

赵友钦对中国古代光度学的贡献

李 鹏 举

(抚顺石油学院)

赵友钦(十三世纪中叶—十四世纪初叶)是我国元代的一位民间科学家,著有《革象新书》,其中卷五首篇是“小罅光景”,记述了小孔成象的观察;光学实验楼的设施;系列光学实验的设计、结果和分析,全文一千三百余字,是一份严谨的物理论文。

关于“小罅光景”的原文、对它的解释和分析以及赵友钦论文的大意等,可依次查阅本文参考文献[1—3],兹不重述。在此基础上,本文侧重于从光度学角度来概括赵友钦的贡献。因为正是赵友钦以当时世界上绝无仅有的实验所取得的成果,不仅发展了古代几何光学,更为重要的是开拓了古代光度学。下边将从概念和定律两个方面论述之。

一、概 念

在赵友钦的论文中,含有下列概念思想。

1. 光源强度

赵友钦写道:“于两间楼下各穿圆阱于当中,径皆四尺余。右阱深四尺,左阱深八尺。置桌案于左阱内,案高四尺”,“作两圆板径广四尺,俱以蜡烛千余枝密插于上”。然后将它“放置阱内而燃之”;或“向右阱东边减却五百烛”;或“又灭左阱之烛,但明二、三十支疏密所得”;或“又皆灭,而但明一烛”;或“依旧皆燃左阱之烛”等等。采取这一系列措施,以论“光盛”和“光衰”对实验的影响,无疑这已考虑了光源强度及其变化。

2. 光通量

赵友钦所研究的小孔(“罅”)成象(“景”),既包括孔相当小(“小罅”),也包括孔相当大

(“大罅”)两种情况。而且其中的“罅”,都是有“方、圆、长、短、尖、斜”等形状之别的,这就不全同于针孔倒象。因此,通过有形状大小的孔隙的光,已相当于光通量。赵友钦“更作两圆板径广五尺,覆于阱口地上,板心各开方窍。”这里的“窍”也就是孔隙,“左窍方广寸许,右窍方广半寸许。”在“[实验一]”的条件下,他解释说:“其窍宽者所容之光较多,”“窍窄者所容之光较少。”这里所谓“光较多”或“光较少”,也是指光通量的多少。

3. 光流

赵友钦在“[实验二]”中看到,光束发散愈广,在光源强度不增的情况下,则每支烛的象(“千景”)愈展开而重迭的就愈少,所以其明暗程度就愈差,这好象溶液中的水愈多,则味道就愈加冲淡了一样(“景之周径愈广,烛之光焰不增,如是则千景展开而重迭者薄,所以愈广则愈淡,亦如水多则味减也。”)在这里,他用溶液中水的多少,比喻传播着的光通量的疏密,显然相当于把光场视为有密度分布的光流。

4. 照度

在赵友钦的论文中,自始至终都强调被照面(作为象屏的楼板或吊板)上“光景”的“浓淡”问题。例如,在最初的“[观察]”中就说:“罅虽宽窄不同,景却周径相等,但宽者浓而窄者淡”;“罅渐宽,则景渐淡,景渐远,则周径渐广而愈加淡。大罅之景渐远,亦渐广,然不减其浓淡;”在“[实验一]”中他写道:“千景皆广而迭砌稠厚,所以浓,”“千景皆狭而迭砌稀薄,所以淡”;在“[实验二]”中写道:“景近则狭而浓,远则广而淡”;在“[实验三]”中写道:“景广则淡,景狭则浓”等等。赵友钦如此前所未有地描述着“光

景”的“浓淡”，就是说，是他第一个考虑了相当于照度的概念（不应理解为亮度）。结合上述以水喻光的论述，又可简括出赵友钦具有这样的思想：光通如水，照度如味。

5. 光面

赵友钦在“[观察]”中说：“若以物障其所射之处，迎夺此景于所障碍物上”；在“[实验二]”中说：“别将广大之板二片，各悬于楼板之下较低数尺，以障楼板而夺其景”，“所以迎夺其景者，表其景近则狭而浓，远则广而淡也”等等。如此移动象屏，以“迎夺其景”，则相当于承认光所能达到的任一空间上，各光束皆有自已的截面，姑且称之为赵友钦的“光面”。（但不是波面）

