



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

张三慧 编著

大学物理学

光学、量子物理

(第三版)



清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

张三慧 编著

大学物理学 (第三版)

光学、量子物理

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是张三慧编著的《大学物理学》(第三版)光学、量子物理。光学部分在讲了波动光学的光的干涉、衍射、偏振等规律之后,也讲了几何光学的基本知识。量子物理部分包括微观粒子的二象性、薛定谔方程(定态)、原子中的电子能态、分子的结构和能级、固体中电子的能态、量子统计的基本概念和核物理的基础知识。各部分内容均配置了适量的联系实际的例题和习题。除了基本内容外,还专题介绍了全息照相、光学信息处理、液晶、非线性光学、自由电子激光、多光子吸收、激光冷却、纳米科技等今日物理趣闻,以及几位科学家的传略。书末还列出了历年诺贝尔物理学奖获得者名录及其创新课题。本书基本内容讲解简明有序,扩展内容通俗易懂。

本书可作为高等院校的物理教材,也可以作为中学物理教师教学或其他读者自学的参考书,与本书配套的《大学物理学(第三版)学习辅导与习题解答》可帮助读者学习本书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

未经清华大学出版社授权,请不要专门为本书编写学习辅导材料,如思考题和习题解答等。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学. 光学、量子物理/张三慧编著. —3版. —北京:清华大学出版社,2008.9
ISBN 978-7-302-16774-7

I. 大… II. 张… III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 002666 号

责任编辑:朱红莲 邹开颜

责任校对:赵丽敏

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:20

字数:456千字

版 次:2008年9月第3版

印次:2008年9月第1次印刷

印 数:1~5000

定 价:24.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:025366-01

前 言

FOREWORD

这部《大学物理学》(第三版)含力学篇、热学篇,电磁学(基于相对论的电磁学)篇,光学篇、量子物理篇。本书自第一版与第二版问世以来,已被多所院校用作教材。根据使用过此书的教师与学生以及其他读者的反映,也考虑到近几年物理教学的发展动向,本书推出第三版。第三版内容的撰写与修改仍延续了第二版的科学性和系统性的特点,保持了原有的体系和风格,并在第二版的基础上,增加、拓宽了一些内容。

本书内容完全涵盖了2006年我国教育部发布的“非物理类理工学科大学物理课程基本要求”。书中各篇对物理学的基本概念与规律进行了正确明晰的讲解。讲解基本上都是以最基本的规律和概念为基础,推演出相应的概念与规律。笔者认为,在教学上应用这种演绎逻辑更便于学生从整体上理解和掌握物理课程的内容。

力学篇是以牛顿定律为基础展开的。除了直接应用牛顿定律对问题进行动力学分析外,还引入了动量、角动量、能量等概念,并着重讲解相应的守恒定律及其应用。除惯性系外,还介绍了利用非惯性系解题的基本思路,刚体的转动、振动、波动这三章内容都是上述基本概念和定律对于特殊系统的应用。狭义相对论的讲解以两条基本假设为基础,从同时性的相对性这一“关键的和革命的”(杨振宁语)概念出发,逐渐展开得出各个重要结论。这种讲解可以比较自然地使学生从物理上而不只是从数学上弄懂狭义相对论的基本结论。

热学篇的讲述是以微观的分子运动的无规则性这一基本概念为基础的。除了阐明经典力学对分子运动的应用外,特别引入并加强了统计概念和统计规律,包括麦克斯韦速率分布律的讲解。对热力学第一定律也阐述了其微观意义。对热力学第二定律是从宏观热力学过程的方向性讲起,说明方向性的微观根源,并利用热力学概率定义了玻耳兹曼熵并说明了熵增加原理,然后再进一步导出克劳修斯熵及其计算方法。这种讲法最能揭露熵概念的微观本质,也便于理解熵概念的推广应用。

