

北京科普创作出版专项资金资助

The
History
of
Microscope
and
Microscopy

显微传

清晰的纳米世界
章效锋 著



cm
mm
 μm
nm

清华大学出版社

显微传



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

这本书讲述的是关于人类打开微观世界大门,探索纳米世界,并最终将视野和触角延伸进原子世界的千年历程。故事从人类最先认识光的传播开始,历经光的反射与折射现象、图像放大作用的发现、改善视力的眼镜的问世;光学显微镜的开发与完善、光的波动研究、打破经典显微分辨率极限;电子显微镜的诞生、争论、贡献,电子显微术和门派的发展;一直讲到既可观察原子又可移动原子,还能制作原子小人视频的扫描隧道显微镜家族的问世。伴随着显微镜发展历史时间线的是各个时代物理大师们的奋斗经历与传奇,体现了人类对不可知的微观乃至原子世界的不懈探索精神。在以显微手段拓展历史为主线的同时,本书兼对物理原理、应用范围及其他相关的主要发明创造也作了简单介绍,力图使读者对显微科学的历史原貌和发展时间脉络了然于胸,并对相关的科学或技术概念有概括的了解,最终目的是向读者展现人类在“眼见为实”的信条下,对显微术终极目标不懈追求的历史足迹和所取得的辉煌成功。

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

图书在版编目(CIP)数据

显微传:清晰的纳米世界/章效锋著.--北京:清华大学出版社,2015
ISBN 978-7-302-41316-5

I. ①显… II. ①章… III. ①显微术—普及读物 IV. ①TN27-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第195614号

责任编辑:宋成斌

装帧设计:罗 岚

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

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

印装者:北京雅昌艺术印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:165mm×235mm 印 张:25.75 字 数:337千字

版 次:2015年10月第1版 印 次:2015年10月第1次印刷

定 价:98.00元

产品编号:064150-01

序

每个人的人生就是一个故事。故事从母亲怀抱中开始，并伴随着我们多彩的一生。世上有形形色色的故事，便形成了人类的历史。故事记录了人类文明的脚步，也编织着对未来的美好憧憬。有时候我想，所谓梦，也许就是没有实现的故事。梦想一旦成真，也就成了真的故事，可以讲给未来有梦想的孩子们的故事。我听过很多的故事，读过更多的故事，也经历过很多现在年轻人听不懂的故事，但真正令我惊讶的是，我的师弟章效锋博士在这本书里讲的显微学的故事。

这是一部记载了关于显微学一系列科学发明、发现的著作，然而透过那些高深莫测的科学发明和发现，其背后真正讲述的却是活生生的人亲身经历的故事。它讲述了人类从对“千里眼”的梦想开始，如何从光学显微镜到电子显微镜的神奇创造，经过高压、透镜、像差、球差、透射、扫描、原位等一系列的专业术语的魔变，制造出一类神奇的科学仪器的发明进步史。故事里还讲述

了使这些神奇成为可能的那些不可思议的人们，其中既有创造各种神奇并因此获得诺贝尔奖桂冠的几位幸运儿，更有众多把毕生献给了追求神奇之梦的科学家，其中有我国电子显微学的鼻祖——钱临照先生，还有我国近代电子显微学的代表人物、我的导师郭可信先生，等等。传奇的人物、精彩的故事、生涩的术语、神秘的微观世界……这一切的娓娓道来，便是这本书的神奇之处。

我认识本书作者是从他那一口字正腔圆的京味开始的。我过去熟知的老北京味都是我父辈亲戚中的通州味。我在我国东北沈阳念研究生时，第一次听到这纯正的京腔，就连本书中的文字，仍然能辩出那京韵来。效锋是我国显微学鼻祖钱临照先生的外孙，敢为国际显微学写传，也算师出有名。其实，作者的老父亲，北大物理系的章立源教授当年写的关于超导的科普书，也是我辈当年尝试理解超导物理的入门，可谓子从父业，孙从祖训，真传也。相信这部关于显微学的高级科普，会为我国凝聚态物理、材料科学的研究生们，特别是热心于先进材料优异性能与显微结构间关系研究的人们，有根本性的启发。除此之外，推而广之，还有更多学科的学生和老师，如化学、医学、生物学、矿物学，等等，他们在探索微观世界的时候，也一定会从本书中受益。

