

# 色差与球差——科学家执著百年的谜题

赧科材

中国科学技术大学 本科 20 级材料科学与工程(14)系 PB20030874

摘要：色差是白光进行成像时，不同色光因不同折射率造成的色散而有不同的传播光路，从而呈现的像差；球差是由于球面镜的几何因素使同心光束无法聚焦的现象。继伽利略制成第一台望远镜后，科学家们一直在寻找消除望远镜色差、球差的办法。本文从科学史着笔，以消除的方法为线索，调研光学望远镜的历史演化与改进。

关键词：色差、折射望远镜、科学史

## 引言

望远镜的发明，是天文学史上的一次重大革命。17 世纪以来，从意大利天文学家伽利略·伽利雷（Galileo Galilei）用它发现了“新宇宙”开始，天文望远镜不断演进。21 世纪初，斯隆数字巡天（Sloan Digital Sky Survey）已经可以绘制宇宙的三维地图，其中最远的星系距离地球上百亿光年。由此可见，望远镜对于天文学来说至关重要，它的每一次技术进步都扩大了人类认识宇宙的疆域。

望远镜主要分为折射式和反射式两种。早期的折射望远镜由单片透镜组成的物镜存在球差和色差，导致成像失真。针对这个问题，牛顿、赫维留、惠更斯、霍尔、约翰·多洛德、约瑟夫·冯·夫琅和费等人，都提出了独特的消色差方法。对此，本文将分别较为详细地介绍他们的贡献。

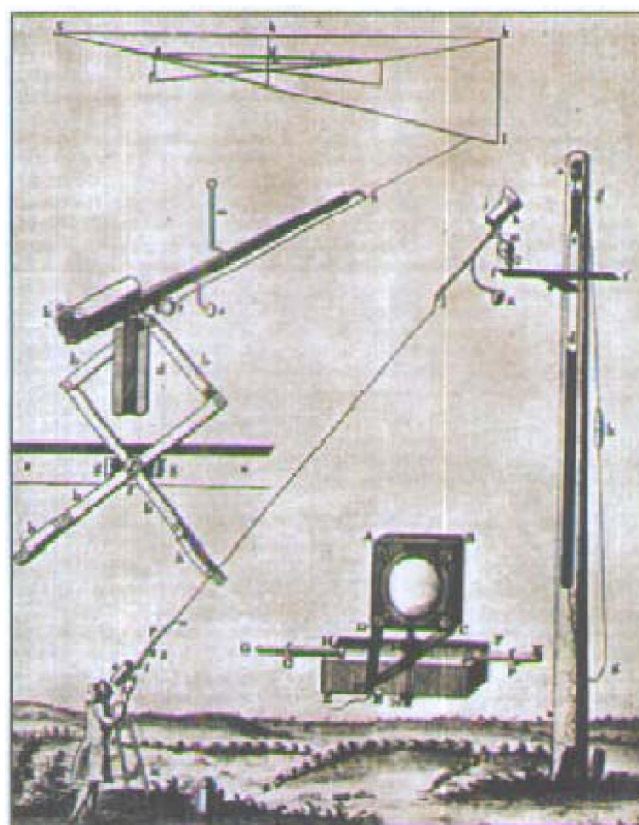
## 加长镜筒

在折射望远镜发展的早期阶段，当时的望远镜技术尚不能解决色差和球差的问题。天文学家所能做的是将球面透镜磨制得更平，使光线弯曲更小。这样做使得距离光心不同距离的光线的汇聚点更为接近，也让汇聚点到目镜的距离更长，导致望远镜必须做得很长。于是天文学家们开始设计越来越长的望远镜，来研究更遥远的天体。

17 世纪早期，伽利略的望远镜最长也不过 1.2 米。1647 年，波兰啤酒商约翰内斯·赫维留（Johannes Hevelius, 1611~1687）制造了 3.6 米长的望远镜，试图用来观测月球——这种望远镜能放大 50 倍。与此同时，荷兰天文学家惠更