电磁学篇按照传统讲法,讲述电磁学的基本理论,包括静止和运动电荷的电场,运动电荷和电流的磁场,介质中的电场和磁场,电磁感应,电磁波

等。基于相对论的电磁学篇中电磁学的讲法则是以爱因斯坦的《论动体的电动力学》为背景,完全展现了帕塞尔教授讲授电磁学的思路——从爱因斯坦到麦克斯韦,以场的概念和高斯定律为基础,根据狭义相对论演绎地引入磁场,并进而导出麦克斯韦方程组其他方程。这种讲法既能满足教学的基本要求,又充分显示了电磁场的统一性,从而使学生会到自然规律的整体性以及物理理论的和谐优美。电磁学的讲述未止于麦克斯韦方程组,而是继续讲述了电磁波的发射机制及其传播特征等。

光学篇以电磁波和振动的叠加的概念为基础,讲述了光电干涉和衍射的规律。第24章光的偏振讲述了电磁波的横波特征。然后,根据光电波动性在特定条件下的近似特征——直接传播,讲述了几何光学的基本定律及反射镜和透镜的成像原理。

以上力学、热学、电磁学、光学各篇的内容基本上都是经典理论,但也在适当地方穿插了量子理论的概念和结论以便相互比较。

量子物理篇是从波粒二象性出发以定态薛定谔方程为基础讲解的。介绍了原子、分子和固体中电子的运动规律以及核物理的知识。关于教学要求中的扩展内容,如基本粒子和宇宙学的基本知识是在“今日物理趣闻 A”和“今日物理趣闻 C”栏目中作为现代物理学前沿知识介绍的。

本书除了5篇基本内容外,还开辟了“今日物理趣闻”栏目,介绍物理学的近代应用与前沿发展,而“科学家介绍”栏目用以提高学生素养,鼓励成才。

本书各章均配有思考题和习题,以帮助学生理解和掌握已学的物理概念和定律或扩充一些新的知识。这些题目有易有难,绝大多数是实际现象的分析和计算。题目的数量适当,不以多取胜。也希望学生做题时不要贪多,而要求精,要真正把做过的每一道题从概念原理上搞清楚,并且用尽可能简洁明确的语言、公式、图像表示出来,需知,对一个科技工作者来说,正确地书面表达自己的思维过程与成果也是一项重要的基本功。

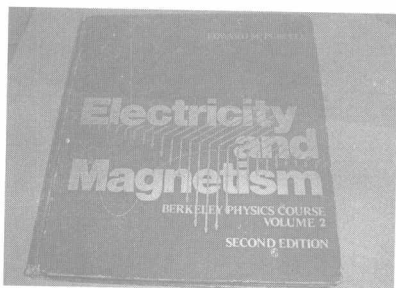
本书在保留经典物理精髓的基础上,特别注意加强了现代物理前沿知识和思想的介绍。本书内容取材在注重科学性和系统性的同时,还注重密切联系实际,选用了大量现代科技与我国古代文明的资料,力求达到经典与现代,理论与实际的完美结合。

本书在量子物理篇中专门介绍了近代(主要是20世纪30年代)物理知识,并在其他各篇适当介绍了物理学的最新发展,同时为了在大学生中普及物理学前沿知识以扩大其物理学背景,在“今日物理趣闻”专栏中,分别介绍了“基本粒子”、“混沌——决定论的混乱”、“大爆炸和宇宙膨胀”、“能源与环境”、“等离子体”、“超导电性”、“激光应用二例”、“新奇的纳米技术”等专题。这些都是现代物理学以及公众非常关心的题目。本书所介绍的趣闻有的已伸展到最近几年的发现,这些“趣闻”很受学生的欢迎,他们拿到新书后往往先阅读这些内容。

物理学很多理论都直接联系着当代科技乃至人们的日常生活。教材中列举大量实例,既能提高学生的学习兴趣和有助于对物理概念和定律的深刻理解以及创造性思维的启迪。本书在例题、思考题和习题部分引用了大量的实例,特别是反映现代物理研究成果和应用的实例,如全球定位系统、光盘、宇宙探测、天体运行、雷达测速、立体电影等。同时还大量引用了我国从古到今技术上以及生活上的有关资料,例如古籍《宋纪要》关于“客

星”出没的记载,北京天文台天线阵,长征火箭,神舟飞船,天坛祈年殿,黄果树瀑布,阿迪力走钢丝,本人抖空竹,1976年唐山地震,1988年特大洪灾,等。这些例子体现了民族文化,可以增强学生对物理的“亲切感”,而且有助于学生的民族自豪感和责任心的提升。

