

物理学咬文嚼字之七十七 黑、暗的物理学

曹则贤[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2016-05-29收到

† email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160609

善黑者有光……

——李宗吾《厚黑学》

黑，真黑！

——小品《打工奇遇》

摘要 光与黑暗都是物理学的主题。黑体辐射、黑洞、超黑材料、暗电流、暗场像、暗物质、暗能量与暗光子等诸多概念让物理学的天空一片黑暗。

1 引言

人类自身的智识从一团混沌中渐渐萌生，于是人们很早就怀疑这天地也是诞生于混沌中。这样说，是有各种古文明的记忆作支撑的。《幼学琼林》的“混沌初开，乾坤始奠。气之轻清上浮者为天，气之重浊下凝者为地”，可视作动态宇宙模型之发轫。混沌，英文为chaos，来自希腊文Χάος。根据希腊神话，Χάος是原初的存在物¹⁾，自其中产生了Erebus(darkness)和Nyx(night)。当然了，天地剖分，中间还必须要光。《圣经》开篇第一句“The earth was formless and void, and darkness was over the sur-

face of the deep, and the Spirit of God was moving over the surface of the waters. Then God said, ‘Let there be light’; and there was light. God saw that the light was good; and God separated the light from the darkness…”，直言混沌初开时即将黑暗与光明分开了。在古埃及壁画里，莲花的形象是“下黑上白”，也是寓意宇宙由黑暗转为光亮。可见，在古代人的心目中，清与浊抑或黑暗与光明的分割，是宇宙创生时必然经历的过程²⁾。

这个世界最神奇的地方，是有光。光是物理学最重要的主题，光也是物理学所借重的最基本手段。可惜的是，我们对光的认识还仅仅处在初级阶段，还没有建立起系统

的theory of light；在中文语境中，我们的光学还是对应英文的optics³⁾。没有光的地方是黑暗的天。黑暗，黑和暗很多时候是分开来用的，有细微的区别。暗指(整体环境的)无光或者光线很弱，如暗夜、暗室，暗之对立面为明；而黑指具体对象因极度缺少光线造成的颜色或者外观，如黑箱、黑幕等，黑之对立面为白。在英(德)文中，暗对应dark(dunkel)，黑对应black(schwarz)，其间分别约与汉语同。物理学中充斥着大量涉黑涉暗的概念和问题，如黑体辐射(black body radiation)、黑洞(black hole)，黑色材料、奥伯斯佯谬(dark night sky paradox)、暗电流(dark current)、暗场像(dark field image)、暗物质

1) 中文说混沌初开时，清气上升，浊气下降。有趣的是，西文中的chaos和gas是同源词。——笔者注

2) 古文明中所谓的宇宙创生，实际所指都是远古时期地面上发生的事情，比如见于各文明传说中的大洪水。所谓黑暗与光明的分离，我觉得它反映的是人类逐渐开启心智的过程。人类对自身有了智识之前世界的记忆是一片昏暗，小孩子对自己记事之前世界的图像也是一片昏暗。——笔者注

3) Optics，其希腊语词源为ὀπτικός(眼睛的、视觉的)或者ὀπτική(外观)，见optic nerve(视神经)，ophthalmology(眼科)。——笔者注

(dark matter)、暗能量 (dark energy)、暗光子 (dark photon), 等等。

2 黑色与超黑材料

一个物体对我们来说是黑的, 只是指来自它的光不足以或者不能引起我们的视觉。这有两个原因: 1) 来自它的光太少, 黑夜中一切不发光的物体都黑乎乎的。此时的黑和暗同义; 2) 来自它的光不在我们眼睛的工作波长范围内。关于后者, 一般认为人眼的工作波长范围在 390~780 nm 之间, 此波长范围内的光能让我们产生视觉, 因此被称为可见光 (visible light)。其实, 不同动物的可见光范围都差不多, 因为这是由眼睛工作方式⁴⁾的物理学所决定的。光要在视网膜上产生光电效应, 所需光子能量约为 1.5 eV, 这大约对应 800 nm 的波长; 若光子的能量大于 3.0 eV, 这大约对应 400 nm 的波长, 则这样的光子能轻松打断

我们皮肤中 H, C, O, N 等原子之间的化学键, 造成损伤。可见光波长范围两侧的光造成的视觉效果是黑, 常说的可见光谱带, 其两侧的颜色就是黑的 (图 1)。其实, 对短波长一侧的光, 我们就不该试图用眼睛看它, 正确的策略是躲远点⁵⁾。在可见光照射环境下我们能看见一个黑的物体, 是因为我们没看见它——是同可见的明亮背景之间的衬度让我们的大脑解读为看见了它。