本书通俗的语言、趣味的情节和引人入胜的故事，都令人回味和深思。能应邀为此作序，吾人生之幸也。

张 泽

2015年孟秋于西子湖畔

张泽：材料科学晶体结构专家，中国科学院院士，浙江大学材料系教授，中国电子显微镜学会理事长，中国物理学会、中国材料研究学会副理事长，亚太显微学会理事长。

前言

距离 2005 年出版《清晰的纳米世界——显微镜终极目标的千年追求》一书已经 10 年了。承蒙读者抬爱，评论还算可以。很多学校的老师都将那本书指定为必读参考书，也经常有不认识的读者在各种场合突然趋近打招呼或者索要存书，这才知道那本书挺热门但却早已脱销了。屡次向出版社要求再版无果，以致每逢有人求书，必面现赧颜一个劲儿地道歉。好在责任编辑宋成斌老师一直对该书十分夸赞，近年来不断相邀，力劝将此书内容扩充后重新出版。宋老师的盛情难却，也怕违了读者们的企盼，所以回炉加工，着重增添了一些以前未涉及或未详谈的内容以及近年的新发展，希望能用更丰富的内容以飨读者。

这本书肯定好看，阅读的趣味性和包罗万象的内容保证其远胜教科书。正因为它并不是教科书，所以只在关键的技术领域简单介绍了基本原理。读者对技术和原

理方面感兴趣的话，还请参考相关的正式教科书或者文献资料。这本书也不是关于科研新进展的总结，而只专注于溯本求源，重点是对技术或发明源头以及初始贡献者的考察。写此书的主要目的是串历史，讲故事，说名人，做科普。由远古的光线反射镜，到16世纪的眼镜、17—19世纪的光学显微镜，再到20世纪的电子显微镜、扫描隧道显微镜和原子探针显微镜。一镜接一镜，一镜更比一镜妙，更难得的是镜镜出故事，代代有能人。遂发愿著书，畅论古今，美其名曰《显微传》。有诗为赞：

上下千年贯通，纵横南北西东。

谁将秋毫立现，还看显微英雄。

谨以此书献给将我送进电子显微学之门的外公钱临照先生。外公与我闲话科学的情景至今历历在目，那一口带有无锡乡音的普通话音犹在耳。更犹记1990年出国前夕，外公送给我一本他珍藏的赫什（Peter Hirsch）等人写的原版《薄晶体电子显微学》，那时候这本黄封面的原版书国内根本无处可买，上面还有外公他老人家的签名，殷殷叮嘱要我一生多读书。此书至今还在手边，此话也从不敢稍忘，所有这些都将是永远的怀念。也以此书的写作和出版纪念引领我在电子显微领域探索的最敬爱的恩师郭可信先生。还记得2005年《清晰的纳米世界》出版时，郭先生一如既往地给予学生最大的支持，亲自提笔作序。十年后的今天，本书即将完成，惜已无缘再聆听恩师教诲，惟愿以此书表达对恩师与师恩永远的纪念。

作者

2015年夏

目录

- 1 往事越千年 / 人类视觉的延伸 / 1
- 2 风景这边独好 / 突破微米极限的光学显微镜 / 15
- 3 不到长城非好汉 / 突破纳米极限的电子显微镜 / 97
- 4 今朝更好看 / 百花齐放商业电镜时代 / 137
- 5 敢教日月换新天 / 透射电子显微镜的设计及工作原理 / 171
- 6 俏也不争春 / 扫描电镜小兄弟 / 207
- 7 欲与天公试比高 / 高分辨电子显微术的发展之路 / 225
- 8 今日长缨在手 / 屡立奇功的电子显微镜 / 297
- 9 无限风光在险峰 / 可移动原子的扫描隧道显微镜 / 337
- 结语 / 381
- 后记 / 383
- 致谢 / 386
- 参考文献 / 387
- 作者简介 / 396
- 译名索引 / 397
- 编后记 / 403