6. 迭加性

赵友钦明确提出的最重要的概念是“迭砌”（即迭加性），这是他整个论文中的基本概念之一。例如，“[实验一]”中的“偏中之景千数交错，周遍迭砌”，“千景迭砌”，“迭砌稠厚”和“迭砌稀薄”；“[实验二]”中的“千景展开而重迭者薄”；尤其在“[实验四]”中，赵友钦还把“迭砌”和“光面”结合起来，予以模型化：“大罅之景千数，比于沓纸重迭不散，张张无参差”。即赵友钦的“光面”犹如纸面，但重迭而无厚度。所谓“迭砌稠厚”和“迭砌稀薄”也者，其中的“厚”与“薄”，是指“浓”与“淡”而言的。

二、定 律

赵友钦通过观察和实验，得出不少结论性的东西，已被时贤论过了。我这里只想补谈两条。

1. 迭加原理的初步思想

按“千景迭砌”的本意，可知赵友钦的“迭砌”，重在照度迭加。但也不排斥“迭砌”又是光束迭加，只是后者没有说出来。

关于照度迭加原理，常表为：一个被照面上的全照度是个别光源所有的照度之和。赵友钦也有这种思想，他在“[实验一]”中说：“盖两处皆千景迭砌，周径若无广狭之分，但见其窍窄者所容之光较多，乃千景皆广而迭砌稠厚，所以

浓。窍窄者，所容之光较少，乃千景皆狭而迭砌稀薄，所以淡。”这是说，由窍的宽窄影响光通量的多少，最后影响到照度的浓淡。虽然没有具体说出全照度是各分照度之和，但照度是可以迭加的思想已经有了。

至于光束迭加原理，是指光束在交错地方，彼此无碍，互相穿越，独立传播，这是十七世纪的惠更斯（1629—1695年）提出的原理。赵友钦在“[实验一]”中则有过这样一段描述：“千烛自有千景，其景皆随小罅点点而方。烛在阱心者，方景直射在楼板之中。烛在南边者，方景斜射在楼板之北。烛在北边者，方景斜射在楼板之南。至若东西亦然。其四旁之景斜射而不直者，缘四旁直上之光障碍而不得出，从旁达中之光，惟有斜穿出窍而已。阱内既已斜穿，窍外止得偏射，偏中之景千数交错，周遍迭砌，则总成一圆。”这一条描述，常被理解为阐明了光的直进性，这无疑是对的，但忽略了落实于“景千数交错，周遍迭砌”这个迭加性上。既然“千数”之“景”，可以“交错”和“迭砌”，而“景”又是直进的光在屏上的表现，那么，“景”的“迭砌”，首先是由于光的“迭砌”。即使没有屏面，那里还有“光面”，甚至在光束互相交错的“窍”处，也是如此，在那里光束也应是“千数交错”和“迭砌”的，即光束是可以迭加的。而赵友钦则仅仅考虑了远离“窍”处象屏上的“迭砌”，没有把它运用于“窍”上光束交错的地方，更没有明文说出：光束的“迭砌”，就是光束彼此无碍、互相穿越和独立传播。因此他的迭加思想，是初步的，还不够完善。

尽管如此，赵友钦的“迭砌”思想，还是有历史意义的。在中国物理史上，对于针孔倒象中的光束交错点，《墨经》曾指出：“在午有端”（120条）；《梦溪笔谈》却提出：“中间有碍”（卷三、辩证一、44条）。不论哪一个，都没有明确提出过“迭砌”一词，只有赵友钦才在实验基础上第一次地建立了它。

2. 照度定律的定性关系

除了照度迭加之外，赵友钦还通过实验得到了更为广泛性的照度关系。

(1) 在“[实验二]”和“[实验三]”中相继提到：“先论景距窍之远近，复论烛距窍之远近”。结果是：“景近窍者狭，景远窍者广。烛远窍者景亦狭，烛近窍者景亦广。景广则淡，景狭则浓”。