物理教学除了“授业”外,还有“育人”的任务。为此本书介绍了十几位科学大师的事迹,简要说明了他们的思想境界、治学态度、开创精神和学术成就,以之作为学生为人处事的借鉴。在此我还要介绍一下我和帕塞尔教授的一段交往。帕塞尔教授是哈佛大学教授,1952年因对核磁共振研究的成果荣获诺贝尔物理奖。我于1977年看到他编写的《电磁学》,深深地为他的新讲法所折服。用他的书讲述两遍后,于1987年冒然写信向他请教,没想到很快就收到他的回信(见附图)和赠送给我的教材(第二版)及习题解答。他这种热心帮助一个素不相识的外国教授的行为使我非常感动。



帕塞尔《电磁学》(第二版)封面



本书作者与帕塞尔教授合影(1993年)

HARVARD UNIVERSITY

DEPARTMENT OF PHYSICS

LYMAN LABORATORY OF PHYSICS
CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS 02138

November 30, 1987

Professor Zhang Sanhui
Department of Physics
Tsinghua University
Beijing 100084
The People's Republic of China

Dear Professor Zhang:

Your letter of November 8 pleases me more than I can say, not only for your very kind remarks about my book, but for the welcome news that a growing number of physics teachers in China are finding the approach to magnetism through relativity enlightening and useful. That is surely to be credited to your own teaching, and also, I would surmise, to the high quality of your students. It is gratifying to learn that my book has helped to promote this development.

I don't know whether you have seen the second edition of my book, published about three years ago. A copy is being mailed to you, together with a copy of the Problem Solutions Manual. I shall be eager to hear your opinion of the changes and additions, the motivation for which is explained in the new Preface. May I suggest that you inspect, among other passages you will be curious about, pages 170-171. The footnote about Leigh Page repairs a regrettable omission in my first edition. When I wrote the book in 1963 I was unaware of Page's remarkable paper. I did not think my approach was original authors. As you now share my preference for this strategy I hope you will join me in mentioning Page's 1912 paper when suitable opportunities arise.

Your remark about printing errors in your own book evokes my keenly felt sympathy. In the first printing of my second edition we found about 50 errors, some serious! The copy you will receive is from the third printing, which still has a few errors, noted on the Errata list enclosed in the book. There is an Interdepartmental Student Edition in paperback. I'm not sure what printing it duplicates.

The copy of your own book has reached my office just after I began this letter! I hope my shipment will travel as rapidly. It will be some time before I shall be able to study your book with the care it deserves, so I shall not delay sending this letter of grateful acknowledgement.

Sincerely yours,

Edward M. Purcell

Edward M. Purcell

EMP/cad

帕塞尔回信复印件

他在信中写道“本书 170—171 页关于 L. Page 的注解改正了第一版的一个令人遗憾的疏忽。1963 年我写该书时不知道 Page 那篇出色的文章,我并不认为我的讲法是原创的——远不是这样——但当时我没有时间查找早先的作者追溯该讲法的历史。现在既然你也喜欢这种讲法,我希望你和我一道在适当时机宣扬 Page 的 1912 年的文章。”一位物理学大师对自己的成就持如此虚心、谦逊、实事求是的态度使我震撼。另外他对自己书中的疏漏(实际上有些是印刷错误)认真修改,这种严肃认真的态度和科学精神也深深地教

育了我。帕塞尔这封信所显示的作为一个科学家的优秀品德,对我以后的为人处事治学等方面都产生了很大影响,始终视之为楷模追随仿效,而且对我教的每一届学生都要展示帕塞尔的这一封信对他们进行教育,收到了很好的效果。

本书的撰写和修订得到了清华大学物理系老师的热情帮助(包括经验与批评),也采纳了其他兄弟院校的教师和同学的建议和意见。此外也从国内外的著名物理教材中吸取了很多新的知识、好的讲法和有价值的素材。这些教材主要有:新概念物理教程(赵凯华等),Feynman Lectures on Physics, Berkeley Physics Course(Purcell E M, Reif F, et al.), The Manchester Physics Series(Mandl F, et al.), Physics(Chianian H C.), Fundamentals of Physics(Resnick R), Physics(Alonso M et al.)等。

