

物理学咬文嚼字之五十五

Imaginary Images

曹则贤

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

凡所有相皆是虚妄。

——《金刚经》

世事无相，相由心生。

——《无常经》

万象皆宾客。

——张孝祥《西江月·过洞庭》

摘要 物理学涉及各种 images，要凭借 imagination 为世界构造图像，且要运用各种 imaginary 的工具。虚数的虚对应的是虚像的像，虚像与虚数一样，未必不是 real 的。

这物理学是以人的感知为基础的。力学，不用说，来自推拉提举的生理感知。声学，当然是因为我们的耳朵能听到声音；电学好象与感觉无关，其实在电(化)学发展的早期，科学家们是用舌头作验电器的。光学，现在的 photonics, relativity 和 quantum optics 是关于光的学问，而经典的 optics 实际上是关于视觉的。当然，眼睛本身不足以完成视觉，就象皮肤和耳朵不能完成感觉和听觉一样，这些感官是通过神经连到大脑那里去的(类似数据线将探头连到计算机)，在那里完成了数据的加工处理并作出反馈的决策¹⁾。由此也就不难理解，当一门物理学分支从具体的感知现象开始发展到后来，也会有从初步的、外在的感觉到纯由大脑思维的过渡，就象热力学，从纯粹的冷暖感

知最后演化成了公理化的热力学、用外微分表示的热力学。这大约就是具象的到抽象的过程。

汉语的相、象和像，很大程度上用法是相通的。相(outlook)，指外貌、相貌，出现在照相机、相面等词汇中。象，类似英文的 phenomenon，出现在现象、天象、假象、赫赫可象、意象等词中。象，很抽象的哦。像，相貌相似之意，据说“然韩非之前只有象字，无像字，韩非以后小篆即作像”。画像，像章，不是强调它们也是 picture 或 image²⁾，而是强调其上的图形和真人相似度高，因此是画像。Image 作为动词是模仿、使相等的意思，这后一点严格对应中文的“像”。笔者在使用相、象、像这三个字时，有时会感到含糊。比如，到底是相片还是像片？好象还是好像？如

果我们记得这三个字的本意，应该知道是“相片”(和原物一点不像也是相片)和“好象(it seems)”。潘岳《寡妇赋》中的“上瞻兮遗象，下临兮泉壤”的遗象(impression)只能凭借想象力才能看到，而今人的遗像可能是一张实在的相片(photograph)。

英语物理文献中的 image，我们一般都是翻译成像的，而不管其相似度如何。设想存在函数 $f(x):D \rightarrow R$ ，对于定义域 D 中的一个对象 x 的集合，存在相应的值域 R 中的 $f(x)$ 构成的集合，后者是前者的 image。虽然函数 $f(x)$ 可以很轻松地把一个线段转换成振荡的波形或者圆或者更复杂的形象，两者没有任何相似度可言，但我们依然把 image 翻译成像。上述函数的定义也告诉了我们光学成像的原理——光学器件，不管多么复杂，不

1) 我们的先人认为思想是由心脏进行的，所以有心思、心想事成、痴心妄想、心有灵犀、心领神会等说法。这反映的是我们在解剖学、生理学方面的误解。——笔者注

2) 与 image 同源的一个不太常用的词是 imagery，是画像、塑像、雕像、偶像之类的总称，转义为形象化的描述、形象塑造，如 Shakespeare's plays were patterns of imagery (莎士比亚的剧本是形象塑造的典范)。——笔者注

过就是一个函数算子而已。这也让我们理解了为什么光学中有 eikonal equation³⁾。Eikonal, 来自希腊语 εἰκόν (icon), 就是 image。它是在研究波的传播时用到的一个非线性偏微分方程, 它提供了物理光学(波)同几何光学(射线)之间的联系。

像 (image) 与视觉有关, 因此一定是关于视觉的科学, 即 optics, 的主题。在中学物理中我们就学到了透镜的成像原理。根据透镜的几何以及物体放置的位置, 像可以是实像 (real image) 或者虚像 (virtual image) (图 1)。中文的“虚”像的说法, 可能引起误解。一张照片如果模糊了, 看不清楚了, 就称为“虚”了, 拍照时拿相机的手抖动了就会有这样的效果。但是, virtual image (虚像) 中的 virtual, 名词形式 virtue, 来自拉丁语 virtualis, 却是力量、长处意思。Virtual, “being such practically or in effect, although not in actual fact or name”, 是说可能实际上没有, 但却有能力产生这样的效果! 如果我们注意光学成像的示意图, 会发现虚像到光学器件之间的光线是不存在的(一般用虚线, dashed line, 表示), 它是由我们以某种方式“给补齐的”, 反映的是眼睛的工作模式。实像和虚像

