

光 学 原 理

光的传播、干涉和衍射的电磁理论
(上 册)

M 玻恩 E 沃耳夫 著

杨葭荪 等译校

科 学 出 版 社

1 9 7 8

光 学 原 理

光的传播、干涉和衍射的电磁理论
(下 册)

M. 玻恩 E. 沃耳夫 著

黄乐天 陈熙谋 陈秉乾 译校

科 学 出 版 社

1 9 8 1

内 容 简 介

本书是光学方面的一部名著。全书在经典电磁理论范围内系统地讨论了光在各种媒质中传播的基本规律,包括光的反射、折射、色散、干涉和衍射以及金属光学和晶体光学等。几何光学作为波长趋于零的极限情况,也纳入了麦克斯韦方程系统,同时讨论了象差的衍射理论等。中译本根据原书第五版译出,分上、下两册出版。上册包括历史引言和前八章,下册包括后六章及附录,主要内容为衍射理论、金属光学、晶体光学等。

本书可供光学专业的工作人员和高等院校师生参考。

Max Born and Emil Wolf

PRINCIPLES OF OPTICS

*Electromagnetic Theory of Propagation,
Interference and Diffraction of Light*
(5 th ed.)

Pergamon Press, 1975

光 学 原 理

光的传播、干涉和衍射的电磁理论

(下 册)

M. 玻恩 E. 沃耳夫 著

黄乐天 陈熙谋 陈秉乾 译校

责任编辑 方开文

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

*

1981 年 7 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1981 年 7 月第一次印刷 印张: 13 3/4 插页: 2

印数: 0001—9,120 字数: 362,000

统一书号: 13031·1589

本社书号: 2185·13—3

定 价: 2.75 元

译 者 的 话

一个世纪以前,麦克斯韦建立了经典电磁理论,证明了光也是一种电磁波,由此产生了光的电磁理论.光和电的统一,加速了光学及整个物理学的发展.本世纪六十年代激光的出现,更标志着光学进入了一个新的发展阶段.虽然现代光学中的许多问题需要应用量子理论来处理,但经典电磁理论并未因此而失去它的价值和光彩,它仍然是我们掌握现代科学技术不可缺少的基础.《光学原理》正是这方面很有参考价值的一本书,它是在玻恩 1933 年出版的《Optik》一书的基础上改编扩充而写成的.《Optik》一书内容由宏观而微观,体系严谨,叙理明要,一直是公认的经典光学著作.《光学原理》1959 年出版,至今已出五版,它主要阐述宏观的电磁理论,详尽讨论光在各种媒质中传播的基本规律,因而对现代光学的发展,特别是激光问世以来一些颇有意义的问题,如纤维光学、傅里叶光学等未能有所反映.虽然如此,它仍然是光学科研和教学中一本基本的参考书.遵照毛主席关于“洋为中用”的教导,我们把它译成中文,以供有关科研和教学人员参考.

原书中的一些明显错误,在中译本中大都作了改正,一般未加注明.原书“历史引言”部分在论述光学的发展时,只谈到少数物理学家的作用,未能全面地介绍光学发展的历史情况.但由于这个“引言”和正文部分有联系,我们在中译本中仍予以保留,希读者阅读时注意.参加本书翻译工作的还有王国文、钱士雄、张合义、吕云仙、黄乐天、陈天杰等同志.由于水平所限,译文中肯定有不少不当甚至错误之处,希读者批评指正.

初 版 序 言

经常有读者询问本书作者之一在二十五年多以前写的那本光学书¹⁾,是否能出英文版,这使我们产生了重写这本书的想法.初步查阅一下文献,看到从那时到现在,几乎光学的每一方面都作出了大量研究,以致《Optik》这本书已不再能全面而均衡地反映这个领域的面貌.因而我们觉得,再把它翻译过来殆不适宜.为此,我们另写了一本新书,这就是读者见到的这本书.在拟定本书大纲的过程中,我们很快就发现,即使只是把《Optik》出版以后最重要的发展编写进来,书的篇幅也会大得不切实际.因此,我们认为,必须把它的内容限制在一个比较狭窄的范围.《Optik》这本书也并没有涉及光学的全部内容.运动媒质光学、X射线和 γ 射线光学、光谱理论以及光学同原子物理的全部联系,它都没有讨论;此外,这本旧著也没有考虑光对我们视觉器官——眼睛的作用.这些问题和其它学科,例如相对论、量子力学、原子和原子核物理、生理学等结合起来讨论,可能更加得当.因此,本书不仅没有包括这些问题,而且还去掉了几乎占原德文本一半篇幅的经典分子光学.这样,我们的讨论就只限于可以用麦克斯韦唯象理论来处理的那些光学现象.这包括了所有那些物质微观结构不起决定作用的情况.关于同原子物理、量子力学以及生理学的联系,凡必要指出的,无论在什么地方,都只用几句话一带而过.即使作了这些限制,本书篇幅还是比《Optik》大了很多.这个事实也多少表明了经典光学领域近年来的研究所达到的规模.