对于普通的物体, 如何在可见光照射环境下看起来为黑色呢? 这要求它不发射、不透过、不反射可见光。不透可见光意味着材料对可见光有强烈的吸收, 则材料的能隙要小于 1.5 eV。比如硅材料, 其 1.12 eV 的能隙对应红外光, 对可见光硅具有较强的吸收, 则仅从透光的角度来说, 硅是黑的。石墨的带隙约为 -0.04 eV, 对红外光是全面地强烈吸收, 因此它更黑。但是, 仅考虑吸收是不够的, 光的吸收和

反射是同步的过程。石墨晶体对可见光有强烈的反射, 高品质的石墨晶体有金属光泽 (图 2)。如要把窄带隙材料黑化, 就要求将其表面无序化、粗糙化。近年来关于超黑材料 (super black materials) 的研究取得了巨大进展, 所获得的超黑材料对可见光的反射率几乎为零, 其黑色艳得邪恶 (图 2)。

超黑材料的出现, 对旧有的光学也带来了挑战。一个例子是, 对于经典的双缝干涉、单缝衍射等实验, 因为所谓的理论解释是仅将透光的狭缝或圆孔当作新的波源 (惠更斯原理), 我们也许会认为环绕狭缝或者孔的材料应该是绝对不透光的, 可以理想化为黑物质。但是, 有实验表明, 通过超黑材料中的圆孔未能获得常规的单缝衍射圆环状花样 (图 3)。也许超黑材料意味着某种新光学, 或者说会带来对原有光学知识的修正。期待未来的深入研究会为我们带来对光学更深入的认识。

3 黑体辐射与黑洞

对物理学有重大影响的黑概念要数黑体辐射。所谓的黑体, 是一个理想的物理对象, 它能完全吸收从任何方向射来的任何频率的光 (不限于可见光)。黑体辐射问题指黑体同环境处于热平衡 (因此具有温度) 时, 其辐射能量密度随频率或者波长的分布。对这个问题的研究导致了光能量量子的概念从而开启了量子力学时代⁶⁾。笔者在学习黑体辐射时, 脑子里一直有一块黑乎乎的物体在光芒环绕的环境中发光的形

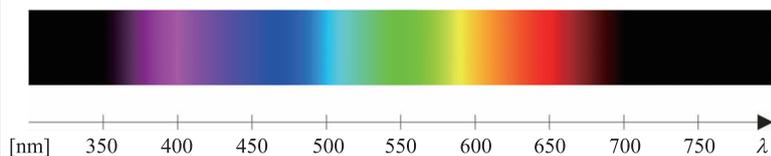


图 1 可见光范围之外的光, 其视觉效果是黑色



图 2 体验不同的黑。左图: 黑色但反光的石墨晶体; 右图: 恐怖的超黑材料

4) 有的蛇会采取两种方式获得视觉功能。除了有一对类似人类眼睛那样的眼睛以外, 它在眼睛前面有一对凹窝, 是接收红外辐射的, 工作原理应该类似人类的夜视仪。——笔者注

5) 在可见光范围内的光若是太强了, 眼睛也会主动地进入保护模式——它先闭合瞳孔, 实在不行就阖上眼睑。——笔者注

象。实际情况是，黑体辐射是指内壁为黑体的腔体处于热平衡时，腔内电磁辐射的谱分布。黑体辐射的德语原文为Hohlraumstrahlung，字面为空腔辐射，就没黑体的事。黑体辐射问题源自对电灯泡和炼钢炉内发光谱与温度关系的研究，愚以为更可能的模型是北欧人熟悉的壁炉——模型化后的测量对象为内壁黑乎乎、有一个漏光小洞的空腔(cavity with a hole)。黑体的对立面为白体(white body)，是能将任何频率的入射光都完全地、均匀地反射到所有方向上的物体⁶⁾。用白体物质作为内壁的腔体，可以用于对发光积分强度的测量——经过足够多次的反射，发光体向各个方向发出的光最终都会落入探测器中。

与黑体字面上可比拟的概念是黑洞(black hole)。黑洞是个宇宙学概念，假设光的路线是广义相对论时空中的测地线，则大质量物体附近的弯曲时空可能使得所有飞向黑洞的光子终结于该物体，或者自该物体发出的光不能够逃离。至于黑洞内是否有发光的过程，或者终结于黑洞的光是否被吸收了，那就不知道了。有人说黑洞是个热力学的黑盒子，还有所谓黑洞有毛无毛的讨论，但黑洞作为用广义相对论捏合到一起的引力与电磁学的对象，其上是如何体现热力学与电磁学和经典力学的概念自洽的，笔者不懂，此处不论！