的重要区别是, 如果你拿一个感光板放在实像的位置上, 感光板上会得到一个图像; 而在你认为有虚像的地方放置一个感光板(如图 1 之中图的 $A'B'$ 处), 它可能就不会被感光⁴⁾。

图 1 中的成像原理, 是考虑了人眼的工作方式才琢磨出来的。它不单是透镜的成像原理, 还必须计入眼睛的工作方式, 严格说来是眼睛+大脑的工作方式。大脑负责图像的诠释, 所谓的虚像就是大脑工作习惯得出的结论(大脑把某种方式进入眼睛的光归结为来自某处的一个物体。如果我们从物体的后方看立在一个凸反射镜前的物体, 则会同时看到物体和物体的虚像)。如果我们直接用记录单元(像素)在一个平面内排列的 CCD 替换人眼, 在人眼看到虚像的情形下还能得到那样的图像吗? 我们用单反相机能拍到透镜系统成的虚像, 恰是因为我们用凸透镜模拟了人的眼球, 照相底片(或半导体记录元件)模拟了我们的视网膜, 才得到的结果。

像的生成的最后一步, 是大脑的诠释。光线通过眼睛(透镜)到达视网膜, 激发神经元产生信号, 信号传入大脑在那里被诠释, 这才有图像。如果比较不同的环节, 会发现最后这个诠释的过

程, 就决定最终看到什么图像来说, 其重要性可能超过前面光路中发生的其它物理事件。佛家所谓“相由心生, 境随心转”还真是触及到了成像的本质。实像哪里有真实的成份了? 虚像一点也不更不真实——在我们的视网膜上都成实像。其实, 认识的器官、认识的能力以及认识的模式是同时进化而来的⁵⁾! 我们看到一幅什么样的图像, 不仅依赖于物理的光路, 还依赖于眼睛对光的选择和大脑中的图像构建过程(这一点和人的意愿、知识、经验都有关)。实际上, 在用光电子设备构建图像的时候已经遇到类似的问题了。只将图像向自己有利的方向诠释是不恰当的, 甚至是不道德的。

像是否真的反映了真实呢? 像 (image) 与实在 (reality) 的关系, 长期以来都是哲学上的热门话题, 也是物理学不容回避的问题。似乎东西方文明对“像”的实质都有不同深度的认识。佛经中强调“相由心生, 境随心转”, 而在一幅敦煌壁画中出现的“像犹镜幻”四字, 也颇堪玩味(图 2)。在成像的过程中, 大脑的诠释作用依赖于观察的角度、观察者的精神状态、观察者的知识积累以及其它一些因素, 因此人们难免会产生像乃幻觉的印象。