对于所有给予本书帮助的老师和学生以及上述著名教材的作者,本人在此谨致以诚挚的谢意。清华大学出版社诸位编辑对第三版杂乱的原稿进行了认真的审阅和编辑,特在此一并致谢。

张三慧

2008年1月

于清华园

目 录

CONTENTS

第 4 篇 光 学

第 22 章 光的干涉	3
22.1 杨氏双缝干涉	3
22.2 相干光	7
* 22.3 光的非单色性对干涉条纹的影响	9
* 22.4 光源的大小对干涉条纹的影响	11
22.5 光程	14
22.6 薄膜干涉(一)——等厚条纹	16
22.7 薄膜干涉(二)——等倾条纹	20
22.8 迈克耳孙干涉仪	23
提要	24
思考题	25
习题	26
科学家介绍 托马斯·杨和菲涅耳	28
第 23 章 光的衍射	31
23.1 光的衍射和惠更斯-菲涅耳原理	31
23.2 单缝的夫琅禾费衍射	33
23.3 光学仪器的分辨本领	37
23.4 细丝和细粒的衍射	39
23.5 光栅衍射	42
23.6 光栅光谱	47
23.7 光盘及其录音与放音	50
23.8 X 射线衍射	54
提要	56

思考题	56
习题	57
今 日物理趣闻 K 全息照相	60
K.1 全息照片的拍摄	60
K.2 全息图像的观察	62
K.3 全息照相的应用	63
今 日物理趣闻 L 光学信息处理	64
L.1 空间频率与光学信息	64
L.2 空间频谱分析	65
L.3 阿贝成像原理和空间滤波	66
L.4 θ 调制	68
第 24 章 光的偏振	70
24.1 光的偏振状态	70
24.2 线偏振光的获得与检验	72
24.3 反射和折射时光的偏振	74
24.4 由散射引起的光的偏振	76
24.5 双折射现象	77
* 24.6 椭圆偏振光和圆偏振光	81
* 24.7 偏振光的干涉	83
* 24.8 人工双折射	85
* 24.9 旋光现象	86
提要	89
思考题	89
习题	90
今 日物理趣闻 M 液晶	93
M.1 液晶的结构	93
M.2 液晶的光学特性	94
今 日物理趣闻 N 非线性光学	97
N.1 非线性光学与激光	97

N.2	倍频与混频	97
N.3	自聚焦	99
N.4	受激拉曼散射	100
第 25 章 几何光学		
25.1	光线	101
25.2	光的反射	102
25.3	球面反射镜	104
25.4	光的折射	107
25.5	薄透镜的焦距	108
25.6	薄透镜成像	111
25.7	人眼	115
25.8	助视仪器	117
	提要	120
	思考题	121
	习题	123
第 5 篇 量子物理		
第 26 章 波粒二象性		
26.1	黑体辐射	129
26.2	光电效应	132
26.3	光的二象性 光子	134
26.4	康普顿散射	137
26.5	粒子的波动性	140
26.6	概率波与概率幅	143
26.7	不确定关系	147
	提要	151
	思考题	152
	习题	153
	科学家介绍 德布罗意	156
第 27 章 薛定谔方程		
27.1	薛定谔得出的波动方程	158
27.2	无限深方势阱中的粒子	162
27.3	势垒穿透	166

27.4 谐振子	170
提要	172
思考题	173
习题	173
科学家介绍 薛定谔	175
第 28 章 原子中的电子	177
28.1 氢原子	177
28.2 电子的自旋与自旋轨道耦合	186
*28.3 微观粒子的不可分辨性和泡利不相容原理	191
28.4 各种原子核外电子的组态	193
*28.5 X 射线	197
28.6 激光	200
*28.7 分子结构	204
*28.8 分子的转动和振动能级	208
提要	212
思考题	214
习题	214
科学家介绍 玻尔	218
今日物理趣闻 O 自由电子激光	220
今日物理趣闻 P 激光应用二例	223
P.1 多光子吸收	223
P.2 激光冷却与捕陷原子	225
第 29 章 固体中的电子	228
29.1 自由电子按能量的分布	228
29.2 金属导电的量子论解释	232
*29.3 量子统计	233
29.4 能带 导体和绝缘体	237
29.5 半导体	239
29.6 PN 结	241
29.7 半导体器件	242
提要	244
思考题	245