我们的目的是力求在上面所划定的范围,对我们当今的知识

1) Max Born, *Optik* (Berlin, Springer, 1933) [马克斯·玻恩《光学》1933年柏林德文版].

决个别问题多么有价值，它在一本从几个简单假设出发系统地发展一个理论的书中，用处顶多是作为例证。

光学象的缺陷(象差的影响)既可以用几何光学来研究(适用于象差大的情况)，也可以用衍射理论来研究(适用于象差足够小的情况)。因为这两种处理方法的出发点通常完全不同，所以它们的结果过去一向不易比较。我们试图发展一个较统一的处理方法，它是以波阵面形变概念为基础的。在象差的几何分析(第五章)中，我们觉得，采用老的施瓦茨蔡耳德(K. Schwarzschild)方法，把他的程函略加修改，不但可行而且有益。象差的衍射理论这一章(第九章)主要讲述奈波-泽尼克(Nijboer-Zernike)理论，还有一节介绍了关于广延物体在相干照明下和非相干照明下的成象问题，它是以傅里叶变换为基础的。

第六章由韦曼(P. A. Wayman)撰写。这一章对一些主要的成象光学系统作了简短说明。其目的是为了给书中讨论成象理论的这些部分搭好一个骨架。

第七章讨论干涉理论基础和各种干涉仪。一些理论段落是从《Optik》的相应段落脱胎而来的，但是整章由威耳科克(W. L. Wilcock)完全重新写过，他还把它的范围扩大了很多。

第八章主要讨论菲涅耳-基尔霍夫衍射理论和它的一些应用。除一般题目外，这一章还详细讨论了光学成象的中心问题——几何焦点附近三维光分布的分析。此外还讲了另一种不那么知名的衍射处理方法，它是以杨氏边界衍射波概念为基础的。

以上所说各章主要是讨论点光源产生的完全单色光(因而是完全相干光)。第十章论述更实际的情况，即光是由有限大小的光源所产生，并占据有限的频率范围。这是部分相干的问题。这个方面近几年来取得了重大进展。事实上，一个关于部分相干光的干涉和衍射的系统理论现在已经发展起来。这一章还谈了部分偏振问题。从相干理论的观点来看，这个问题同部分相干密切相关。

第十一章讨论严格的衍射理论。这一领域在最近二十多年的

(C. G. S. 制)将仍为人们所喜爱. 虽然, 在这个单位制中, 大多数物质的磁导率 μ 在光频范围与 1 相差无几, 但我们在某些方程中仍然保留它. 这样做具有对称性较大的好处, 并且使我们能够利用麦克斯韦方程的对称特性推导“二重”结果. 对于时间周期场, 我们在复数表示中通篇采用因子 $\exp(-i\omega t)$. (下略)

M. 波恩

E. 沃耳夫

1959 年 1 月于巴达庇蒙特和曼彻斯特

目 录

译者的话	i
第五版序言	ii
第二版序言	iii
初版序言	iv
历史引言	1
第一章 电磁场的基本性质	13
§ 1.1 电磁场	13
§ 1.1.1 麦克斯韦方程	13
§ 1.1.2 物质方程	15
§ 1.1.3 突变面处的边界条件	17
§ 1.1.4 电磁场的能量定律	20
§ 1.2 波动方程和光速	24
§ 1.3 标量波	29
§ 1.3.1 平面波	30
§ 1.3.2 球面波	31
§ 1.3.3 谐波 相速	32
§ 1.3.4 波包 群速	35
§ 1.4 矢量波	41
§ 1.4.1 一般的电磁平面波	41
§ 1.4.2 谐电磁平面波	43
(a) 椭圆偏振	43
(b) 线偏振和圆偏振	48
(c) 偏振态的表征——斯托克斯参量	50
§ 1.4.3 任意形式的谐矢量波	52
§ 1.5 平面波的反射和折射	58
§ 1.5.1 反射定律和折射定律	58