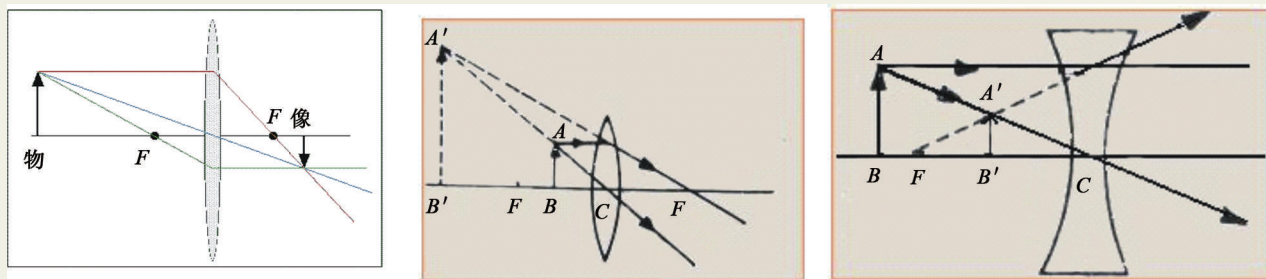


图 1 透镜的成像原理。左图: 凸透镜, 物在焦距外; 中图: 凸透镜, 物在焦距内; 右: 凹透镜, 物在焦距外

3) 汉译程函方程, 很不妥。——笔者注

4) 可能会被物体向后发射的光、透镜反射的光等杂散光给曝光了, 但不会有物体的像。——笔者注

5) 把光学、眼科学、图像识辨、生物学等内容融合到一起建立真正的认知科学, 也该开始了。——笔者注



图2 据说是敦煌壁画。图中一个其貌不扬的人在镜子中看到了一个明显拔高了的形象

一幅画，如果把它表述成能发射不同波长成分的、不同强度的光点的集合，它是客观的。然而，眼睛会看到不同的东西。人类早就认识到了这一点，有人就专门研究 optical illusion (视觉幻觉)。在图3的左图中能看到一只青蛙，而右图中能看到一匹马的头。然而，这是同一幅画，只是这里粘贴的角度不同而已。

人脑在成像中的作用，甚至是强制性的，这可以从对阴影(少光或者无光)的诠释中看出。我们能看见一个黑色的物体，是因为没有看到它，我们是将有光的部分当成背景才构造出图像的。也就是说，一张图片中分有光(光学器件只对光起作用)和无光的部分⁶⁾，何者成为构图的元素，得由大脑说了算(图4)。

大脑在诠释一幅图像的过程中是非常主动的。看一张人有两对眼的PS图片，因为我们的大脑已经建立了人只有两只眼睛的信念，因此它

对这张人有两对眼睛的图片非常不习惯。大脑命令眼睛调节看这张图片的方式，努力要得出图片中人其实只有两只眼的效果——这个过程能把意志薄弱的人给逼疯了。勒庞说：“What the observer then sees is no longer the object itself, but the images evoked in his mind (观察者此时

看到的不是物本身，而是思维中激发出的像)¹¹⁾”，信矣哉。图5中，简单地因为旁边的一摊水渍，我们的视觉系统就告诉我们这个人是在浮在空中的。你告诉自己这不是真的，但是再看一眼，我们的视觉还是告诉我们这个人是在浮在空中的。有什么辙吗？大脑诠释图像的能力还取决于其工作的历史。

Once we have entertained an image, it is always potentially present to our gaze(一旦我们拥有了一个图像，它就有可能总会出现我们的视野中)，相信从事各类物理实验研究的人都懂得这句话。那么，关于那个我们不理解的宇宙深空的那些经过很多我们根本不理解的过程才得到的照片，该存在多少认识上的陷阱？

认识到像 (image) 可能是心生的，依赖于我们的 imagination(想象力)，我们就愿意对世界作 real 与 imaginary 的区别。一个极端的例子是我们把数分成 real number 和 imaginary number。物理或者数学知识稍微有点进阶的话，就难免会遇到 imaginary number (虚数)。单位虚数表为 i ，即是取 imaginary 这个词的首字母。单位虚数有性质 $i \cdot i = -1$ ，或者写成 $i = \sqrt{-1}$ ，于是有人就认定 i 是为了表达负数的平方根才引入的。实际上并不是这样，虚数是在研究一元三次代数方程(cubic equation)才被引入的¹²⁾。有人可能会说，是作为平方



图3 本图中的左幅和右幅是同一幅画，我们只是从不同的角度观察而已(请将头歪30°再看)

6) 占据的部分和留空的部分，都是构型的元素。这一点，用兵者不可不知！《孙子兵法》中有《虚实篇》，李筌注：“善用兵者，以虚为实；善破敌者，以实为虚”。又，“形兵之极，至于无形”。这些用兵的道理，不妨和光学原理一起参详。——笔者注

根引入的还是作为 cubic equation 根的表达需要才引入的, i 还是那个 i , 又有什么区别了? 哈, let me tell you, 一个概念的性质跟它出现的历史/语境, 或者反过来说, 是绝对有关的。

虚数 i 的引入, 以及同实数结成复数, 给数学和物理学带来了不知多少次革命。欧拉给出了 $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$ (图 6), 并证明了 $e^{i\pi} + 1 = 0$, 这是人类智慧的最高形式, 是最美的数学公式。一个简单的公式里就包含了 0, 1, e , i , 和 π 这五个最基本的数。如果你仔细看, 还会发现它包含太多的代数学基本内容。看看这个公式, 你会由衷地赞叹欧拉这种人太聪明了——他是应该归于神界的人。