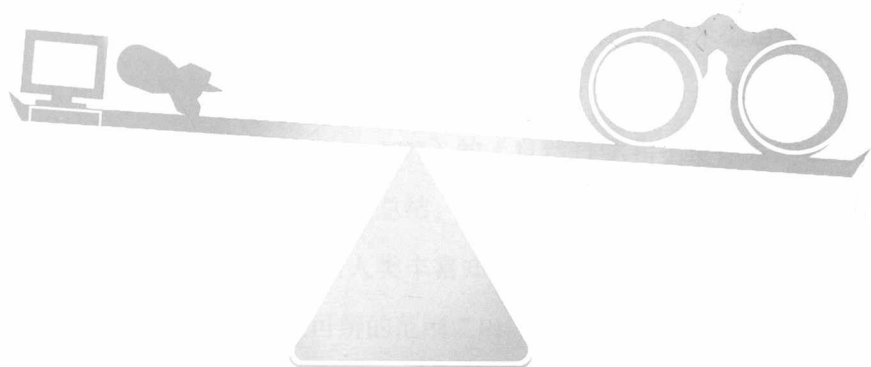
往事越千年

人类视觉的延伸

第

1

章



眼镜的主体不过是两个玻璃片，但简简单单的一对镜片却使人们的生活变得更轻松和多姿多彩。眼镜的发明带给我们的启发是，人类可以通过智慧的发明克服生理上的一些缺陷。正因为如此，普普通通的眼镜在 21 世纪初被一些学者评为人类两千年来十一项“超级”发明之首，比排在第二、第三及第十一位的原子弹、印刷术和电脑更为重要。但眼镜的出现也并非偶然，很多对光的认知和巧妙运用早在眼镜被发明之前很早就出现了。

自公元前 1500 年开始，人类即对光的折射现象有了初步的认识，此后经历了漫长的近三千年的缓慢发展，终于在公元 13 世纪发明了眼镜，迈出了制造光学工具的第一步。

1.1 古人眼里的光

人类对于宏观现象的探索一直是人类社会的一部分。应该说自有人类文明以来，这种探索就没有停止过。对于肉眼所能观察到的一切自然现象，人类从来都抱有极大的兴趣去探索及理解。研究的方法一般而言包括了观察、思考、实验、总结等步骤，其中又以对现象的观察为第一根本。如公元前中国战国时期墨翟（墨子，前 468—前 376）的《墨经》（涉及光学和力学），古希腊哲学家阿基米德（Archimedes，前 287—前 212）著名的阿基米德定理，公元后的意大利科学家伽利略（Galileo Galilei，1564—1642）的 *Eppur Simuove*^{*}，英国科学家牛顿（Isaac Newton，1642—1727）的《自然哲学和宇宙体系的数学原理》^{**}，凡此种种对自然规律的高度总结，无不是以对现象的反复观察为基础。这种“眼见为实”的基础在带给人类丰富知识的同时，也将人类早期对自然规律的研究活动限制在了肉眼可辨的范围之内。

在正常情况下，可被人的裸眼辨识的两点间最小距离大约是 50 微米（即 0.05 毫米）。若两点间的距离小于 50 微米，则两点不能够被眼睛分辨开来，所见仅是一个笼统的较大的点而已。50 微米是多小呢？它大概相当于人的头发丝的二分之一粗细。在我们常说的“明察秋毫”一词中的“秋毫”，泛指动物的纤毫，比人的头发丝更细数倍。但是自然界之奥妙无穷远非只限于人类目力所及的范围。不用说遥远宇宙中数不清的星辰，单说我们身边的，人类

* 英文意为 still it moves，伽利略因这部否认地心说的著作而受到罗马天主教会迫害。

** 简称“原理”，*Principia*，1687。

凭肉眼所能见到的世界实在非常有限。图 1-1 给出了一个尺度表,标明了从毫米往下的尺寸度量衡,包括了微米(10^{-6} 米),纳米(10^{-9} 米),一直到埃(10^{-10} 米)。图中同时列举了各个尺度范围内存在的典型物质个体以及要想看到它们所需要借助的显微镜种类。可以说,仅凭肉眼,人类将永远无法获得对我们周围世界甚至我们自己身体的全面认知。从这个意义上讲,谁又能在真正意义上不借助任何工具做到“明察秋毫”呢?