§ 4.4.4 薄透镜	218
§ 4.4.5 一般共轴系统	219
§ 4.5 广角光锥的无象散成象	222
§ 4.5.1 正弦条件	223
§ 4.5.2 赫谢耳条件	225
§ 4.6 象散光锥	226
§ 4.6.1 细光锥的焦点特性	226
§ 4.6.2 细光锥的折射	228
§ 4.7 色差; 棱镜的色散	232
§ 4.7.1 色差	232
§ 4.7.2 棱镜的色散	235
§ 4.8 光度学和孔径	240
§ 4.8.1 光度学的基本概念	240
§ 4.8.2 光阑和光瞳	246
§ 4.8.3 象的亮度和照度	248
§ 4.9 光线追迹	251
§ 4.9.1 斜子午光线	251
§ 4.9.2 傍轴光线	254
§ 4.9.3 不交轴光线	256
§ 4.10 非球面的设计	259
§ 4.10.1 轴上无象散的实现	260
§ 4.10.2 不晕的实现	263
第五章 象差的几何理论	267
§ 5.1 波象差和光线象差; 象差函数	268
§ 5.2 施瓦茨蔡耳德微扰程函	273
§ 5.3 初级(赛德耳)象差	277
§ 5.4 初级象差的相加定理	286
§ 5.5 一般的共轴透镜系统的初级象差系数	288
§ 5.5.1 利用两条傍轴光线的赛德耳公式	288
§ 5.5.2 利用一条傍轴光线的赛德耳公式	294
§ 5.5.3 珀兹伐定理	296

§ 5.6	例子: 一个薄透镜的初级象差	297
§ 5.7	一般的共轴透镜系统的色差	301
第六章	成象仪器	306
§ 6.1	眼睛	306
§ 6.2	照相机	308
§ 6.3	折射望远镜	313
§ 6.4	反射望远镜	320
§ 6.5	照明仪器	326
§ 6.6	显微镜	328
第七章	干涉理论基础和干涉仪	334
§ 7.1	引言	334
§ 7.2	两个单色波的干涉	335
§ 7.3	双光束干涉: 波阵面分割	339
§ 7.3.1	杨氏实验	339
§ 7.3.2	菲涅耳双面镜和类似装置	341
§ 7.3.3	准单色光条纹和白光条纹	344
§ 7.3.4	使用狭缝光源; 条纹的可见度	346
§ 7.3.5	应用于测量光程差: 瑞利干涉仪	350
§ 7.3.6	应用于测量光源的角幅度: 迈克耳孙测星干涉仪	353
§ 7.4	驻波	361
§ 7.5	双光束干涉: 振幅分割	366
§ 7.5.1	平行平板产生的条纹	366
§ 7.5.2	薄膜产生的条纹; 斐索干涉仪	372
§ 7.5.3	条纹的定域	380
§ 7.5.4	迈克耳孙干涉仪	391
§ 7.5.5	特怀曼-格林干涉仪和有关干涉仪	394
§ 7.5.6	两块全同板产生的条纹: 雅满干涉仪和干涉显微镜	399
§ 7.5.7	马赫-泽德干涉仪; 贝茨波阵面切变干涉仪	407
§ 7.5.8	相干长度; 双光束干涉在研究光谱线精细结构中的应用	413