复数 $z = x + iy$, 这个奇异的 real 同 imaginary 的组合, 让一切变得 complex 起来, 也因此变得简单起来。比如数论中有个定理, 一对自然数平方和与另一对自然数平方和之积, 一定也是一对自然数的平方和, 从复数的角度来看, 它简直就是显而易见的。复数对物理进步的促进怎么评价都不为过。波动行为、电磁学问题, 都因复数的引入变得好解起来。研究传热学引入的傅立叶变换, 变换的核心是

复函数 e^{ikx} , 它将数学和物理学托起入云端。量子力学、传热量、固体物理、量子场论、CT 扫描、晶体衍射和图像处理, 如此等等, 它们的一个共同关键词是什么? 傅立叶变换, 建立在复变换基础上的特殊变换。

实数和虚数, 在物理学中到底意味着革命性的变化还是表现出某种同一性, 似乎一言难尽。比方说, 如果距离表示 $ds^2 = \sum_i g_i dx_i^2$ 中的 $g_i \equiv 1$, 我们谈论的是黎曼流型, 而如果某些 $g_i = -1$, 说明 $ds^2 = \sum_{i=1,q} dx_i^2 + \sum_{j=1,p} (idx_j)^2$, 则谈论的是赝黎曼流型。狭义相对论中的时空距离就是 $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + (icdt)^2$ (注意 $icdt!$ ⁷⁾, 因此那里的几何是赝黎曼流型上的几何, 它和经典力学中的黎曼流型上的几何完全不一样。但是, 从另一方面来看, 以方程 $\psi_t = \varepsilon \psi_{xx}$ 为例, 当 $\varepsilon = D$ 时, 这是经典的扩散方程; 当 $\varepsilon = i\hbar/2m$ 时, 这是量子力学中的薛定谔方程。这两者之间是可类比的。比如对扩散方程来说, 若对于 $t_1 \leq t \leq t_2$, $\psi(x, t_1)$ 和 $\psi(x, t_2)$ 是已知的, 则通解 $\psi(x, t) \propto \psi(x, t_1)\psi(x, t_2)$, 这和量子力学的几率诠释所用到的 $\psi^* \psi$ 有惊人的

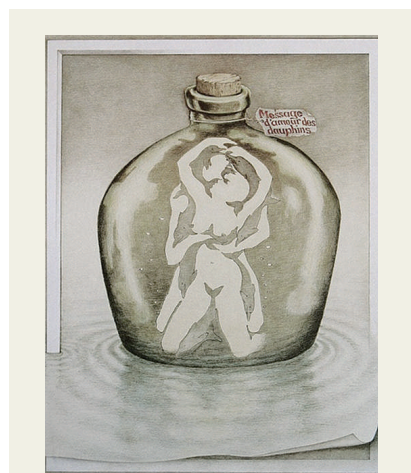


图 4 海豚的爱之消息(纸片上的字)。据说心灵纯洁的人看到的是一群海豚。你在瓶子上看到了什么?

相似。那么这个因为系数的虚与实所带来的差别, 如果我们愿意在更高一点的层面上看的话, 似乎更该看作是同一的, 至少是可类比的。

量子力学是建立在复函数的基础上的。关于虚的函数(imaginary function)如何反映 reality 的问题, 最近读到一句: “很难将建立于包含抽象的、多维空间中的虚函数的实在加以可视化。不过, 如果不试图给予虚函数以实的诠释, 就不会有困难”^[3]。笔者对这种鸵鸟政策不敢恭维, 不明白何以会不试图给虚函数以实的诠释。其实, 虚数本身就是实的, Imaginary number is real。在关于数系的数学知识中, 复数 $a + ib$ 不过是二元数 (a, b) , 它只是和单个的实数 a , 或者 b , 遵循不同的代数法则而已。纯虚数可表示为二元数 $(0, \alpha)$ 的形式, 满足加法 $(0, \alpha) + (0, \beta) = (0, \alpha + \beta)$ 和乘法 $(0, \alpha) * (0, \beta) = (-\alpha\beta, 0)$ 。这里乘法的本质可由单位虚数的定义 $i * i = -1$ 看出, 它表明 i 是一个操作, 连续操



图 5 这人是悬空的吗?

