

走向科学的明天丛书

ZOUXIANG
KEXUE
DE
MINGTIAN
CONGSHU

话说现代光学

HUASHUO
XIANDAI
GUANGXUE

魏凤文 著



59

广西教育出版社

国家“九五”重点图书
出版规划项目

走向科学的明天丛书

话说现代光学

魏凤文 著



广西教育出版社

走向科学的明天丛书

话说现代光学

魏凤文 著

☆

广西教育出版社出版

南宁市鲤湾路8号

邮政编码:530022 电话:5850219

本社网址 <http://www.gep.com.cn>

读者电子信箱 master@gep.com.cn

全国新华书店经销 广西民族印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 4.5 印张 插页 6 91 千字

1999 年 10 月第 1 版 1999 年 10 月第 1 次印刷

印数:1—5 000 册

ISBN 7-5435-2910-6/G·2198 定价:9.00 元

如发现印装质量问题,影响阅读,请与承印厂联系调换

序

在世纪之交,我们这套《走向科学的明天丛书》问世了。这是一套面向青少年朋友的大型科普读物,是为了补充学校教育之不足,从数学、物理学、化学、天文学、地球科学和生命科学六大基础科学的历史发展、当前的成就、未来的璀璨远景,分类展示给读者。

本世纪末,有一股反科学的逆流,认为科学的时代已经过去。例如美国的约翰·霍根,他写了一本书《科学的终结》,他说:“科学(尤其是纯科学)已经终结,伟大而又激动人心的科学发现时代已一去不复返了!”与此同时,法国当代女巫伊丽莎白·泰西埃也写了一本畅销书《占星术——21 世纪的科学》,再加上那些“世纪末”的谣言和形形色色的邪教,把社会搅得似乎有点混乱。

然而,科学永远是照亮世界的火炬,光芒所至,一切邪魔歪道都会原形毕露。这套《走向科学的明天丛书》也正是告诉大家,21 世纪的科学非但不会终结,还将会有更大的发展。

为什么《走向科学的明天丛书》还是从数、理、化、天、地、生这老的六大基础科学讲起?因为我们不能割断人类认识客

观世界的历史,这是人类认识绝对真理的长河中的一个非常重要的环节,近代科学和未来的科学都是在这个基础上发展起来的,边缘科学、前沿科学……我们都在科学的明天中讲到了。有人不顾客观的科学发展的历史事实,主观地想把科学体系打乱,从而建立个人的“新科学体系”,这样只能把科学搞乱,给伪科学以钻空子的机会。

在 80 年代初期,科普界曾有过一场争论,那就是有人说知识的科普已经过时,科普的任务是普及科学思想和科学方法,而这个任务将由科学文艺(主要是科幻小说)来完成。我们说科学基础知识与科学思想和科学方法是刀与刃的关系,抛弃科学基础知识,科学思想和科学方法就成了无刀之刃,只是幻想与空话。科学基础知识越深厚,科学之剑也就越坚实,砥砺出来的剑刃也就无坚不摧。我们推出这套《走向科学的明天丛书》,也就是想让每一位读者都能得到这柄坚实的剑,而砥砺剑刃则需要读者们自己的努力了。

这套丛书的编写是在一批老科普作家支持下集体完成的,他们多年来在教育 and 科研第一线工作,如今大多已年近花甲或年过花甲,但为了科普事业的发展,他们仍然在百忙之中创作了这批精彩的科普作品,我们应该向他们表示衷心感谢。

最后,要特别感谢广西教育出版社,正是在编辑们的精心设计和组织下,这套《走向科学的明天丛书》才能与读者早日见面。

郭正谊

1999 年 8 月 20 日

致青少年朋友

自然界是无限广阔和丰富多彩的,人们对自然界的认识和开发利用日新月异。

从远古起,人们就注意观察和研究自己周围所接触的事物,例如钻木取火、摩擦生电和杠杆、磁石等物理现象,逐渐积累了大量的物理资料。然而,物理学的迅速发展并成为一门学科还是16世纪以后的事。从那时起到19世纪末,物理学已发展成为相当完整的经典体系,曾大大地推动了社会生产力的发展,使机械工业、电力工业普遍推广,无线电通讯广为普及。

随着工农业生产和科学实验的发展,仪器也日益改进,人们研究的范围也日益扩大。到20世纪初,陆续发现了一系列新的物理现象,经典物理学已经无法解释。通过大量的实验和探索,研究高速运动粒子所遵循的规律——相对论诞生了,研究微观粒子波粒二象性理论的量子力学也相继诞生了。相对论和量子力学的建立,不仅解决了许多经典物理学所不能解决的问题,而且广泛地扩展了物理学研究的领域。20世纪上半叶至中叶,先后建立了许多物理学的新分支,取得了可喜

