

光和感知

1 物理学中的光

光通常指的是人类眼睛可以见的电磁波，也称为光辐射，反馈到人眼就是我们可辨别的颜色。如图1所示，可见光只占总体电磁波中极小的一部分。实际上，只要物体的温度大于绝对零度都会向外辐射电磁波（德布罗意物质波、黑体辐射），而人能感受到的只有很小的一部分。

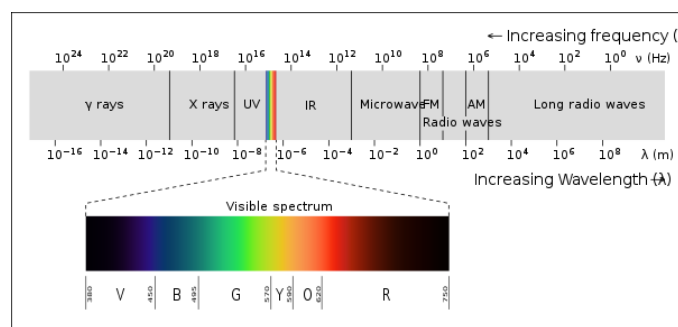


Figure 1: 可见光只是电磁波中极小的一部分

根据波尔的原子理论。原子吸收能量时，电子会移动到更高的轨道。这通常是用电完成的。当电流通过某种元素时，提供的能量将电子推离其正常能级，进入更高的能级，处于较高能级的电子是不稳定的，因此不会一直停留在较高的能级。电子回落到其原始能级，并在其下降时以电磁辐射的形式释放出特定量级的能量，这一辐射出的能量会以光速以电磁波的形式向无穷远处传播。当观察到氢发出的电磁波时，它看起来是紫色的。但是，当通过分光镜观察该光时，你不仅会看到一种颜色，还会看到红绿蓝紫四种颜色。当这四种颜色混合在一起时，它看起来是紫色的（后面会介绍这是由人类的视觉感知系统造成的）。图2说明了氢原子的能级变化，以及哪个跃迁引起了哪种类型的光。左侧的水平线代表不同的能级。红色箭头代表电子可以转化的能级方向，可见一种类型的跃迁只对应于一种频率的电磁波。

如前所述，光的颜色和电磁波的频率有关，而电磁波的频率又是由能量决定的。这两组物理量由普朗克常数 h 联系在一起，光的频率由 $\nu = \frac{E}{h}$ 计算得到，而电子的能量跃迁只能在离散的能级上发生，所以辐射出的电磁波的频率也只能有若干种状态，因此对于氢原子，我们只能观测到四种不同的光。由于电子回到稳定状态的时间很快，这里可以看到，电子从越高的能级跃迁下来，发的光越靠左，光的频率越高。生物能看到位于特定频率段的电磁波，可能与光在水中传

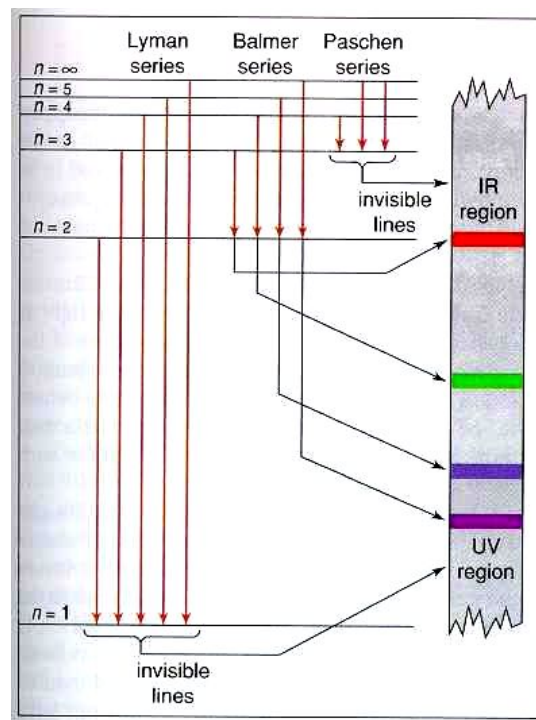


Figure 2: 氢电子辐射出的能量及其对应的可见光

播的特性有关 (图3)。地球的生物最早出现在海洋之中, 能够在水中感受到光线的生物想必拥有竞争优势, 我们的眼睛便是一步一步从海洋中的原始感官细胞进化而来。可见光的频率正好体现了这一段进化史。

