意见以及对本书定会完成的充分信心。我想, 有机会写这本书是幸运的。

Earl J. McCartney

纽约, 洛克维尔中心

1976 年 8 月

目 录

第一章 大气散射综述.....	1
1.1 散射的作用.....	2
1.2 辐射度学与光度学基础.....	3
1.2.1 标准术语.....	4
1.2.2 几何方面的考虑.....	5
1.2.3 辐射度学的量.....	7
1.2.4 辐射亮度的进一步研究.....	12
1.2.5 眼睛的反应.....	14
1.2.6 光度学的量.....	16
1.3 散射的主要特征.....	21
1.3.1 散射过程的性质.....	21
1.3.2 散射的类型.....	24
1.3.3 粒子群的散射.....	25
1.3.4 散射与吸收之间的区别.....	27
1.4 大气中的散射.....	28
1.4.1 角散射与偏振.....	28
1.4.2 总散射与衰减.....	31
1.4.3 衰减的其他度量法.....	33
1.4.4 透射比和光学厚度.....	35
1.5 沿大气路径的能见度.....	37
1.5.1 空气光.....	37
1.5.2 目标-背景对比度.....	40
1.5.3 视觉阈.....	41

1.5.4	视程与气象视距	45
1.5.5	点源的能见度	48
1.6	大气光学文献	49
1.6.1	教科书与专著	50
1.6.2	学会期刊与技术杂志	50
1.6.3	科学和工程技术报告	52
第二章	大气的结构和成分	55
2.1	动力理论的基本参量	56
2.1.1	分子参量	56
2.1.2	气压、体积和温度	60
2.1.3	Maxwell-Boltzmann 分布	63
2.1.4	大气定律	66
2.2	大气层	67
2.2.1	对流层	68
2.2.2	平流层及其以上	71
2.2.3	恒常气体成分	73
2.2.4	可变气体成分	75
2.2.5	水汽的性质和测量	78
2.3	大气模式	84
2.3.1	等密度模式	84
2.3.2	等温模式	85
2.3.3	多元模式	87
2.3.4	美国标准大气	89
2.4	铅直大气的量度	93
2.4.1	恒常气体的垂直廓线	94
2.4.2	可变气体的垂直廓线	95
2.4.3	大气折简高度	100
2.5	光学路径的定量处理	102

2.5.1	地球坐标系、折射和地平几何图形	102
2.5.2	大气散射的几何分析	108
2.5.3	等效路径: 地球表面近似为平面	110
2.5.4	等效路径: 地面为球面	114
第三章	大气中的粒子	122
3.1	霾气溶胶的来源和性质	122
3.1.1	尘埃粒子及其来源	123
3.1.2	吸湿性粒子及其来源	126
3.1.3	凝结核的尺度特性	129
3.1.4	粒子的清除过程	135
3.2	霾粒子谱	141
3.2.1	粒子尺度和浓度的度量	142
3.2.2	指数谱分布函数	146
3.2.3	幂指数律谱分布函数	148
3.2.4	测量和推演得的谱分布	151
3.3	霾气溶胶的垂直分布	156
3.3.1	来自取样和光学探测的资料	157
3.3.2	平均的浓度随高度的关系	161
3.3.3	霾的模式垂直廓线	164
3.4	雾滴、云滴和雨滴的特征	166
3.4.1	雾的来源和分类	167
3.4.2	雾滴谱分布	168
3.4.3	云的分类和云滴谱分布	173
3.4.4	雨滴的谱分布	181
第四章	分子的 Rayleigh 散射	186
4.1	Rayleigh 和散射理论	186
4.2	分子偶极子的辐射	189
4.2.1	散射元模型	189