的成就。

量子力学解决了原子结构和原子运动的问题,给化学元素周期律奠定了物理基础;阐明了原子的结构和变化的规律,对于分子如何结合的问题也作出了很大的贡献;阐明了有关分子性质的物理基础。这样,就给量子力学应用于化学现象的研究开辟了道路,建立了量子化学这门新的学科,并且已开始用来指导实践。

把量子力学和相对论用来研究原子核物理现象,建立了原子核理论。在这个理论指导下,原子弹、氢弹、核反应堆等都已先后问世。

量子力学、相对论与电磁理论统一起来,形成了量子电动力学,在说明电子和电磁场相互作用方面,取得了与实验符合得很好的结果。

量子力学和统计物理结合,发展、建立了量子统计物理学,它对固体、液体(统称为凝聚态)和等离子体中各种物理性质的研究,起着主导作用。像航空工业和火箭工业需要的高强度金属材料、自动化技术和电子计算机技术中需要的半导体材料和磁性材料,以及原子能动力工业所需要的特殊材料等,因得益于统计物理学,已由过去的盲目摸索状态走向在理论指导下有计划地研制的阶段,研制过程也得以大大加快。

今天,物理学的研究与应用已渗透到人类社会的各个领域,对推动社会发展起着日益巨大的作用。

21世纪即将来临,物理学将沿着什么方向发展,这是大家所关心的问题。为了使广大青少年朋友在中学学习的基础上,了解物理学的今天和明天,广西教育出版社特邀国内知名的科学家和科普作家撰写了《走向科学的明天丛书·物理学》。该丛书共6本:《物理学的明天》、《物理学与太阳能》、《趣谈相

对论》、《话说现代光学》、《物理学与音乐》、《物理学与人类文明》。作者用通俗、流畅的文笔,描述新的知识,介绍新的领域,集知识性、新颖性、趣味性和可读性于一体,使读者开阔视野,诱发思维,启迪心智。

我衷心地祝贺这套丛书问世,并真诚地期望它受到青少年朋友的欢迎。

阎金铎

1999年6月于北京

写在前面的话

20 世纪即将走完它的全部历程,新世纪的曙光已经透出东方的地平线,在这送往迎来、新旧交替的时刻,对人类的足迹做一番回顾,对未来做一番展望,将是十分有意义的。

你有没有想过,在浩瀚的大自然面前,人类究竟处于一个什么样的地位呢?人类长期生活在地球上,地球看起来很大,但与广袤的宇宙空间相比,它却几乎是小得难以描述的一个点;人类存在的时间看起来似乎已相当久远,但与漫长的宇宙演化相比,这段时间却又是一个极短的瞬间。人类生存的狭小的空间与时间无疑表明,在大自然面前,人类只能算得上一个刚刚学会站立行走的“幼儿”。

20 世纪,是人类智慧发展最快的 100 年。虽然在人类发展的历史长河中,这 100 年只是短短的一瞬间,但就在这个极短的历史瞬间里,人类这个大自然的“幼儿”感知世界的“触角”却得到了极大的延伸。在宏观领域内,人类研究的“触角”伸展到了 10^{26} 米的空间尺度和 10^{17} 秒的宇宙纪元。而在微观世界中,人类不仅学会使用几皮牛($1 \text{ 皮牛} = 10^{-12} \text{ 牛}$)的力把微小的粒子移动到指定的位置,还学会了给细胞钻孔、截断、焊接及融合;人类不仅实现了在 10^{-6} 秒内对瞬态粒子的追踪观察,还实现了在 10^{-12} 秒内对原子距离的观测,甚至钳住单

个原子使其不动长达 0.5 秒。在物理世界中人类“触角”的延伸,也使得其他科学技术领域的研究深入到了微观领域,例如实现了微米数量级的光刻,制造出仅有沙粒大小的电动机和发电机;在化学领域中,不仅实现了 10^{-12} 秒的化学过程观测,而且还能按人类的意愿指定哪根化学键断裂以控制化学反应的方向。这一切表明,在 20 世纪,人类这个大自然的“幼儿”不仅已经学会站立,而且正带着 20 世纪的成果,满怀希望与活力地迈向未来的新世纪。

实际上,上述这些成就都与现代光学的进展紧密相关。它们表明,在人类“触角”的延伸中,现代光学的进展起到了决定性的作用。论及现代光学的进展,不能不涉及到激光,因为,现代光学的进展不仅以激光器的研制成功为开端,而且激光器的问世,促成了整个现代光学学科群的诞生与发展,它们使物理学乃至整个自然科学及相关技术都发生了天翻地覆的变化。