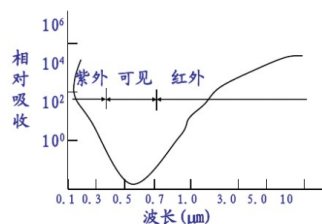


Figure 3: 光在水中的衰减, 可见光部分衰减最弱

地球上的大量电磁波从其本源来说都来自太阳, 太阳的内部在不停的进行核聚变, 四个氢原子经过反复的聚变成为了一个氦原子 (氢弹), 在聚变完成后, 生成元素的原子核质量小于参与反应前的, 有一部分质量变成了能量, 损失的质量聚集在原子核中, 这些能量会让原子核变为一种高能状态, 被称为“激发状态”。多余的能量是无法长久保存的, 于是这些能量就会以伽马射线 (频率/能量极高的光) 的形式辐射出去。这些辐射出的光子会使得太阳表面以及被太阳光照射的原子和电子处于激发状态, 由于激发状态不稳定, 原子和电子又会跃迁到较低的能级, 形成各种频率的光 (图4)。所以从太阳表面出来的光子含有的伽马射线非常少, 变成了各种频段都有的电磁波, 这些不同能量和频率电磁波可以说是由于太阳内部核聚变传导的多米诺骨牌, 伽马射线经过某些电子和原子使得他们处于激发态, 他们又从激发态掉落到较低的能级, 发出新的电磁波, 某种意义上来说, 阳光并非太阳发出的光, 而是我们身边的万事万物对太阳内部核聚变释放的伽马射线的累积反应的产物。

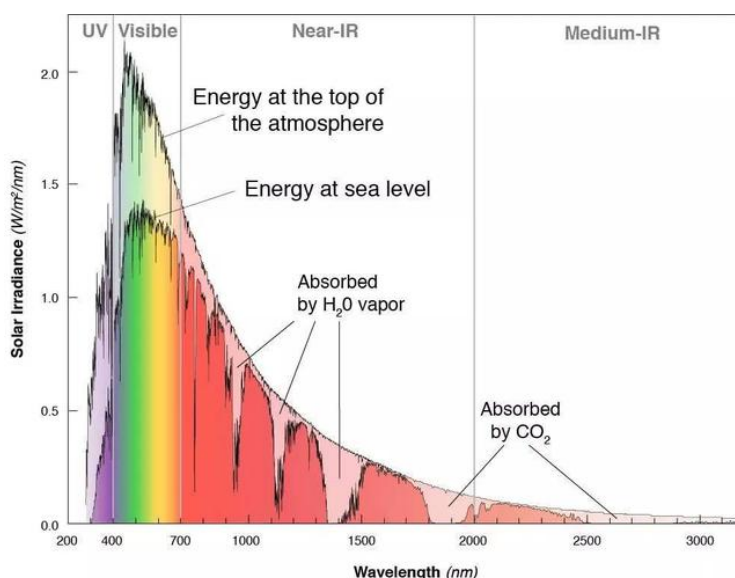


Figure 4: 被拆解的太阳光

我们除了可以感知颜色以外 (频率), 也可以感知到光的亮度和强度, 那么物理上什么是光的亮度呢?。光的亮度可以用光度学来衡量, 光度学只研究可见电磁波的度量, 是研究广义的电磁波辐射强度的辐射度量学的一个子集。已知辐射能量为 $E = \mu h$ 。辐射通量表示单位时间内通过某一面积的所有电磁辐射总能量, 有 $\Phi_e = \frac{dE}{dt}$ 。与辐射度量的单位相比较, 光度学度量单位的定义考虑人的视觉因素和光学特点, 是在人的视觉基础上建立起来的人眼只对波长为 380nm 到 780nm 的电磁波敏感, 且对不同波长的敏感程度不一样, 在波长为 555nm 的电磁波最为敏感, 以此为顶点, 往两边是递减的状态。这里, 所以要引入发光效率曲线的概念, 也称为视效函数, 如图5所示。CIE 定义了两条发光效率曲线, 紫色的是明视发光效率曲线, 用 $V(\mu)$ 表示, 估计白天人眼对可见光的反应; 红色的是暗视发光效率曲线, 用 $V'(\mu)$ 表示, 估计较暗环境下人眼

Spectral response of the human eye

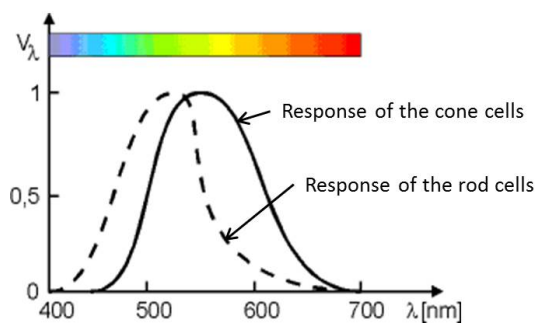


Figure 5: 视效函数 (横坐标是波长 (和频率是反比), 人体有两种感光细胞, 不同亮度下反应不同, 所以有两条曲线, 此处后续再介绍)