4 奥伯斯佯谬——天空为什么是暗的

人类的光明与黑暗交替的体验

6) 物理学上还有白噪声的说法，指强度与频率成反比的连续谱信号，其类比的是白光，因为白光粗略地可看作是包含各种频率的可见光。——笔者注

7) Only when a system was able to sustain sufficiently well-developed dynamical processes that can go through the dark night with the absence of sunlight, could it be in a sense a form of life. ——笔者注

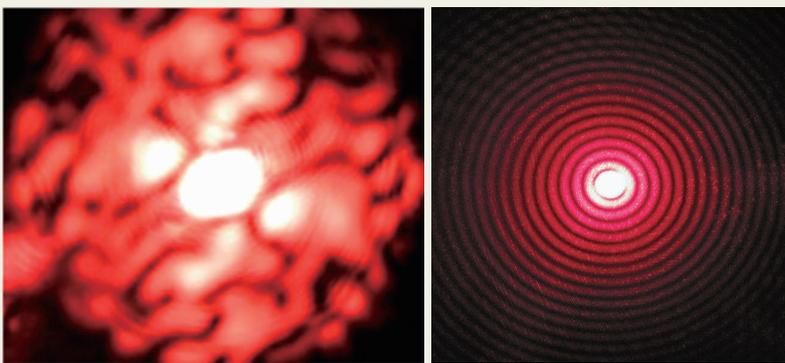


图3 利用超黑材料中的圆孔获得的衍射光斑(左)，未能表现出用常规材料得到的圆环花样(图片来自互联网)

来自太阳的起起落落。每天太阳出来以后，大地上一片光明；日落了，大地的统治者就变成了黑暗。一日之间的明暗交替是地球上的常态，人类顺着天地合一的路子也就养成了日出而作日落而息的习惯。我总觉得，日出而作日落而息可能是动物身上保持的植物甚至更低级生命的习惯。那些夜行的动物估计是革命者，叛逆出了新的行为方式，它们一定出现得很晚，且源于艰难环境下的另辟蹊径。低等生命体内过程的动力源泉是阳光，等到夜间，原初动力源关闭，低等生命体内的过程就只剩下靠化学能够驱动的过程，大部分的过程自然就歇息了。往远了说，光照作为原初的动力源泉在各种物质中都会引起过程，只有因为光照引起的激发态在光照停止时仍能维持一些复杂过程从而渡过慢慢长夜，这样的体系才算是有生命的，这或许才是生命的物理学定义⁷⁾。不说了，扯远了。

我们习惯了日出日落带来的明暗交替，可偏偏某一天我们的天文学里面出了“天空为什么是黑的”

的奥伯斯佯谬，即所谓的“dark night sky paradox”。早在哥白尼时代，人们就注意到，若宇宙是静态的、无穷且大尺度上均匀的、含有无穷多恒星的宇宙，则从地球上看过去的任何视线都会终结于某个恒星，天空应该总是亮的才对。这和我们所处的昼夜交替的现实有矛盾，于是就有了用德国天文爱好者Heinrich Wilhelm Olbers命名的悖论。估计我们经历昼夜交替的现实应该不会错得离谱，比较而言应该是那个关于宇宙结构的假设不那么正确。诗人爱伦坡就建议将宇宙模型中的宇宙修改为有限大小的；进一步地，由于宇宙年龄和光速的有限性，地球可见的空间内只有有限多的恒星，其给我们送来的光和我们自家的太阳相比是远远不够的。其实，关于宇宙模型，均匀性也是个含混的词，均匀性的尺度是多少？如果宇宙均匀性的尺度远大于太阳系，则我们头顶上有个太阳这件事就是宇宙中的偶然。我们的暗夜本身就提供了许多关于宇宙模型应该如何正确的暗示。

5 暗概念系列

在物理学中，暗(dark)一般指光的缺少，暗+名词构成的概念基本上完全可以按照“暗室”的模式来理解。比如暗电流(dark current)，指CCD等感光器件在完全没有光照的情形下仍有一些小的电流。暗电流来自耗尽层中随机产生的电子或者空穴，构成感光器件的背景噪声。又比如暗场像(dark field image)，是如下成像方式的结果：未经散射的光(电子)束被排除在成像机制之外，这样样品周边场地(field)一般来说在图像上就是暗的。暗场像的对立面是明场像(bright field image)。这些场合涉及到的暗，如同开尔文爵士的“物理学上空的两朵乌云(two dark clouds over physics)”，还是不同程度地允许光线露面的。