这里所说的工具范围很广,但最简单、最普遍也是最基本的就是我们今天使用的放大镜和显微镜。这些工具的核心部分都是由具有凸起或凹陷表面的玻璃透镜制成的。从物体传来的光线穿过透镜时会改变传播方向,称为折射,从而产生对被观察物体的放大成像作用。

说起人类对光的传播现象的最初认识和利用,可以追溯到 3500 年前。例如考古发掘殷墟妇好墓时发现了四面铜镜,为目前所见中原文化中最早的铜镜,背面铸有花纹,镜面抛光发亮,显然是用来反射光线的。但对于光本质的系统著述,中国战国时期的墨翟当为第一人。对此,我国著名物理学前辈钱临照先生在 1942 年对墨子论著中的科学研究部分详加考证并著《释墨经中光学力学诸条》一文。

墨翟出生于木工世家,是战国百家争鸣时期一位伟大的思想家、政治家、教育家和社会活动家,在鲁国与孔子和公输般(鲁班)齐名,是墨家思想的创立人。墨家学派集 71 篇论文于《墨子》一书传留后人,经过两千多年坎坷,现在只得其中 53 篇。其中的《墨经》四篇(《经·上》、《经·下》、《经说·上》、《经说·下》)是墨子学术思想的中坚,是对当时由实践中获取的科学知识的总结,讨论的自然及社会科学问题涉猎广泛,包括有名学、形学、光学、力学及经济学,其中光学部分共有 8 条论述。经钱临照先生详细解说,使我们得窥全貌^[1]。光学 8 条依次详细阐明了阴影的定义与生成,阴影与光的关系,

光的直线传播性，光的反射性，物影大小与光源的关系，平面镜反射成像、凹面镜反射成像，以及凸面镜反射成像之物像关系。既有对现象的观察，又有设计的实验佐证，前后连贯，循序渐进，已隐具现代几何光学之雏形。

例如一个很著名的光学实验颇类似于现今针孔照相盒装置：在一个暗室的一面墙上开一小孔，另一人在暗室外对小孔而立，在阳光照射下，会在暗室内与小孔对立的墙上呈现倒立的人影，并由此现象得出“光之人照若射”的结论，即光线直线传播如射出的箭。此外，人对着镜子站立，如果镜子里的人影是颠倒的，而且大的东西在镜子里看起来变小了，就说明镜面小而且有一定的凹度。所有这些都与后来我们熟知的光学理论是一致的，但墨子是在约 2400 年前做的这些实验并得出结论，是很了不起的。墨子的科学知识不仅使他与同为鲁国人的鲁班并列战国时期的顶级能工巧匠，同时还拓宽了他的思路，使他作为思想家，常能提出人所不及的见解。

战国时期有诸子百家，杰出的思想家很多。思想家一多就喜欢辩论。当时宋国的思想家惠施，就是跟庄子说“子非鱼焉知鱼之乐”的那位，曾经抛出一个著名的思辨命题“飞鸟之影未尝动也”。这其实是个悖论，就是说飞鸟的影子不是具体的物体所以是不会移动的。这里的思辨陷阱是，由飞鸟的影

毫 米 人 眼	跳蚤		1 毫米 = 1×10^{-3} 米
	头发		100 微米 = 0.1 毫米
微 米 普通光学显微镜 (极限 0.2 微米)	红细胞		10 微米
	细菌		1 微米 = 1×10^{-6} 米
纳 米 电子显微镜扫描 隧道显微镜	病毒		100 纳米 = 0.1 微米
	DNA		10 纳米
	分子		1 纳米 = 1×10^{-9} 米
	原子		1 埃 = 1×10^{-10} 米

图 1-1

举例说明毫米至埃的尺度范围内存在的物质个体，以及观察所需的工具，此图说明，如果不借助显微镜等工具，单凭肉眼，人类将永远无法获得对微观世界的全面认识。

子不动可推论飞鸟也是不动的。此题一出，引得很多思想家加入辩论。墨子身为当时著名的思想家之一，焉能只作壁上观。他因为对光线与物影的关系了然于胸，遂提出巧辩“景不徙，说在改为”，也就是说影子虽然不动，但可用变化来解释。具体可理解为由于光线的照射出现影子，影子本身并不能移动，但却会改变。旧影子消失，新影子出现，如此往复，结果就是影随鸟动。这个加了科学知识的答辩比起一般的哲学思辨来说更易服人，被后人赞为“杰出之辩”。各位可以试一试看能否提出比墨子之说更好的答案。