4.2.2 偶极矩及次波·····	193
4.2.3 偶极矩和折射率·····	196
4.3 Rayleigh 散射截面·····	197
4.3.1 角散射截面·····	198
4.3.2 总散射截面·····	200
4.4 体散射系数·····	202
4.4.1 偏振光的角散射系数·····	202
4.4.2 非偏振光的角散射系数·····	204
4.4.3 总散射系数·····	207
4.4.4 分子的各向异性和相函数·····	209
4.5 Rayleigh 散射函数表·····	212
4.5.1 相函数和角散射系数·····	212
4.5.2 总散射系数和折射率项·····	213
4.5.3 温度、气压和高度订正·····	214
4.6 大气中的 Rayleigh 散射·····	215
4.6.1 光学厚度和大气浑浊度·····	216
4.6.2 分子大气的天空辐射·····	218
4.6.3 天光的偏振·····	222
4.6.4 天光强度和偏振的研究·····	226
第五章 单分散系的 Mie 散射·····	228
5.1 Mie 理论的发展历史·····	229
5.2 理论基础和物理参数·····	230
5.2.1 粒子散射的理论基础和辐射度学·····	231
5.2.2 粒子的尺度参数和形状·····	234
5.2.3 折射率的可用数据·····	237
5.3 强度分布函数·····	242
5.3.1 函数的表达式·····	242
5.3.2 函数的实用表达方式·····	244

5.3.3	角度关系、偏振和吸收	245
5.3.4	已出版的强度函数表	248
5.4	单分散系的角散射	250
5.4.1	角散射截面	250
5.4.2	Rayleigh 散射和 Mie 散射截面的 比较	255
5.4.3	体角散射系数	256
5.4.4	高阶 Tyndall 谱	257
5.5	单分散系的总散射	260
5.5.1	散射截面和效率因子	260
5.5.2	关于散射效率因子的进一步讨论	264
5.5.3	吸收、消光和光压的效率因子	265
5.5.4	根据光学原理的近似处理	268
5.5.5	体散射和消光系数	273
5.5.6	已出版的效率因子的数值表	274
第六章	大气中多分散系的 Mie 散射	276
6.1	霾气溶胶的角散射	276
6.1.1	相函数和 Stokes 参数	276
6.1.2	关于偏振的进一步考虑	281
6.1.3	粒子尺度为幂指数律分布时的函数	283
6.1.4	霾大气的角散射	289
6.2	霾气溶胶的总散射和消光	293
6.2.1	粒子尺度为幂指数律分布时的函数	293
6.2.2	消光系数随波长的变化	298
6.2.3	霾大气的光学厚度	306
6.2.4	已出版的霾大气散射函数表	308
6.3	雾的总散射和消光	310
6.3.1	气象视距和雾含水量的关系	310

6.3.2	消光及其与波长的关系	314
6.4	云的散射和消光	318
6.4.1	云的角散射特性	319
6.4.2	云的总散射和消光	324
6.4.3	激光雷达和云的反射比	330
6.4.4	已出版的云散射函数表	334
附录A	大气散射测量索引	336
A.1	霾的角散射	337
A.1.1	白天天空的辐射亮度	337
A.1.2	日蚀时的天空辐射亮度	338
A.1.3	曙暮光时的天空辐射亮度	338
A.1.4	天光的偏振	339
A.1.5	漫射透射	339
A.1.6	角度浑浊度计测量	339
A.2	霾的总散射和消光	340
A.2.1	直接透射: 太阳光源	340
A.2.2	直接透射: 人工光源	341
A.2.3	对比度和能见度	341
A.2.4	积分浑浊度计测量	342
A.3	雾的散射和消光	342
A.4	云和降水的散射和消光	343
A.4.1	云的角散射和消光	344
A.4.2	雨和雪的消光	344
A.5	大气气溶胶的光学探测	345
A.5.1	探照灯光束	345
A.5.2	激光光束	345
附录B	重要的物理常数	347
附录C	长度和面积的单位换算	348