魏凤文

1999 年 6 月于北京

目 录

序

致青少年朋友

写在前面的话

激光器发明的故事	1
▣ 爱因斯坦的预见	2
▣ 微波激光器	6
▣ 激光器的问世	9
▣ 微型激光器	13
自由电子激光	16
▣ 从微波回旋管起家	16
▣ 自由电子激光器的原理	19
▣ 自由电子激光与太空武器	21
同步辐射——一种更新型的光源	26
▣ 一只丑小鸭的诞生	26
▣ 同步辐射的优异特性	29
▣ 同步辐射的进展	32
激光光谱学的发展	35
▣ 传统光谱学	35
▣ 激光光谱学	40
▣ 激光饱和吸收光谱术	42
▣ 非线性、瞬态激光光谱	44
信息光学的进展	47
▣ 从电子学到光子学	47
▣ 迅速发展的信息光学	51
▣ 全光学网络	53
▣ 掺铒光纤放大器	55
▣ 全息术的发现	58
▣ 从低谷中崛起的全息光学	61

✎ 孤立子概念的建立	63
✎ 光孤子通信	66
量子光学的兴起	69
✎ 混沌光场与相干光场	69
✎ 真空与压缩态	72
✎ 认识压缩态	74
✎ 关注超辐射	79
人类触角的延伸	83
✎ 细微的光刻加工技术	83
✎ 微米机器	86
✎ 绝妙的激光清洗	89
✎ 能夹住微小粒子的光钳	95
✎ 费曼的梦想——捕获原子的陷阱	101
✎ 用激光控制化学反应	107
✎ 激光精密制导技术	111
✎ 极端条件下的物性研究	116
✎ 同步辐射在生物医学科学上的应用	117
对光本性的再认识	122
✎ 光的波粒二象性	122
✎ 对光本性的深入认识——泰勒实验	125
✎ 对光本性的再认识——独立光束实验	127
✎ 光子成串与反成串效应	128

激光器发明的故事

激光器发明至今已有 30 余年,由于它的作用之大、应用之广,已经使激光成为尽人皆知的事物了。然而,为什么激光能有如此重要的作用呢?让我们从一个很简单的问题说起。

经太阳曝晒一天的湖水,会释放出大量的热,一根划着的火柴,也会释放出热来。如果有人问,在相同的时间内,哪一个释放的热量更多呢?你可能会毫不犹豫地回答:当然是前者。可是,为什么燃烧的火柴可以点燃纸片,而湖水却不能呢?原因很明显,它们能量集中的情况不同。尽管在相同的时间内,湖水释放的能量远远大于一根燃烧着的火柴,但是它释放的能量

太分散了。设想把火柴燃烧所释放的能量再度聚集,使它们集中在一个极小的角度释放出来,这一份能量就不单只能点燃纸片,甚至有可能把厚厚的纸板烧穿一个洞。同样,一粒随风漂浮的尘埃,它的动能微乎其微,不可能对周围产生什么影响,然而若使两个电子分别都拥有这份能量,它们相互碰撞,就将奇迹发生,这就是电子对撞机的原理。这些都表明,一份能量所产生的影响,往往不在于其数值的大小,即使是一份极小的能量,只要它能在空间上或时间上高度地集中,就有可能造成轰动的效应。现代激光、同步辐射、受控热核聚变以及高能粒子加速器等一系列高科技技术,无不与能量的集中有关。其实,日常生活中的一个极普通的现象,就蕴含着不少值得去思考的问题,顺着这个看来极普通的小问题延伸下去,就有可能与某一个现代高科技课题联系起来。

当然,激光除了能量集中、亮度高外,它的单色性、相干性也很重要,这些性质使它区别于普通光源。然而,为什么激光具有如此特殊的性质,而普通光源发出的光却没有呢?又如何才能使光源发出激光来呢?激光器的发明也像其他大部分发明一样,经历了一个漫长的历史过程。

爱因斯坦的预见

激光器发明于本世纪60年代,然而,关于激光的基础理论的提出却要比激光器的发明超前了几乎半个世纪,究竟是什么原因使激光器的发明滞后了这么长的时间呢?回顾一下有关历史是很有意义的。

光是人类最早注意到的一种自然现象,人们很早就学会

了利用凹面镜或凸透镜把光能聚集起来加以利用。然而,普通光源发出的光,成分很复杂,利用几何光学的方法把光能进一步集中就遇到了困难。能否从根本上,也就是从发光的机制上,获得更强的光呢?要想从发光机制这一根本点入手,首先必须对光有充分的了解。

一个原子吸收能量后,会由低能级向高能级跃迁,而在相反的过程中,又能辐射出光来,尽管这是人们很早就熟悉的事,但是认识光的本质却非易事。人类对光的认识经历了一个很长的曲折过程。在本世纪初,麦克斯韦电磁理论的成功,使人们确信光是一种电磁波。就在人们普遍认定光具有波动性的时候,