斯 (Christiaan Huygens, 1629 ~ 1695) 和他的弟弟的工作开辟了真正的长镜身望远镜时代。

1655 年惠更斯制造出他第一架重要仪器——物镜直径 5 厘米、镜身 3.6 米、能放大 50 倍的折射镜。他用这架望远镜发现了土星的最大卫星——土卫六。同年年底他制造了镜身 6.9 米的望远镜，此后他继续制造更长的折射镜，最后竟做出长 37 米的望远镜。他用每一架作了改进的望远镜不断观测土星，结果发现：当年伽利略所看到的“土星的耳朵”原来是环绕土星的光环。



惠更斯的长 37 米折射望远镜

为了制造更长的折射镜，惠更斯干脆省去镜筒——他把一块物镜装入一根短金属管，然后接到一根高高的杆子上，并可以从地面上操纵它。目镜装在另一根小管子里，架在一个木支座上。目镜与物镜之间有一段绳子，将它拉紧时，可使两块透镜对准。

然而，太长的望远镜无法真正地利用，大多数发现也都是长度不超过 12 米的折射望远镜得到的。例如，惠更斯通过 3.6 米 50 倍的望远镜发现了土星的卫星，而且通过 6.9 米 100 倍的望远镜确认了土星有一个光环所围绕。

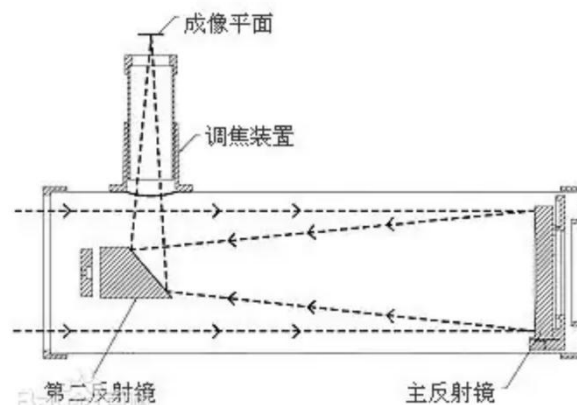
## 反射望远镜

关于球差产生的原因，当时德国天文学家开普勒已经给出了答案：球面形状的缺陷。然而色差却一直是一个未解之谜。直到 1666 年初，牛顿完成他著名的白光分解实验，人们才明白了色差产生的原因。

经过多次磨制非球面透镜的失败，牛顿决定采用球面反射镜作为主镜来设计

反射式望远镜——所有的光线反射角等于入射角，光线反射之后不会发散，从根源消除色差问题。

1668 年,牛顿制成第一架小型反射望远镜。它的物镜是用青铜磨制的凹面反射镜,直径只有 2.54 厘米,镜筒长度 15 厘米,放大倍率达 40 倍,观测效果不亚于



2 米长的折射镜。1672 年 1 月, 牛顿又完成第二架反射望远镜, 长仅 16 厘米。物镜的前面装有一小块倾斜 45 度放置的平面反射镜, 当光线射到物镜上以后先被反射到平面镜上, 又被平面镜反射到镜筒一侧的目镜前聚焦, 通过目镜即可看到被放大的像。虽然球面镜会产生一定的象差, 但用反射镜代替折射镜却是一个巨大的成功。从此望远镜有了第二种设计方式——反射式。

牛顿设计的反射望远镜在英国皇家学会进行了展示,引起了很大的轰动。人们对他的设计给予高度的评价。他的反射望远镜不仅彻底消除了令人厌恶的色差, 而且制作起来比较容易, 使用起来更方便。然而, 牛顿并不知道不同材料对光的折射率不同, 并由此得出了错误的结论: 折射镜的色差是不可消除的。