在宇宙学中出现的暗概念，“暗”不是说那里光线的强度弱到无，而是说那是同电磁相互作用不相关的概念。暗物质(dark matter)，与luminous matter(亮物质)相对，其既不发光也不同电磁辐射相互作用，因此是暗的。暗物质的概念源于天文学或者宇宙学的观察。1922年荷兰天文学家Jacobus Kapteyn率先提出了暗物质的概念，1933年瑞士天文学家Fritz Zwicky将virial theorem⁸⁾应用于后发座星系团时认为应该存在不可见的质量，即所谓的dunkle Mater(德语，暗物质)。Zwicky用星系边缘的速度估算其质量并同基于星系数量和亮度(不可靠!)估算所得的质量相比较，结论

是星系团的质量应该是其可见部分质量的400倍。暗物质的概念似乎已为宇宙学界所接受，从引力透镜、宇宙大尺度结构、暗物质对宇宙微波辐射背景的影响等诸多天文学研究对象得到了佐证。但是，这些所谓的证据本质上还是比较基于大尺度的动力学和广义相对论所得的质量同可观测物质的质量估计，其基本前提都是观测准确和广义相对论正确。不过考虑到我们在实验室里分析个样品的组分和做个发光谱测量都十分地不靠谱，再考察一下爱因斯坦自弱场近似得到引力场方程的过程，以及用以描述时空曲率的几何也是黎曼所作的近似之一，笔者实在对所谓宇宙大尺度测量配合广义相对论所得的结论没有丁点儿信心。

当前被认为是暗物质候选者的是所谓的只参与引力和弱相互作用的大质量弱相互作用粒子(WIMP)。世界范围内许多机构都在试图探测WIMP的存在，所用的关键物质为液氙。一台探测器对液氙的需求从当初的几十公斤到了如今的3.5吨。在扬言最终成功需要50吨量级液氙的时候，人们终于对这种研究模式发出了疑问，2016年*Science*杂志遂有了“暗物质探测到了生死关头”一文^[2]。这种需要装载更多液氙的探测器的研究同需要更大能量的加速器的研究如出一辙，都是瞄着一个含混的目标却对具体做什么、如何做不甚了了。当我们想看到什么的时候，关于那东西的存在性或者关于如何看那东西的理论与设施(研究设施需要有正确的工作原理)至少应该有一样是靠谱的。仅凭

假设粒子的伟大意义而无视物理学的严肃性，in a sense both theoretical and experimental，这种研究方式不足取。任何人都没有绑架社会去验证自己的极端聪明或者极端愚蠢的权利，哪怕是以科学和人类进步的名义。别说纯属假设的WIMP或者超对称理论所要求的新粒子，就是明晃晃的、真实的光谱线，在我们有正确的理论武装自己之前它也未必就是visible的！没有巴尔莫老师的谱线公式，氢原子第五条可见光范围内的谱线就没被看见^[1]——不是眼睛或者仪器不行，是大脑不行。

比暗物质也许更加不易理解的是暗能量的说法，暗能量是为了解释宇宙加速膨胀而引入的，同样是基于那个可以任意打扮的爱因斯坦场方程。有趣的是，在物理学中，能量从来都不是和物质在同一个层面上的概念。把暗能量当作同暗物质(至少字面上)同一层面的独立存在，是对物理学根基的严重挑战。此概念的拥趸有必要给物理学一个解释。目前研究者提供的暗能量载体包括“such as quintessence or moduli”，不过quintessence(拉丁语，第五种存在)和moduli(模式，数学概念?)更让人如坠五里雾中。按照Wiki暗能量词条的说法，“many things about the nature of dark energy remain matters of speculation”。如果一个概念有很多内容都是揣测，真看不出有认真对待的必要。至少就笔者所知的宇宙学必谈论起的广义相对论，其创立者爱因斯坦就没有把理论建立在那么多揣测上的习惯——爱因斯坦的经典物

8) The virial theorem, 汉译维里定理会让人误以为virial是人名。Virial, 拉丁语“力的”意思。Virial theorem 关切的对象是 $\vec{p}\vec{r}$ 。愚以为物理学界关于这个量的认识是含混的，有必要将之同角动量联系在一起使用几何代数的概念加以讨论。——笔者注

理功底是格外扎实的。成就爱因斯坦在物理学史上伟大地位的，是关于布朗运动(涨落在统计物理中的重要性)、质能方程(原子核到夸克物理的概念基础)、光电效应诠释(光能量量子概念的确立)、受激辐射(激光的概念基础)、玻色—爱因斯坦统计、氢与金刚石的比热(零点能，固体量子论的建立)等方面的坚固成果，而非引力场方程中随意增减的宇宙常数项或者那个在构造引力场方程时塞入又用弱场近似重新拎出来的引力波方程。