习题	246
今日物理趣闻 Q 新奇的纳米科技	247
Q.1 什么是纳米科技	247
Q.2 纳米材料	248
Q.3 纳米器件	249
第 30 章 核物理	252
30.1 核的一般性质	252
30.2 核力	256
30.3 核的结合能	257
*30.4 核的液滴模型	260
30.5 放射性和衰变定律	262
30.6 α 衰变	266
*30.7 穆斯堡尔效应	269
30.8 β 衰变	273
30.9 核反应	276
提要	279
思考题	280
习题	280
元素周期表	283
数值表	284
习题答案	286
诺贝尔物理学奖获得者名录	293
索引	298

第

4

篇

光 学

光（这里主要指可见光）是人类以及各种生物生活不可或缺的最普通的要素。现在我们知道它是一种电磁波，但对它的这种认识却经历了漫长的过程。最早也是最容易观察到的规律是光的直线传播。在机械观的基础上，人们认为光是由一些微粒组成的，光线就是这些“光微粒”的运动路径。牛顿被尊为是光的微粒说的创始人和坚持者，但并没有确凿的证据。实际上牛顿已觉察到许多光现象可能需要用波动来解释，牛顿环就是一例。不过他当时未能作出这种解释。他的同代人惠更斯倒是明确地提出了光是一种波动，但是并没有建立起系统的有说服力的理论。直到进入 19 世纪，才由托马斯·杨和菲涅耳从实验和理论上建立起一套比较完整的光的波动理论，使人们正确地认识到光就是一种波动，而光的沿直线前进只是光的传播过程的一种表观的近似描述。托马斯·杨和菲涅耳对光波的理解还持有机械论的观点，即光是在一种介质中传播的波。关于传播光的介质是什么的问题，虽然对光波的传播规律的描述甚至实验观测并无直接的影响，但终究是波动理论的一个“要害”问题。19 世纪中叶光的电磁理论的建立使人们对光波的认识更深入了一步，但关于“介质”的问题还是矛盾重重，有待解决。最终解决这个问题的是 19 世纪末叶迈克耳孙的实验以及随后爱因斯坦建立的相对论理论。他们的结论是电磁波（包括光波）是一种可独立存在的物质，它的传播不需要任何介质。

本篇关于光的波动规律的讲解，基本上还是近 200 年前托马斯·杨和菲涅耳的理论，当然有许多应用实例是现代化的。正确的基本理论是不会过时的，而且它们的应用将随时代的前进而不

断扩大和翻新。现代的许多高新技术中的精密测量与控制就应用了光的干涉和衍射的原理。激光的发明(这也是 40 年前的事情了!)更使“古老的”光学焕发了青春。第 22~24 章就讲解波动光学的基本规律,包括干涉、衍射和偏振。在适当的地方都插入了若干这些规律的现代应用。所述规律大都是“唯象的”,没有用电磁理论麦克斯韦方程说明它们的根源。

光在均匀介质中沿直线传播的认识虽然是对光的波动本性的一种近似的描述,但在大量的光学实用技术中这种描述可以达到非常“精确”的程度,因而被当作理论基础。由此形成的光学理论叫几何光学。第 25 章介绍几何光学的基本知识,包括反射和折射定律,反射镜和透镜的成像规律以及它们在助视仪器上的应用等。

从本质上说,光不单是电磁波,而且还是一种粒子,称为光子。关于这方面的知识,将在本书第 5 篇量子物理中介绍。

光的干涉

光是一种电磁波。通常意义上的光是指可见光,即能引起人的视觉的电磁波。它的频率在 $3.9 \times 10^{14} \sim 8.6 \times 10^{14}$ Hz 之间,相应地在真空中的波长在 $0.77 \mu\text{m}$ 到 $0.35 \mu\text{m}$ 之间。不同频率的可见光给人以不同颜色的感觉,频率从大到小给出从紫到红的各种颜色。