对可见光的反应。在这一个曲线中，对于非可见光给与的权重为 0，光通量可表示为

$$\Phi_v = K_{max} V \Phi_e, \quad (1)$$

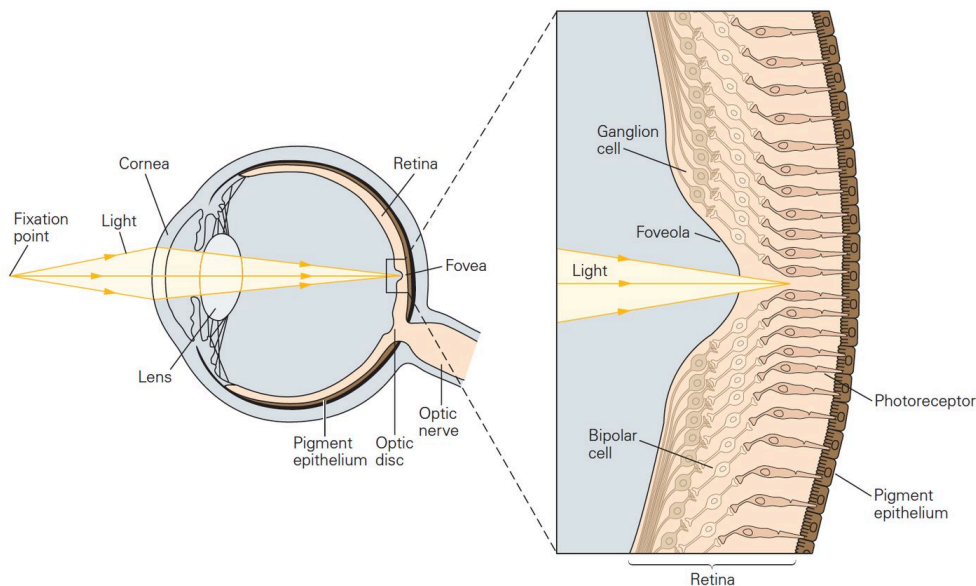
K_{max} 是一个常数，等于 683 lm/W ， lm 是光照的强度单位-流明。选择波长为 480 nm ，频率约为 620 THz 的蓝光，它的发光效率值为 0.138，那么功率 1 mW 蓝光产生的光通量为 $683 \times 0.138 \times 0.001 = 0.094254$ 。需要注意的是可见光是多种频率的可见光混合而成，那么光度量应该写成积分的形式

$$\Phi_v = K_{max} \int_{\mu_{min}}^{\mu_{max}} \Phi_e(\mu) V(\mu) d\mu. \quad (2)$$

进而也有照度的概念，照度是每单位面积所接收到的光通量，单位是勒克斯。照度可以表示为 $L = \frac{d\Phi_v}{\cos\theta dA}$ 。 θ 是光照和表面的夹角， A 是表面的面积。

2 人眼中的光

光进入眼睛再传入大脑的路径大体上经过如下的过程（图6），光线首先经过角膜（cornea）和晶状体（lens）的折射进入眼球，睫状肌（ciliary muscle）可控制后者的形状调整焦距。光线到达视网膜（retina）之后转化成电信号，经视神经（optic nerve）进入脑。



我们理解的五颜六色，实际上是大脑对光子触发的电信号逐层处理的结果。电信号在视网膜里的传导过程在时间上的先后顺序大致是三步：1. 光感细胞（photoreceptors）（结构见图7）。分杆细胞（rods）和锥细胞（cones）两种，杆细胞主要感受光的强度，负责夜视功能，而颜色主要由锥细胞产生；2. 双极细胞本层细胞接受来自光感细胞的电信号，不能产生动作电位。3. 神经节细胞，接受双极细胞的电信号，传入视神经。

杆细胞对弱光更敏感（能对单个光子产生反应），研究表明人能够对 3 到 7 个光子产生知觉。从信号转换的角度来看，杆细胞和锥细胞主要负责将光信号转化为电信号，视杆细胞与视锥细胞对光的响应程度虽然略有差异，但它们发生光响应的机制都是类似的。以视杆细胞上的视紫红质（rhodopsin）为例，它由一个细胞膜上的七次跨膜蛋白（视蛋白，opsin）和视黄醛（retinal）辅基组成。