§ 7.6 多光束干涉	421
§ 7.6.1 平行平板的多光束干涉条纹	422
§ 7.6.2 法布里-珀罗干涉仪	429
§ 7.6.3 应用法布里-珀罗干涉仪研究光谱线的精细结构	434
§ 7.6.4 应用法布里-珀罗干涉仪比较波长	441
§ 7.6.5 陆末-盖尔克干涉仪	445
§ 7.6.6 干涉滤波器	453
§ 7.6.7 薄膜多光束干涉条纹	458
§ 7.6.8 两块平行平板产生的多光束条纹	470
(a) 单色光和准单色光生成的条纹	470
(b) 叠加条纹	475
§ 7.7 波长与标准米的比较	480
第八章 衍射理论基础	483
§ 8.1 引言	483
§ 8.2 惠更斯-菲涅耳原理	484
§ 8.3 基尔霍夫衍射理论	489
§ 8.3.1 基尔霍夫积分定理	489
§ 8.3.2 基尔霍夫衍射理论	494
§ 8.3.3 夫琅和费衍射和菲涅耳衍射	498
§ 8.4 过渡到标量理论	505
§ 8.4.1 单色振子产生的象场	506
§ 8.4.2 总象场	510
§ 8.5 各种形状光孔上的夫琅和费衍射	513
§ 8.5.1 矩孔和狭缝	513
§ 8.5.2 圆孔	517
§ 8.5.3 其它形状的孔	521
§ 8.6 光学仪器中的夫琅和费衍射	524
§ 8.6.1 衍射光栅	524
(a) 衍射光栅原理	524
(b) 光栅的类型	532
(c) 光栅摄谱仪	538
§ 8.6.2 成象系统的分辨本领	541

(a) 范西特-泽尼克定理	671
(b) 霍普金斯公式	677
§ 10.4.3 一个例子	679
§ 10.4.4 互强度的传播	684
§ 10.5 某些应用	686
§ 10.5.1 扩展的不相干准单色光源象中的相干度	686
§ 10.5.2 聚光镜对显微镜分辨率的影响	691
(a) 临界照明	691
(b) 柯勒照明	694
§ 10.5.3 用部分相干准单色照明成象	696
(a) 互强度通过光学系统的透射	696
(b) 透照物的象	699
§ 10.6 关于互相干的一些定理	704
§ 10.6.1 来自不相干光源光的互相干的计算	704
§ 10.6.2 互相干的传播	707
§ 10.7 部分相干性的严格理论	709
§ 10.7.1 互相干波动方程	709
§ 10.7.2 互相干传播定律的严格表述	711
§ 10.7.3 相干时间和有效谱宽	715
§ 10.8 准单色光的偏振特性	719
§ 10.8.1 准单色平面波的相干矩阵	720
(a) 完全非偏振光(自然光)	725
(b) 完全偏振光	726
§ 10.8.2 某些等价表示。光波的偏振度	728
§ 10.8.3 准单色平面波的斯托克斯参量	732
第十一章 严格的衍射理论	736
§ 11.1 引言	736
§ 11.2 边界条件与面电流	738
§ 11.3 平面屏的衍射: 巴俾涅原理的电磁形式	740
§ 11.4 平面屏的二维衍射	742
§ 11.4.1 二维电磁场的标量性质	742
§ 11.4.2 平面波的角谱	743
§ 11.4.3 利用对偶积分方程表述	746

§ 11.5 半平面对平面波的二维衍射	748
§ 11.5.1 E 偏振对偶积分方程的解	748
§ 11.5.2 用菲涅耳积分表示的解	751
§ 11.5.3 解的性质	755
§ 11.5.4 H 偏振的解	760
§ 11.5.5 某些数值计算	762
§ 11.5.6 与近似理论及实验结果的比较	764
§ 11.6 半平面对平面波的三维衍射	766
§ 11.7 半平面对局域源的衍射	769
§ 11.7.1 平行于衍射棱边的线电流	769
§ 11.7.2 偶极子	775
§ 11.8 其他问题	779
§ 11.8.1 两个平行的半平面	779
§ 11.8.2 平行错开的半平面的无限堆垛	782
§ 11.8.3 窄条	783
§ 11.8.4 某些进一步的问题	785
§ 11.9 解的唯一性	785
第十二章 光被超声波衍射	788
§ 12.1 现象的定性描述和基于麦克斯韦微分方程的理论概要	788
§ 12.1.1 现象的定性描述	788
§ 12.1.2 基于麦克斯韦方程的理论概要	792
§ 12.2 用积分方程法处理光被超声波衍射	796
§ 12.2.1 E 偏振的积分方程	798
§ 12.2.2 积分方程的试探解	799
§ 12.2.3 衍射和反射光谱中光波振幅的表达式	803
§ 12.2.4 方程用逐次逼近法得出的解	803
§ 12.2.5 某些特殊情况下第一序和第二序谱线强度的表达式	808
§ 12.2.6 某些定性的结果	810
§ 12.2.7 喇曼-纳斯近似	812
第十三章 金属光学	815
§ 13.1 波在导体中的传播	816