如上所说，《墨经》中总结了不少与光线传播和反射有关的现象，但却未能明确提出如今所知的光学反射定律。虽然令人稍觉遗憾，但在距今约 2400 年前即对光的本质有如此独到的钻研与见解，《墨经》中与光学相关的部分堪称为世界上最古老的光学典籍。

与墨子同列春秋战国时代诸子百家的韩非也在其《外储说左上》中记载了应算是世界上最早的幻灯光学实验——豆荚映画。故事说的是周国国君重金礼聘了一位可以在豆荚内极薄的薄膜上作画的高手，历时三年终于完成一幅画。可是国君却在豆荚薄膜上看不到任何画面，颇为不爽。画家提示寻一暗室，在朝阳的一面墙上凿一小孔，然后把薄膜拿到小孔处迎着阳光观看，赫然呈现五彩缤纷活龙活现的龙蛇鸟兽和车水马龙，博得龙颜大悦。唐太宗在《贞观政要》卷一有云：“未有身正而影曲，……。”此言虽然是讨论明君之道，但道理上也反映出中国古人对光和影的正确认知。

古时候在中国之外研究光线的也不少，比如说与墨子大约同时代的古希腊哲学家柏拉图（Plato，前 427—前 347）就研究过视觉，认为是从眼睛里发出的光使人能够看见东西，这当然是不对的。武侠小说中常说武林高手双眼精光四射，其实也都是白天眼睛对外部光线的反射，并非自发的。最早系统地谈论光学的则首推公元前 3 世纪的古希腊数学家欧几里得（Euclid，墨子之后

100 年左右)。他著有 *Optics* (《光学》) 一书, 汇集并详论当时古希腊人所知的光学知识。虽然他认同现在已知并不正确的眼睛自发光之说, 但也由此说正确提炼出了光的入射角与反射角概念, 可是最终也没有明确涉及反射定律。欧几里得其实最著名的著作是《几何原本》, 当代的初等几何学乃源于此。而光学的反射定律则是迟至公元 11 世纪由伊拉克人、阿拉伯学者哈桑 (Abu Ali Hasan Ibn al-Haitham, 又名 Alhazen, 965—1040) 在其光学著作中首次明确提出的, 他也在书中否定了眼睛自发光之说, 通过实验证明了物体本身反光入眼才产生的视觉。那时距墨子时代已经过了 1500 年左右。

反观中国自墨子时代之后, 废黜百家, 独尊儒术, 使得在儒学当道的千余年间, 光学研究方面基本上一片荒芜。迟至明、清两代才陆续出现如明末清初德国教士汤若望 (Johann Adam Schall von Bell, 1592—1666) 所著的《远镜说》, 清朝道光年间 (1821—1850) 郑复光的《镜镜詀痴》及清朝咸丰年间 (1850—1861) 张福喜协助翻译的《光论》等光学专著。郑复光在《镜镜詀痴》一书中对于光的性质、透镜原理作出了论述并且还介绍了一些光学仪器的制造方法, 比如说由一个平面镜和一个凸透镜组成的显微镜的制作方法。彼时中国在光学方面的研究多受西方影响, 自明朝万历 (1572) 始至清朝年间, 西方基督教传教士开始进入中国传教并带给中国丰富的西方科技知识及光学仪器。另外, 清朝盛世之时已然开始派遣留学生远赴西洋学习, 乾隆十六年 (1751), 有留学生赴法国留学, 学习物理学、化学、博物学等, 法王路易十五还赐给他们显微镜和望远镜。所有这些都促进了明末至清朝时期中国在光学学术与技术方面的发展小高潮。但显然这些晚期著作主要是对中国更早时期积累的光学知识的总结和对西方传播过来的知识的消化与传播, 未能再有如墨子般的独创成就。

光线除了反射性外, 另一大传播特性就是折射性, 这在前面已经提及。

然而《墨经》在折射性方面完全没有涉及，可能的原因是光线折射现象在日常生活中的呈现多与透明玻璃载体如盛水的器皿有关。玻璃的使用虽可追溯至公元前 4500 年，但多在古埃及、古希腊等地使用。在出土的战国时代遗物中，也发现过一些玻璃珠制品和玻璃容器，不透明或半透明，是早期的铅钡玻璃。但估计当时产量稀少，民间罕见，而且透明性也差。因此墨子虽可借青铜镜等研究光的反射现象，但因日常生活中鲜有透明容器可用，使得光的折射现象未能被及时认知。