几乎是与牛顿同时代, 还有一位名叫 N.卡塞格林的法国科学家也设计了一种反射望远镜。和牛顿设计不同的是, 副镜提前到主镜焦点之前, 并且为凸面镜。这样的设计使经副镜反射的光线稍有些发散, 使望远镜的放大率有所降低, 但它的优点是不仅消除了球差, 而且可以使望远镜的焦距很短。当望远镜越做越大的时候, 这一点就越来越显示出它的优越性。

$$\left\{ \begin{aligned} S_I &= \pm \left[ \frac{\left(1-m\frac{b}{f'}\right) \cdot (1-m^2) - m^3}{4} e_1^2 + \frac{m^3}{4} + \frac{\left(1-m\frac{b}{f'}\right) \cdot (m+1)^3}{4(m-1)} e_2^2 \right] \\ S_{II} &= \frac{m^2 \cdot \left(1-\frac{b}{f'}\right) + 1 + \frac{b}{f'} \cdot \left(1-\frac{b}{f'}\right) \cdot (m+1)^3}{4(m-1)} e_2^2 \\ S_{III} &= \pm \left[ \frac{-m^2 \cdot \left(1-\frac{b}{f'}\right)^2 + \left(1+\frac{b}{f'}\right)^2 - 4m \cdot \left(1-\frac{b}{f'}\right)^2 \cdot (m+1)^3}{4\left(1-m\frac{b}{f'}\right)} + \frac{\left(1-\frac{b}{f'}\right)^2 \cdot (m+1)^3}{4(m-1) \cdot \left(1-m\frac{b}{f'}\right)} e_2^2 \right] \\ S_{IV} &= \pm \frac{m^2 \cdot \left(1-\frac{b}{f'}\right) + m - 1}{1-m\frac{b}{f'}} = 2\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \\ S_V &= \frac{\left(1-\frac{b}{f'}\right) \cdot (m^2-1) \cdot \left(\frac{b^2}{f'^2} + 4\frac{b}{f'} + 3\right)}{4\left(1-m\frac{b}{f'}\right)^2} - \frac{\left(1-\frac{b}{f'}\right)^3 \cdot (m+1)^3}{4(m-1) \cdot \left(1-m\frac{b}{f'}\right)^2} e_2^2 \end{aligned} \right.$$

卡塞格林双反射镜系统三级像差计算公式

后来, 卡塞格林望远镜的光路原理得到了广泛的应用——不只是用在光学望远镜中, 其他波段的望远镜也借鉴这一光路原理。比如许多射电望远镜都是采用



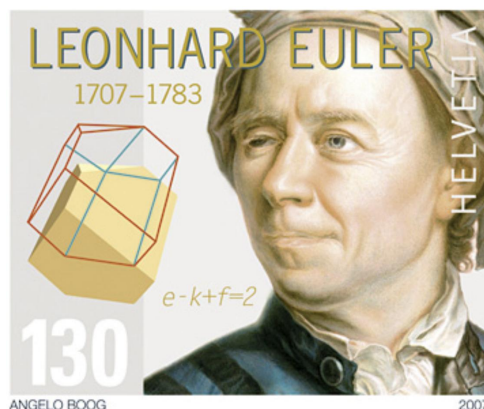
卡塞格林式设计。

## 组合透镜

一段时间后，天文学家们又发现不同透明材料具有不同的折射率。1729 年，英国的磨镜专家切斯特·莫尔·霍尔（Chester Mor Hall，1703 ~ 1771）发现可以用这种现象来解决色差问题。1729 年，他将一块火石玻璃做的凸透镜和一块冕牌玻璃做的凹透镜组合，制成了消色差透镜。

霍尔曾给英国光学制造界的权威约翰·伯德（John Bird）等人写信，说明此复合透镜的制作方法，虽然并未引起他们的注意，但是他的发明在整个伦敦光学界中慢慢传播开了。

1747 年，瑞士大数学家莱昂哈德·欧拉（Leonhard Euler）在不了解霍尔工作的情况下，声称可以同时修正物镜的球差和色差，因为人眼就是如此。他设计了一个由两块新月形透镜组成的目镜，中间放上水，通过计算得出此种透镜的色差可被消除。另一位英国人约翰·多洛德得知这篇文章后，向