这说的是物距或象距变化时，能够影响到象的大小变化，而象的大小发生变化时，又同时影响到照度的变化。

(2) 在“[实验二]”中还指出：“烛之光焰不增，斜射愈远，则所至愈偏”，“愈偏则周径愈广”，愈广则“千景展开而重迭者薄，所以愈广则愈淡”。

这里说的是光源强度不变时，照度对于光屏和人射角的依赖关系。

(3) “[实验三]”又指出：“烛虽近而光衰者，景亦淡；烛虽远而光盛者，景亦浓。”

这是说，某处的照度，一方面随着和光源的距离远近而浓淡，同时也随光源强度的盛衰而强弱。

物理学中关于点光源的照度定律是这样陈述的：一定强度(I)的点光源所造成的照度(E)和从光源到被照面的距离(r)的平方成反比，而和光通量的方向与被照面法线之间的夹角(θ)的余弦成正比 ($E = I \cos\theta / r^2$)。赵友钦的照度关系虽无定量表达，但所论的关系则比较全面而复杂。例如，千支烛焰已不是点光源，通过孔和达到屏上的光束也非平行入射等等。我们可以称这些关系为赵友钦的照度定律(定性的)。

光度学是光学中的一个特殊部分，由于其中的光束、光通量都是光的能量流，故有别于几何光学。因此，可以认为赵友钦所开拓的工作，属于中国古代光度学。

参 考 文 献

- [1] 赵友钦，四库全书珍本初集子部·革象新书卷五，商务印书馆，(1934—1935)。
- [2] 银河，物理通报，4(1956)，201。
- [3] 金秋鹏，中国古代科技成就，中国青年出版社，(1978)，184。

廉价的钕-钕铁硼永磁新材料

物理研究所于 1985 年 1 月研制成功一种含钕约 30% 的钕-钕铁硼永磁新材料，磁能积达 28 MGOe。这种新材料的特点是价格便宜，性能中等，在工业生产上是一种很有发展前途的新材料。

自从 1983 年底日本研制出钕铁硼优质永磁材料以来，我国几个单位于 1984 年初也先后研制成功。目前国内已有少数几家工厂开始小批量试生产。现在生

表 1 稀土矿石中稀土元素含量

	氟碳钕镨	独居石
La ₂ O ₃	32.0	23.0
CeO ₂	49.0	45.5
Pr ₆ O ₁₁	4.4	5.0
Nd ₂ O ₃	13.5	18.0
Sm ₂ O ₃	0.5	3.5
Eu ₂ O ₃	0.1	0.1
Gd ₂ O ₃	0.3	1.8
Y ₂ O ₃	0.1	2.1
重稀土	0.1	1.0
总 和	100.0	100.0

产上遇到的问题是原料较贵。

生产 Nd-Fe-B 永磁材料用的主要原料是金属钕。在天然的稀土矿中各种稀土元素总是混合在一起的。表 1 给出世界上典型稀土矿石中各种稀土元素的含量。为获得纯金属钕，首先要分离出各种重稀土元素，然后再分离出 La, Ce 和 Pr 等轻稀土元素，工艺过程较复杂，因而最后得到的纯金属钕成本较高。

由表 1 可知，在天然的稀土矿中 La, Ce, Pr 和 Nd 四种轻稀土元素含量的总和占 90% 以上，其中尤其以 Ce 的含量最多，约占 45—50%。因此很自然得出一个结论：用含有 La, Ce, Pr 的 Nd 为原料生产第三代稀土永磁材料，可简化稀土元素的分离工艺，大幅度降低原材料的成本。

我们的实验结果指出，含 Pr 对磁性基本没影响，含 Ce、含 La 会使磁性变坏。但是，如果含 Ce 量小于 30%，含 La 量小于 10%，仍可做出性能中等的永磁材料。如果将这些实验结果用于工业生产，可能会产生较大的经济效益。

(毛廷德 刘英烈)