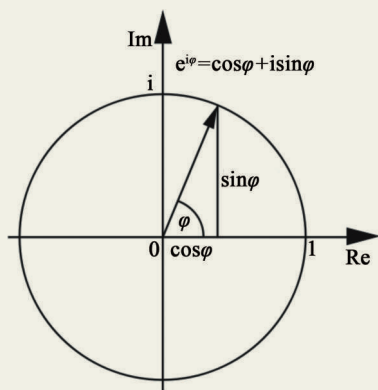


图 6 欧拉的伟大发现 $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$ 。从这个图你能看出这个函数多么适于描述振荡现象

7) 一般的狭义相对论的书不知所云, 就是因为作者不知道 $icdt$ 里面包含的几何代数的内容。

——笔者注

作两次得到一个“负的”效果(所以上式右侧是一个带符号的单位矩阵)。愚以为,这大概解释了为什么我们用 $e^{i\alpha}$ 表述波的时候,要用其模(乘法)来表示物理实在(振动强度或者量子力学中的概率分布)了,因为乘法能把虚部给带回到实部。

可是,我们真的就能够严格区分 image 和 reality 吗?小孩子亲吻镜子中的自己,对他来说 image is reality. 可见,理解什么是真实是一种需要学习得来的抽象能力。通过各种像,哪怕是幻象,来认识世界,是我们必须接受的选择: But if—like us—the beings in the simulated world could not gaze into their universe from the outside, there would be no reason for them to doubt their own pictures of reality (但是,如果在模拟世界里的智慧生物,如同我们一样,无法从外边来观察它们的宇宙,它们就没有理由怀疑它们的关于实在的图像)⁸⁾。就物理研究来说,人们也是热衷于制造各种图像或画面的,其对自己为世界构造的画像之迷恋,一点也不亚于因迷恋自己水中倒影以致落水而死的希腊青年 Narcissus⁹⁾(图 7)。There is no picture-or theory-independent concept of reality(就没有独立于图像或者理论的关于实在的概念),这句话一点都不过份。

关于实在性,人们可能会问,到底什么是 reality? 我们的宇宙是真实的吗? 愚以为,我们人的视觉,加上思维能力,是不足以理解这个世界的⁹⁾。怀疑客观世界的真实性,是老生常谈。最早可能是庄子,说有一次梦见蝴蝶,因此当他醒来的时候,不知道



图7 水边的青年 Narcissus 为水中自己的像而着迷

是梦见蝴蝶的庄子醒过来了,还是一只蝴蝶正在做梦梦见自己变成庄子。我不怀疑世界的真实性,但我怀疑我们认识的(我们能描述的、或者被告知的)那个世界的真实性。像量子力学中的动力学变量、状态函数等,它们是 reality 吗? 或者,那个看起来有点“经典的”动力学变量之本征值是 reality 吗? “In fact, quantum physicists tend not to be very clear about this issue⁵⁾”。谈论这个话题让人不自在。他们会采取实证主义的观点,拒绝考虑真实性的问题。不过也有更乐观的观点:某些情况下在不真实中有比真实中更多的真理(In certain cases there is more truth in the unreal than in the real)¹⁾。凭借我们的 imagination,去构造关于世界的 imaginary image,恰恰是理论物理的核心本质⁶⁾,未来我们还是要用这种方式去构造物理理论。当然, a crowd thinks in images, and the image itself immediately calls up a series of other images, having no

logical connection with the first(乌合之众用形象思考,一个形象马上招来一串形象,其和第一个形象之间一点逻辑关系也没有)¹⁾——也是理论物理最致命的弱点。就学物理来说,你只有学会了理解那些 imaginary things,你才踏上寻找 truth 的道路。中国教育是怎么死的? 其特征过程就是对孩子 imagination 的扼杀,以前是不允许,后来是用作业压得没时间。

一切的像,皆出自我心,因此其中必有自身人类的影子。上帝是人类理想的投射,是 imaginary image,是人能够想象的最完美的形象。在《神曲》之天堂篇的最后一行,但丁终于看到了神。他从三位一体(trinity)中看到了“nostra effige”,即英文的 our image——我们自身的影像。物理学中也处处有人的影子,道理也应如是。一个有趣的现象是,大部分人的爱情对象也只存在于自己的想象之中。我们心目中爱人的形象,不过是自我麻醉时的想象,是相互爱恋时的