作为电磁波,光波也服从叠加原理。满足一定条件的两束光叠加时,在叠加区域光的强度或明暗有一稳定的分布。这种现象称做光的干涉,干涉现象是光波以及一般的波动的特征。

本章讲述光的干涉的规律,包括干涉的条件和明暗条纹分布的规律。这些规律对其他种类的波,例如机械波和物质波也都适用。

22.1 杨氏双缝干涉

托马斯·杨在 1801 年做成功了一个判定光的波动性质的关键性实验——光的干涉实验。他用图 22.1 来说明实验原理。 S_1 和 S_2 是两个点光源,它们发出的光波在右方叠加。在叠加区域放一白屏,就能看到在白屏上有等距离的明暗相间的条纹出现。这种现象只能用光是一种波动来解释,杨还由此实验测出了光的波长。就这样,杨首次通过实验肯定了光的波动性。

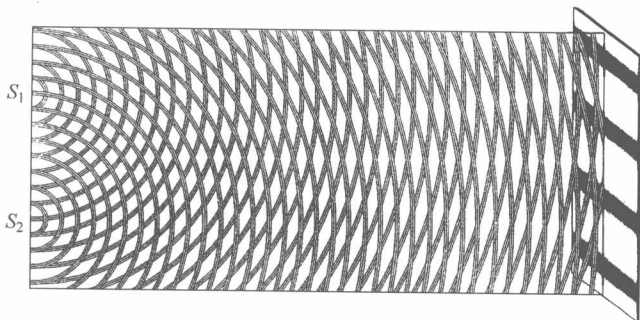


图 22.1 托马斯·杨的光的干涉图

现在的类似实验用双缝代替杨氏的两个点光源,因此叫杨氏双缝干涉实验。这实验如图 22.2 所示。 S 是一线光源,其长度方向与纸面垂直。它发出的光为单色光,波长为 λ 。它通常是用强的单色光照射的一条狭缝。 G 是一个遮光屏,其上开有两条平行的细缝 S_1 和 S_2 。图中画的 S_1 和 S_2 离光源 S 等远, S_1 和 S_2 之间的距离为 d 。 H 是一个与 G 平行的白屏,它与 G 的距离为 D 。通常实验中总是使 $D \gg d$,例如 $D \approx 1 \text{ m}$,而 $d \approx 10^{-4} \text{ m}$ 。

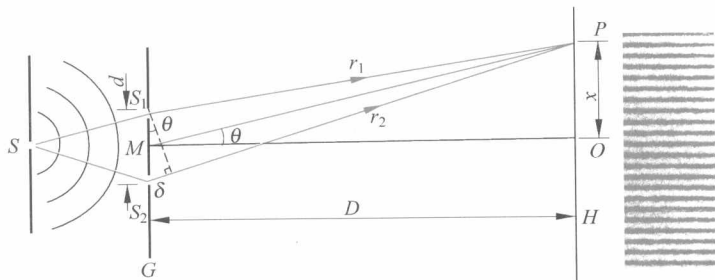


图 22.2 杨氏双缝干涉实验

在如图 22.2 的实验中,由光源 S 发出的光的波阵面同时到达 S_1 和 S_2 。通过 S_1 和 S_2 的光将发生衍射现象而叠加在一起。由于 S_1 和 S_2 是由 S 发出的同一波阵面的两部分,所以这种产生光的干涉的方法叫做分波阵面法。

下面利用振动的叠加原理来分析双缝干涉实验中光的强度分布,这一分布是在屏 H 上以各处明暗不同的形式显示出来的。

考虑屏上离屏中心 O 点较近的任一点 P ,从 S_1 和 S_2 到 P 的距离分别为 r_1 和 r_2 。由于在图示装置中,从 S 到 S_1 和 S_2 等远,所以 S_1 和 S_2 是两个同相波源。因此在 P 处两列光波引起的振动的相(位)差就仅由从 S_1 和 S_2 到 P 点的波程差决定。由图可知,这一波程差为

$$\delta = r_2 - r_1 \approx d \sin \theta \quad (22.1)$$

式中 θ 是 P 点的角位置,即 $S_1 S_2$ 的中垂线 MO 与 MP 之间的夹角。通常这一夹角很小。

由于从 S_1 和 S_2 传向 P 的方向几乎相同,它们在 P 点引起的振动的方向就近似相同。根据同方向的振动叠加的规律,当从 S_1 和 S_2 到 P 点的波程差为波长的整数倍,即

$$\delta = d \sin \theta = \pm k \lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (22.2)$$