§ 14.4.1	尼科耳棱镜	920
§ 14.4.2	补偿器	921
(a)	四分之一波片	922
(b)	巴俾涅补偿器	923
(c)	索累补偿器	925
(d)	伯列克补偿器	925
§ 14.4.3	有晶片时的干涉	926
§ 14.4.4	单轴晶片的干涉图	931
§ 14.4.5	双轴晶片的干涉图	934
§ 14.4.6	晶体媒质的光轴定位及其主折射率的测定	936
§ 14.5	应力双折射和形式双折射	937
§ 14.5.1	应力双折射	937
§ 14.5.2	形式双折射	941
§ 14.6	吸收晶体	944
§ 14.6.1	光在吸收的各向异性媒质中的传播	944
§ 14.6.2	吸收晶片的干涉图	951
(a)	单轴晶体	952
(b)	双轴晶体	953
§ 14.6.3	二向色的起偏振器	955
附录 1	变分法	959
§ 1	作为极值必要条件的欧勒方程	959
§ 2	希耳伯特独立积分与哈密顿-雅科毕方程	961
§ 3	致极曲线场	963
§ 4	从哈密顿-雅科毕方程的解确定全部致极曲线	965
§ 5	哈密顿正则方程	967
§ 6	被积函数中不显含独立变量时的特殊情况	968
§ 7	不连续性	970
§ 8	维尔斯特拉斯 (Weierstrass) 条件和勒让德条件 (极值的充分条件)	972
§ 9	一个端点约束在一曲面时变分积分的极小值	975
§ 10	极小值的雅科毕判据	976
§ 11	例一: 光学	976
§ 12	例二: 质点系力学	979

附录 2	光学,电子光学和波动力学	983
§ 1	基本形式的哈密顿类似	983
§ 2	变分形式的哈密顿类似	986
§ 3	自由电子的波动力学	989
§ 4	光学原理应用于电子光学	992
附录 3	一些积分的渐近逼近	995
§ 1	最速下降法	995
§ 2	稳相法	1002
§ 3	二重积分	1003
附录 4	狄喇克 δ 函数	1006
附录 5	严格推导洛伦兹-洛伦茨定律用到的一个数学引理 (§ 2.4.2)	1012
附录 6	电磁场中不连续性的传播 (§ 3.1.1)	1015
§ 1	联系各个场矢量不连续变化的关系式	1015
§ 2	运动的不连续曲面上的场	1018
附录 7	泽尼克圆多项式 (§ 9.2.1)	1020
§ 1	某些一般考虑	1020
§ 2	径向多项式 $R_{\pm}^m(\rho)$ 的显式	1022
附录 8	一个不等式的证明 (§ 10.7.3)	1028
附录 9	计算两个积分的值 (§ 12.2.2)	1030

$$u = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{R} \right)^2 x, \quad v = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{R} \right) \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (4)$$

这时把 Φ 看作 Y_1^* , ρ 和 θ 的函数是方便的, 即

$$\Phi = \Phi(Y_1^*, \rho, \theta). \quad (5)$$

高斯参考球的面元是 $dS = a^2 \rho d\rho d\theta$, 如果 CP_1^* 与系统轴的夹角很小, 则积分范围可取为 $0 \leq \rho \leq 1$, $0 \leq \theta < 2\pi$. 此外, 对于象区内的观察点, 在被积函数分母中可用 R 代替 s . 因此, 将(3)式代入, (1)式变为

$$\begin{aligned} U(P) &= U(u, v, \phi) \\ &= -\frac{i}{\lambda} \frac{Aa^2}{R^2} e^{i\left(\frac{R}{a}\right)^2 u} \int_0^1 \int_0^{2\pi} e^{i[k\Phi(Y_1^*, \rho, \theta) - v\rho \cos(\theta - \phi) - \frac{1}{2}u\rho^2]} \\ &\quad \rho d\rho d\theta, \end{aligned} \quad (6)$$