爱因斯坦

是爱因斯坦首先强调了光的物质性,即光不仅具有能量,也具有动量和质量,因此,在光与物质的作用过程中,既有能量交换,又有动量交换。在1917年,爱因斯坦发表了两篇关于光辐射的论文——《按照量子论辐射的发射和吸收》和《关于辐射的量子理论》。这两篇论文,正是爱因斯坦这一光辉思想的总结。尤其是在后一篇论文中,爱因斯坦明确地阐明了光在与物质作用过程中能量与动量交换的基元过程和跃迁的详细机制,并第一次预言了受激辐射的存在和光放大的可能性,由此进一步发展和完善了玻尔的量子理论。在这篇论文中,爱因斯坦用量子论的观点讨论了受激辐射过程。他认为,受激辐射是一种在外界作用下发生的辐射。在这个过程中,辐射场光子对谐振子即分子做功,使其作受迫振动,从而改变了分子的能量。由于辐射场与分子之间的位相关系不同,这种能

量可正可负,如果辐射场光子对谐振子做正功,分子将从低能态跃迁到高能态,分子吸收能量;相反,若是对谐振子做负功,分子将从高能态跃迁到低能态,分子释放出一定能量的光子,这就是受激辐射过程。

在提出受激辐射之后,爱因斯坦又对辐射机理的表述作了进一步的发展。他第一次从动量的角度讨论了辐射过程。他认为,伴随辐射过程能量转移的同时,还应有动量的传递。如果受激吸收时,在传播方向上传递给分子的动量是 $(\epsilon_m - \epsilon_n)/e$,那么在受激辐射时,传递给分子的动量将与其相等,但方向相反。这表明,入射光子与分子碰撞发生受激辐射时,将辐射出与入射光子频率相同、方向一致的光子来,即进去一个光子,出来两个全同的光子。也就是说,经受激辐射后,所发射的光子将彼此完全相同,这里明显地提出了光放大的思想。

爱因斯坦不仅应用量子论的观点表述了受激辐射过程,而且在理论分析中还摒弃了经典理论关于跃迁过程的因果关系,引入了跃迁几率的崭新概念,为物理学与经典理论的决裂迈出了可喜的一步。他提出了一个具有创造性的假设,即在每一个单位时间内,吸收跃迁平均发生的次数应当等于自发跃迁和受激跃迁发生的次数之和。以此为基础,得出了著名的普朗克公式,不仅为受激辐射理论提出了理论上的证明,而且还导出了一个自发辐射与受激跃迁的几率比值关系。这一结果对辐射理论的发展起了十分重要的指导作用。

受激辐射的提出,揭示了光能的集中与放大的条件,为激光器的研制成功奠定了基础。但是,这只是后来人们的认识。在当时,无论是提出受激辐射理论的爱因斯坦本人,还是其他人,都没有注意到这一理论的实用价值。对爱因斯坦的这一

设想最早作出响应的是曾担任加州理工学院研究生院院长的美国物理学家托尔曼。托尔曼曾发表数篇论文,讨论粒子数反转的放大特性。1924年,又有人利用受激辐射的概念,研究光的吸收和色散问题。1928年,德国的兰登堡在氦气的色散实验中发现,当激励电流超过一定值时,高能级氦分子的布居数随电流的增大而增多,反常色散现象明显地增强,这实际上间接证实了受激辐射的存在。

苏联的法布里康特则更进了一步,1939年,他在气体放电实验中,观察到了某些谱线有增益,存在粒子数的反转,由此提出用实验方法证实存在受激辐射的设想。他指出,实现受激辐射的条件是实现粒子数的反转,即使处于高能级的粒子数高于低能级的粒子数,如果满足了这一条件,就可以使入射光得到放大。然而,在热平衡条件下,低能级的粒子数总是要比高能级的粒子数多,要实现粒子数的反转和光放大,就意味着破坏热平衡,这在当时被认为是不可思议的,因而人们也不相信粒子数反转分布是可能的,再加上法布里康特也没能在实验上实现这一设想,他的思想没有引起人们的重视。

本世纪40年代,美国哥伦比亚大学以特里奇卡为首的研究组,曾一度致力于无线电波受激辐射的研究,然而,对他们的研究结果,当时关心的人并不多。一方面是由于战争,许多与军事无关的科研项目被搁置;另一方面,在兼跨物理学与工程学两个领域的量子电子学中,物理研究与工程技术严重脱节。量子电子学的理论工作者们侧重于研究光的波动与量子性,对与电子工程技术相关的问题关心甚少;而电子工程技术人员又偏重于工程技术问题,对量子电子学的重要概念及研究方法既不关心,也不感兴趣。因此,量子电子学不仅没有形成整体性的研究态势,更没有一个较完整而系统的理论,再加