亦即从 S_1 和 S_2 发出的光到达 P 点的相位差为

$$\Delta \varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda} = \pm 2k\pi, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (22.3)$$

时,两束光在 P 点叠加的合振幅最大,因而光强最大,就形成明亮的条纹。这种合成振幅最大的叠加称做相长干涉。式(22.2)就给出明条纹中心的角位置 θ ,其中 k 称为明条纹的级次。 $k=0$ 的明条纹称为零级明纹或中央明纹, $k=1, 2, \dots$ 的分别称为第 1 级、第 2 级……明纹。

当从 S_1 和 S_2 到 P 点的波程差为波长的半整数倍,即

$$\delta = d \sin \theta = \pm (2k - 1) \frac{\lambda}{2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (22.4)$$

亦即 P 点两束光的相差为

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda} = \pm(2k-1)\pi, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (22.5)$$

时, 叠加后的合振幅最小, 强度最小而形成暗纹。这种叠加称为相消干涉。式(22.4)即给出暗纹中心的角位置, 而 k 即暗纹的级次。

波程差为其他值的各点, 光强介于最明和最暗之间。

在实际的实验中, 可以在屏 H 上看到稳定分布的明暗相间的条纹。这与上面给出的结果相符: 中央为零级明纹, 两侧对称地分布着较高级次的明暗相间的条纹。若以 x 表示 P 点在屏 H 上的位置, 则由图 22.2 可得它与角位置的关系为

$$x = D \tan \theta$$

由于 θ 一般很小, 所以有 $\tan \theta \approx \sin \theta$ 。再利用(22.2)式可得明纹中心的位置为

$$x = \pm k \frac{D}{d} \lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (22.6)$$

利用式(22.4)可得暗纹中心的位置为

$$x = \pm(2k-1) \frac{D}{2d} \lambda, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (22.7)$$

相邻两明纹或暗纹间的距离都是

$$\Delta x = \frac{D}{d} \lambda \quad (22.8)$$

此式表明 Δx 与级次 k 无关, 因而条纹是等间距地排列的。实验上常根据测得的 Δx 值和 D, d 的值求出光的波长。

若要更仔细地考虑屏 H 上的光强分布, 则需利用振幅合成的规律。以 A 表示光振动在 P 点的合振幅, 以 A_1 和 A_2 分别表示单独由 S_1 和 S_2 在 P 点引起的光振动的振幅, 由于两振动方向相同, 所以有

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi$$

其中 $\Delta\varphi$ 为两分振动的相差。由于光的强度正比于振幅的平方, 所以在 P 点的光强应为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \Delta\varphi \quad (22.9)$$

这里 I_1, I_2 分别为两相干光单独在 P 点处的光强。根据此式得出的双缝干涉的强度分布如图 22.3 所示。

为了表示条纹的明显程度, 引入衬比度概念。以 V 表示衬比度, 则定义

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (22.10)$$

当 $I_1 = I_2$ 时, 明纹最亮处的光强为 $I_{\max} = 4I_1$, 暗纹最暗处的光强为 $I_{\min} = 0$ 。这种情况下, $V = 1$, 条纹明暗对比鲜明(图 22.3(a))。 $I_1 \neq I_2$ 时, $I_{\min} \neq 0, V < 1$, 条纹明暗对比差(图 22.3(b))。因此, 为了获得明暗对比鲜明的干涉条纹, 以利于观测, 应力求使两相干光在各处的光强相等。在通常的双缝干涉实验中, 缝 S_1 和 S_2 的宽度相等, 而且都比较窄, 又只是在 θ 较小的范围观测干涉条纹, 这一条件一般是能满足的。