8) 落水的青年 Narcissus 化成了水仙花,所以 narcissum 在西语中是水仙花的意思,比喻特别自恋的男子。——笔者注

9) 照头打一棍,就可以看到金鼠乱冒的世界。——笔者注

迭代效果。一旦一方绝情地离去，则由此显露出来的现实的残酷常常足以把心扉脆弱者击垮。他们所爱的并不是现实中的他，而是想象中的他，这两者当然是有差异的。适应和接受这种差异的，认命，婚姻就能继续；否则就只有分手。

Reality 到底是怎样的，物理学家们感到含糊。艺术家们对自己能表达现实感到信心满满，或者也可能是信心严重不足，于是他们要追求超现实主义 (surrealism)，画 surreal pictures。Surreal，字面意思是 over, beyond reality。所谓的超现实主义，是一场现代文学艺术运动，试图表现或者诠释在梦中出现的下意识思维的产物，其特征是关于物质世界

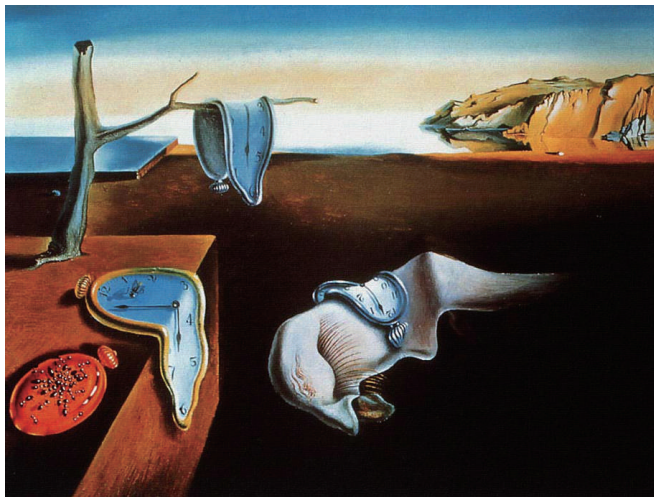


图 8 Salvador Dali 的画 The Persistence of Memory (1931)

的非理性的、荒诞的编排。达利的画《记忆的执著》(the persistence of memory) 算不算超现实主义的作品 (图 8)，笔者不懂。但是那画面，若

从时空扭曲的角度来看，可能是非常理性的，因此显得真实。说不定某个教授广义相对论的学者想这样超现实还求之不得呢。

参考文献

- [1] Le Bon G. The crowd: study of the popular mind. General Books, 2010
- [2] Dunham W. Journey through Genius. Wiley, 1990
- [3] Baggott J. The Quantum Story: a History in 40 Moments. Oxford University, 2011. p.76. 原句照录如下：“the wavefunction

of a system containing N particles depends on $3N$ position coordinates and is a function in a $3N$ -dimensional configuration space or ‘phase space’. It is difficult to visualize a reality comprising imaginary functions in an abstract, multi-dimensional space. No difficulty arises, however, if the imaginary functions are not to be given a

real interpretation.”

- [4] Hawking S, Mlodinow L. The Great Design. Bantam, 2012
- [5] Penrose R. The road to reality. Vintage Books, 2004. p.507
- [6] Vignale G. The beautiful invisible. Oxford University Press, 2011. 中译本: 至美无相. 曹则贤译. 中国科学技术大学出版社, 2013



ILOPE-2013[®]

www.ilope-expo.com

垂询电话: 010-8460 0344

中国光电周 暨

第十八届中国国际激光·光电子及 LED 光电显示产品展览会

北京·中国国际展览中心(三元桥) 2013年10月16日-18日

主办单位

中国国际贸易促进委员会
中国国际展览中心集团公司
中国光学光电子行业协会

承办单位

中国光学光电子行业协会
中展集团北京华港展览有限公司

支持单位

中国工业和信息化部
中国兵器工业集团公司
美国光电协会
德国光学、医疗精密设备协会

展品范围

激光与红外产品及设备
光电材料与元件

中国科技部
北京生产力促进中心
美国光学工程学会
财团法人光电科技工业协进会

中国科学院
北京光机产业基地
日本光产业技术振兴会
北京市市政工程总公司(集团)

光电显示及照明
光学元件与材料

中国物理学会
中国图形图像学学会
韩国光产业振兴会

LED & OLED & FPD
光通讯设备