附录D	白天辐射通量的光谱视觉效率.....	350
附录E	美国标准大气-1962: 温度、气压和密度随高度 的分布.....	353
附录F	大气温度、气压和密度的月平均垂直分布	355
附录G	中纬度水分的年平均垂直分布.....	363
附录H	Rayleigh 角散射系数和相函数	364
附录I	Rayleigh 总散射系数和折射率项	367
附录J	散射效率因子.....	370
附录K	主要符号表.....	375
	英汉译名对照表.....	379
	参考文献.....	382

第一章 大气散射综述

自古以来,我们对物质世界的主要认识是从人眼看得见的
的基本活动中得来的。

光,给我们带来了宇宙的信息。它从太阳和星球来到我们这里,使
我们知道它们的存在、它们的位置、它们的运动、它们的成分和许多其
他有意义的情况。光从我们身边的物体来到我们这里,使我们能够看
见我们这个世界的状态:我们观赏它显示给我们的各种形态和色彩;
我们用它交换信息和思想。如果我们很恰当和有根据地把光这个字的
涵义扩展一下,使它包括多种多样的辐射(这些辐射与光是同一类的,
不过是人眼所看不见的),那么光也是在世界和宇宙中把能量从一个地
方传到另一个地方的了不起的传送者……[William Bragg 爵士
(1940)]

作为地球上的居住者,我们沉浸在数百英里深的气体海
洋——大气中,我们就是在它的深处度过一生的。光从远处
带给我们信息,照亮我们的环境,提供能量使我们的世界适于
居住,这些功能都只能借助光在大气中的传播才得以实现。
光的特性,特别是它的颜色、强度、偏振和空间分布都由于遇
到大气而被改变。

大气光学是研究光在大气中传播时,光的特性发生各种
变化的一门学科,这些变化是光波携带的能量与大气物质之
间相互作用的结果,或者说是这一相互作用本身。这种相互作
用分为三类:散射、吸收和放射。本书只涉及到从大约 $0.3\ \mu\text{m}$
(近紫外)至大约 $100\ \mu\text{m}$ (远红外)广大光谱区内的散射。

本章的目的,正如标题所示,是提供大气散射问题的一个
概况,而不详细涉及实际散射的机制。这个概况将使读者对
这个大课题内的各部分关系有整体的了解。这样,以后一些

专题讨论的意义就清楚了。打个比方，这一章好比是旅行指南，给旅客一个路线图、地区的描述和途中各站的介绍，所有这些都是为了他的旅行做准备的。

1.1 散射的作用

到达我们眼睛的大部分光，并不是直接来自光源，而是借散射间接传来的。除非我们正视一个光源，诸如太阳、火焰，或是一个透明灯泡中的白炽灯丝，我们看见的物体的光，是被散射过来的光。我们的地球环境中充满着散射。海洋表面、陆地表面以及我们周围的各种物体，即大多数物质的东西，由于它们反射了光的缘故而成为可见的。所有液体和固体物质在它们的表面所呈现的“反射”的性质，是组成这些物质的紧密结合在一起的原子和分子“散射”的一种特殊表现。散射是一种“可观测的”光与物质相互作用，在电磁波谱的各个波长上都会发生散射。

当我们把视线由地面移向半球天空，我们将看到散射的许多明显例子。在这个范围内，散射有许多种形式，其广度与可变性就象大气本身一样大。相互作用涉及到一切大气物质。各种气体的分子、尺度范围很宽并且来源与成分极不相同的小粒子、尺度范围大于三个数量级的水滴——这些都是大气的光学物质。在地球表面以及从地表面向上直到大气最外层，这些物质和它们在时间、空间分布上的变化，对我们的课题是重要的。

看得见的散射现象非常多，并令人有深刻印象。虽然很早以来我们就熟悉它们，但不应因此而忽视它们。这些现象还只是散射现象中的一部分，正如可见光谱本身只是整个光谱中的一小部分一样。由于霾和云的散射，使到达大气低