比暗物质、暗能量更惊悚的暗概念是暗电磁学(dark electromagnetism)中的暗光子。2008年，有人设想存在一种作为暗物质之电磁力传递者的暗光子，而暗物质的电磁场是一种新的长程U(1)规范场，此场只和暗物质而不会和标准模型耦合。那么，还有比暗电磁学的暗光子更惊悚的暗概念吗？有！小说家Robert J. Sawyer的大作*Starplex*为我们呈现了某种暗生物学(dark biology)——行星那么大块头的怪物们努力挤到一块形成有旋臂的星系⁹⁾，因为长成那样子看起来很美。这位小说家一不小心泄露了理论宇宙学和小说所共有的浓浓的文艺本质，前者经常用到看似高深但缺乏严谨性、不成体系的物理和数学知识，想必那不过是艺术品味的数理装饰罢了。

我无意让人们误解我是一个反对宇宙学的人。实际上，人类中把目光投向广袤的宇宙为我们诘问宇

宙本源的人，是最值得敬佩的一群人。托勒密、伽利略和开普勒，都是人类科学史上不朽的丰碑。然而，当前流行的把自己一知半解甚至完全不懂的物理学概念拿去凭借imagination & speculation编织科幻图像的宇宙学研究，笔者实在不敢恭维。物理学的一大特征是概念的自洽性和完整性(integrity of physics)，对单一概念的率意发挥常常会遭遇缺乏坚实性和有效性(soundness and validity)的困境。

6 黑暗的物理学

对于生活在地球上的人类来说，黑暗是一半时光里的统治力量。作为类比，关于这个宇宙的秘密更是隐藏在黑暗中，因此我们人类也就一直感叹自己生活在黑暗时代。人类学会用火，发明了文字，都源自摆脱黑暗之伟大尝试。自然与自然的定律隐藏在暗夜中，上帝说，“让牛顿来吧”，于是一片光明¹⁰⁾。物理学在黑暗中为人类开拓光明，物理学可以说是人类自我救赎的工具与成就。不管处在任何意义下的黑暗中，一个物理学家都没有先失去勇气的资格，因为他知道黑暗存在但不是世界的永恒主宰者，这个世界最神奇的地方就在于有光。光是自然秘密的泄露者，胸中有物理学者即见光明。

追求光明的物理学，说到底也不过是人类的实践活动，则物理学界在某些地方、某些时候是很黑

的，实在不值得惊讶。世界范围内物理学界的黑，竟让物理学界频现dark lady现象。Dark lady除了有肤色黑的女人、活在黑暗中的女人等意思外，它还指苦命的女人。Dark lady是文学作品中常出现的形象，莎士比亚就曾写过名为*dark lady*的十四行诗。物理学史上被用*dark lady*为题报道过的著名女科学家包括Ursula Keller(发展了*f-to-2f*法测量光学频率梳频偏)和Jocelyn Bell Burnell(发现脉冲星)，她们的成果都被以别的男性科学家获得诺贝尔奖的方式得到了承认¹¹⁾。这么说来，dark lady of science中的dark，大约对应“被人黑了”的意思。其实，科学界黑别人成果的事情比比皆是，能看懂本文的年轻科学家们不妨加点小心。不过，令人放心的是，任何黑暗时代里人类都不缺乏追求光明抗拒黑暗的愿望与良知。中华民族终将懂得，她若想得以体面地继续生存，掌握物理学并为之做出实质性的贡献恐怕是必须的。

黑洞藏不住量子力学的秘密，别的形式黑暗也不能阻挡住物理学前进的脚步。

参考文献

- [1] 曹则贤. 量子力学-少年版. 中国科学技术大学出版社, 2016
- [2] Cho A. Crunch time for dark matter hunt—Little confidence that biggest WIMP detector ever will find hypothesized particles. *Science*, 2016, 351: 1376

9) 这里译成奶状物而非星系也许更好一点。Galaxy来自希腊语的γαλα，奶。传说天后赫拉的奶水撒满天空，于是天上有了milky way。中国文化史上有把milky way译成“牛奶路”，以及拿“牛奶路”的译法嘲笑别人不识milky way乃是英文中的“银河”的趣闻，可见中国的文化人对文化向来是不太较真的。——笔者注

10) 英国诗人蒲柏(Alexander Pope)起草的牛顿碑文：Nature and Nature's laws lay hid in night. God said, "Let Newton be!" and all was light. ——笔者注

11) 生物学界的dark lady为Rosalind Franklin，是DNA螺旋结构的发现者。——笔者注