欧拉指出了他的错误，依据是牛顿说过折射不可能没有色散。但几番通信往来后，多洛德受到了启发，用不同耗散率的水和玻璃试验，想要做出没有色差的透镜，然而一开始并未成功。

1755 年，瑞典乌普萨拉大学的数学教授塞缪尔·克里基斯蒂尔奈（Samuel Klingenstierna）写信给多洛德，声称他通过几何方法证明了牛顿色散实验是有误的。事实上，牛顿的结论只适用于棱镜顶角较小的情况，对大角棱镜并不适用。

后来，约翰·多洛德继续做了大量的实验，总结出玻璃的色散比水的色散大，通过增加水棱镜的顶角角度，可以得到无耗散的折射。1757 年，约翰·多洛德发现



英国光学仪器商约翰·多洛德

一块顶角为  $25^\circ$  的火石棱镜和一块顶角为  $29^\circ$  的冕牌棱镜产生的球差较小而色差较大。尝试了多种棱镜组合后，他推断出凸的火石玻璃的焦距与凹的冕牌玻璃的焦距之比必须为 6:4，这也是它们的色散率之比。

多洛德还发现，可以通过联合两片球差相等的凸凹透镜来消除球差：负透镜产生的球差有助于补偿正透镜的球差。改变透镜的曲率，而保持所要求的聚焦能力之比，就有可能使球差几乎减到零。就这样，约翰·多洛德制作了第一个消色差透镜。他于 1758 年发表的《基于光的不同折射率的实验说明》一文，完全推翻了牛顿关于折射望远镜的色差不可消除的结论。

1763 年，约翰·多洛德的儿子彼得·多洛德 (Peter Dollond) 制作了由三块透镜组成的物镜，次年做成望远镜销售，并首次应用于天文学领域。三镜物镜的质量比以前制造的所有物镜都高。第三块透镜不仅减少了二级光谱，而且更好地校正了球差。此外，彼得·多洛德还设计了夜用望远镜、军用望远镜、小型反射望远镜等。他出色的制造技术促进了公众对便携式望远镜的需求。他的望远镜尽管价格昂贵，但很抢手。1783 年，多洛德家族首先用包黄铜的桃花心木制作望远镜的镜筒，这对于传统的牛皮纸镜筒而言是个极大的改进。

彼得·多洛德被称作“实验光学之父”，他做透镜不靠理论而靠大量实践。后来他的生意被侄子乔治·多洛德接手。乔治·多洛德于 1819 年当选英国皇家学会会员，次年成为英国皇家天文学会的创始人之一。如今，多洛德家族的光学工厂仍然在营业，但现在主要销售眼镜，而不是望远镜。

北京天文馆现藏一百余架古董望远镜，在这些望远镜中，由多洛德家族制造的有十余架，其中一架被明确标明是消色差望远镜。这是一架手持四节折射望远镜，由约翰·多洛德的外孙乔治·多洛德 (George Dollond) 于 1820 年左右制造，现保存完好。物镜的口径为 7.5 cm，镜筒的长度为 146 cm。物镜镜筒包有红色摩洛哥皮，并标有 “Dollond” “London” 字样。



## 改良玻璃

18 世纪末 19 世纪初，瑞士工匠皮埃尔·路易士·吉南德（Pierre Louis Guinand, 1748 ~ 1824）与德国光学家约瑟夫·冯·夫琅和费（Joseph von Fraunhofer, 1787 ~ 1826）合作，通过在融化的玻璃里加入一些适当的化学物质，制造出缺陷很少、可以用于透镜制造的光学玻璃。这样，大尺寸的消色差物镜的制造就成为可能，消色差折射望远镜越来越流行，口径尺寸也越来越大。1846 年德国卡尔·蔡司光学公司成立，大大推动了玻璃工业的发展，到了 19 世纪中叶，大型折射望远镜在世界各地纷纷建立起来。