光的折射现象可说是大大造福于人类社会，在这方面人类受益最大的莫过于因光的折射而产生的放大作用。读者可以自己做些小实验，例如透过小玻璃球或盛水的玻璃杯来观看小物体如字体等，可以发现小物体被放大了。人类对于光折射而产生放大作用的初级认知可推至公元前 1500 年。那时的古埃及人就已经对放大现象有了些感性认识，原因当然与古埃及人会制造透明玻璃有关。但是在当时的古文明社会，无论是古埃及人、古希腊人，还是古代中国人都未能对光线折射引起的放大现象有进一步的认识。现存最著名的古代透镜称为“兰亚德透镜”（Lanyard Lens），它是由一个叫兰亚德（Lanyard）的人在一个叫尼姆罗（Nimrod）的地方发掘出来的，经鉴定，它大约于公元前 721 年至公元前 705 年制成。这是一个石制的凸透镜，石材里面有美丽花纹。在很长一段时间里，兰亚德透镜被认为是已发现的世上第一例平凸透镜（一面是平面，另一面为凸面）。但后来的研究表明，兰亚德透镜的凸面是由许许多多的小平面组合而成的，并不具备放大镜所需的光滑凸面。另外石材里的天生花纹也使透镜的放大功能不佳。因此现在一般认为该透镜原本仅是从某物品上脱落下来的装饰品，而并非是用来作放大镜用的。

关于光的折射现象的记载最早可见于公元 2 世纪，古希腊数学家托勒密（Claudius Ptolemy，90—168）曾描述将一根直棍的一部分插入水中，棍体在水面

内及水面外的部分看起来像是相互弯折了一个角度。他并由此正确地估算了水的折射系数（关于折射系数的概念，在第2章会介绍）。托勒密虽未进而揭示出光的折射定律，却在历史上首开对光折射现象的系统研究。公元1世纪罗马哲人、古罗马末代皇帝的宫廷教师、西班牙人塞尼卡（Lucius Annaeus Seneca，前4—65）也曾描述过装满水的球体所具有的放大作用，他发现透过水球可将小字母放大到清晰可读的程度。其实光通过水球而折射成像与人眼视物的原理密切相关。这之后欧洲文明史进入了几百年的发展缓慢时期，就是所谓的中世纪的黑暗期。好在西方不亮东方亮，繁荣的阿拉伯世界为世界继续带来科学的发展。到公元11世纪左右，阿拉伯学者哈桑根据他的实验、思考以及当时阿拉伯人已经大大领先于世界的光学知识积累撰写了一部重要的光学著作 *Opticae Thesaurus*^{*}，洋洋洒洒七大卷。

出生在伊拉克巴士拉的哈桑是位了不起的学者和哲学家，自幼接受过良好的教育。当时伊斯兰帝国为世界超级强权，统治着幅员辽阔的国土甚至远达印度和西班牙。后来又征服埃及，在开罗建法蒂玛（Fatimid）王朝，最高统治者称哈里发（Caliph），类似于中国的皇帝之称。哈桑因为聪明过人，在伊斯兰大帝国被委以官职也不奇怪。但他却偏偏不爱做官，屡次推辞不果，于是开始装疯，终于被免去官职。那时埃及的开罗河经常河水泛滥，法蒂玛王朝的哈里发征召能人治河。哈桑觉得有把握在开罗河上建坝治水，于是去埃及见哈里发提出他的建议。哈里发很高兴，委任哈桑全权负责治理尼罗河。但工程正式开始后，哈桑发现尼罗河太大了，超出了他的想象，他的建坝计划根本就无法完成。几经拖延，最后向哈里发坦承无法完成任务，也有传说是这时候开始装疯以推卸责任。哈里发大怒，认为受了欺骗，同时也浪费了很多时间，于是把哈桑关进了监狱（一说是软禁）。正当年富力强之年却失去人

^{*} 英译 *Book of Optics*，中文可译为《光学》。