因此, P 点的强度为

$$\begin{aligned} I(P) &= |U(P)|^2 \\ &= \left(\frac{Aa^2}{\lambda R^2} \right)^2 \left| \int_0^1 \int_0^{2\pi} e^{i[k\Phi(Y_1^*, \rho, \theta) - v\rho \cos(\theta - \phi) - \frac{1}{2}u\rho^2]} \rho d\rho d\theta \right|^2. \end{aligned} \quad (7)$$

把强度 $I(P)$ 表示为强度 I^* 的分数是方便的, 如果象差不存在, I^* 就是在高斯象点 P_1^* 得到的强度. 根据(7)式, 有

$$I^* = \pi^2 \left(\frac{Aa^2}{\lambda R^2} \right)^2, \quad (8)$$

因此归一化强度为¹⁾

$$\begin{aligned} i(P) &= \frac{I(P)}{I^*} \\ &= \frac{1}{\pi^2} \left| \int_0^1 \int_0^{2\pi} e^{i[k\Phi(Y_1^*, \rho, \theta) - v\rho \cos(\theta - \phi) - \frac{1}{2}u\rho^2]} \rho d\rho d\theta \right|^2. \end{aligned} \quad (9)$$

象差不存在时, 强度在高斯象点处为极大. 当象差存在时, 一般就不再是这种情况了, 我们可以把强度极大的点称为衍射焦

1) 归一化强度所用的符号 i 与 $\sqrt{-1}$ 所用的同一符号之间不会引起混乱, 因为前者总是带着自变量出现的, 例如 $i(P)$, $i(u, v, \phi)$, 等等.

根据 (2) 和 (4) 式, (14) 式表示如下变换:

$$\begin{aligned} z' &= z + 2\left(\frac{R}{a}\right)^2 H, & x' &= x + \left(\frac{R}{a}\right) K, \\ y' &= y + \left(\frac{R}{a}\right) L. \end{aligned} \quad (15)$$

由 (11) 和 (13) 式得出

$$i(u, v, \phi) = i'(u', v', \phi'). \quad (16)$$

由此我们已证明了如下的位移定理: 象差函数加上一项 $H\rho^2 + K\rho \sin \theta + L\rho \cos \theta + M$, 其中 H, K, L 和 M 都是与 λ 同数量级的常数, 并不引起焦点附近三维强度分布的变化, 只是整个分布按照变换 (15) 有一位移; 即沿主方向 CP_1^* 离出射光瞳的位移量为 $2(R/a)^2 H$, 在正 x 和 y 方向的位移量分别为 $(R/a)K$ 和 $(R/a)L$.

(10) 式右方的附加项可以解释为代表参考球的变化。假定我们

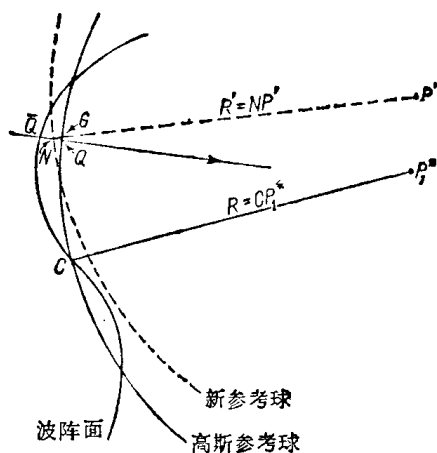


图 9.2 参考球的变化

们选择一个新参考球, 球心在象区 $P'(x', y', z')$ 点上, 而半径为 R' , 使得它至多偏离高斯球几个波长。设光线 $\bar{Q}Q$ 与新参考球相交于 N 点。于是以这个新球作参考的波象差 Φ' 为 (见图 9.2)

$$\begin{aligned} \Phi' &= \bar{Q}N = \bar{Q}Q - NQ \\ &\sim \bar{Q}Q - NG, \end{aligned} \quad (17)$$

式中 G 是 NP' 线与高斯参考球的交点, 和前面一样, 假定象空间的折射率为 1。这时

$\bar{Q}Q = \Phi$ 就是以高斯球作参考的波象差, $NG = NP' - GP' = R' - s$, 式中 s 表示从 G 到 P' 的距离。因此 (17) 式可写成

$$\Phi' \sim \Phi + s - R'$$