夫琅和费正在展示他的分光实验

1824 年，夫琅和费制造了一架口径 24 厘米、长 4.3 米的消色差折射望远镜，安装在俄罗斯的多尔巴特天文台，后来又被迁移至普尔科沃天文台。令人惊讶的是，这架望远镜上的机械部分极为灵活，以至于用一个手指头轻轻一点就改变它的方向。多尔巴特天文台台长斯特鲁维（Friedrich Georg Wilhelm Struve, 1793 ~ 1864）使用这架望远镜发现了 2200 颗新双星，并测定出织女星的视差，使他成为征服恒星的三位天文学家之一。

此后磨制折射望远镜的技术发展到了尽善尽美的程度。在这一过程中，美国光学制造家克拉克父子起了主要的作用，他们制造的折射望远镜的口径也不断增



大。1888 年，美国利克天文台建成，克拉克父子为它磨制了一架口径 91 厘米的大型折射望远镜，造价 5 万美元。可惜此时老克拉克已经辞世几个月了，没能目睹自己的辉煌成果。

4 年以后，小克拉克为美国叶凯士天文台磨制了一块重 230 千克、口径 102 厘米的巨大透镜。这架巨型折射望远镜于 1897 年 5 月 21 日启用，19 天之后，在胜利的喜悦声中，小克拉克也寿终正寝。他生前曾计划造出口径为 152 厘米的超级透镜，可惜未能了此心愿。直到今天，叶凯士天文台和利克天文台的两架仪器仍然保持着折射望远镜的冠军和亚军的光荣称号。



1921 年爱因斯坦等人在叶凯士 40 英寸折射镜下留影

## 结语

从 17 世纪开始，光学望远镜的色差与球差问题一直困扰着天文学家们。在约 200 年的历史长河中，他们先后提出了加长镜筒、研制反射望远镜、组合正负透镜和改良玻璃材料的方法，力图彻底消除色差与球差。

在光学望远镜不断演进的过程中，我们也可以看到，名留青史的并不只是和望远镜密切相关的天文学家或者光学家，数学家欧拉、光学仪器商多洛德、工匠吉南德、克拉克父子、甚至啤酒商兼议员的赫维留，都在光学望远镜发展史上留

下了属于自己的一撇一捺。牛顿和欧拉们揭示了色差球差的成因并提出设计方案，克拉克们克服工艺制造问题，再由商人多洛德们开辟市场、发扬光大。

理和工，科学的两个方面，总是相辅相成，缺一不可。如果我们总是满足于对科学知识的应用，只会创造更多的“四大发明”——譬如火药。我们对火药的应用领先近千年、广泛到家家户户。在此基础上发展出化学、甚至物理学都是可能的，但从未有人思考过火药的爆炸原理。止步于“火药会爆炸”这个事实，而不去探究背后的理论知识，这也是为什么近代以来中国落后于世界的原因之一。

在科大总是会听到“废理兴工”的口号，对此我也想发表一下自己的见解：社会进步从来不用废理兴工，真正需要的，应是理实交融。

## 参考文献

- [1]温学诗,吴鑫基.观天巨眼——天文望远镜的 400 年[M].**商务印书馆**,2008.
- [2]王亚男.天文望远镜光学系统[M].**中国科学技术出版社**,2016.
- [3]Donald G.York. The Astronomy Revolution: 400 years of Exploring the Cosmos [M].**北京大学出版社**,2013.
- [4]陈丹.从伽利略到克拉克：折射望远镜发展纵横谈[J].**太空探索**,2009(02).
- [5]吴佩萱.望远镜的色差问题——小议牛顿在光学上为数不多的一次失误[J].**物理与工程**,16(2),2006.
- [6]李百乐.约翰·多伦德家族与消色差望远镜[J].**科学教育与博物馆**,2021(2): 111-116.