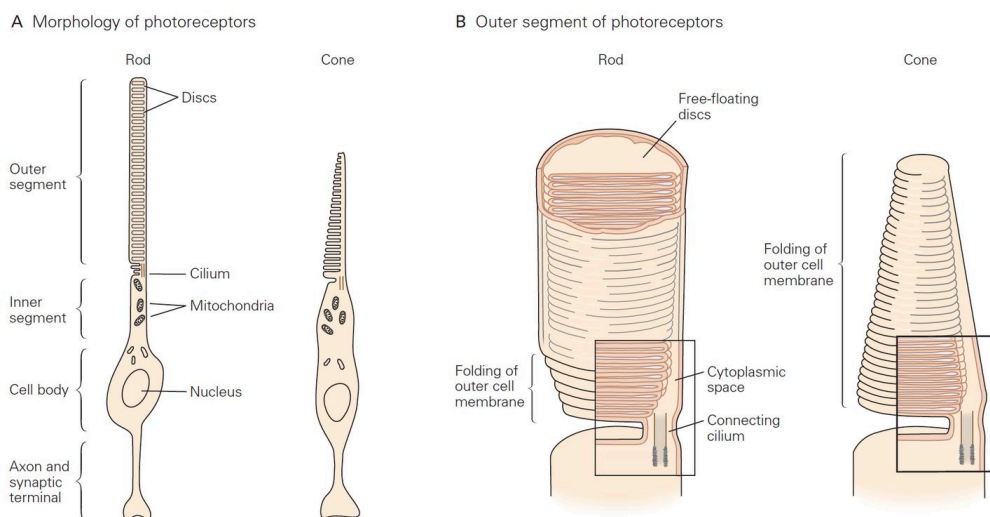


Figure 7: 杆细胞和锥细胞

从视觉的分子机制出发,视黄醛具有两种构型:全反式(All-trans)和11位顺式(11-cis),正常与视蛋白结合的是11位顺式构型(图8)。恰巧在可见光(对视紫红质而言是波长500 nm左右的电磁波)照射下,11位顺式构型可以转变为全反式构型,这一转变非常迅速,通常在 $10^{-12}s$ 内完成。尽管最初的转变时,视蛋白的形状不会有任何改变,但是在视紫红质中全反式构型很不稳定,以至于不能长时间保持。在十亿分之一秒内,蛋白质的形状会发生改变。最终,全反式构型分子会从蛋白质中排出,使得视紫红质产生一系列中间结构。从而启动信号传导,产生刺激大脑的神经信号,正是这样一种变化才导致某一波段的电磁波能被“看见”。

那么视黄醛的光敏异构反应是如何发生的呢?视黄醛中不同原子以共价键的形式连接,共价键的本质是原子间相互接近时轨道重叠(波函数叠加),原子间通过共用电子对使能量降低而成键。这些电子对在受到特定的光子刺激后,会被激发到高能级的非共价键状态,电子中多余的能量可以使11位顺式构型的共价分子可以旋转形成全反式构型。

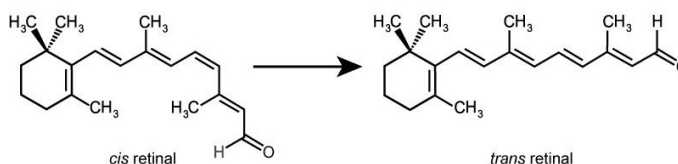


Figure 8: 视黄醛分子的光敏异构反应

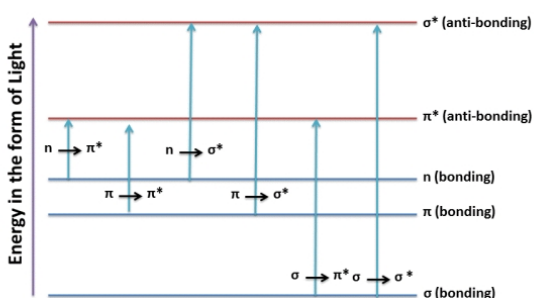


Figure 9: 在紫外可见光谱中吸收光能时,共价键电子的能级变化。

图9中给出了 π 共价键电子和 σ 共价键电子吸收光子后的跃迁状态, σ 共价键电子具有最低的能级,并且是最稳定的电子,需要大量能量才能跃迁。所以,它们通常只吸收紫外线这种高频率的光,并且这些跃迁是罕见的;而 π 共价键对于人类感受光线更为重要,它具有更高的能级,因此相对不稳定,更容易被更小的能量来激发,它主要负责可见光部分。

当分子接受到与分子内可能的电子跃迁之间的能量差相匹配的光能时,一部分光能将被分子吸收(电子跃迁)。每种共价键只能吸收特定能量的电磁波,这就使得不同分子结构对不同光谱有着不同的敏感度。人有三种视锥细胞,每种视锥细胞内部,都有不同的色素(不同的共价键结构)。所以它们对不同频率的光子敏感度不同,图10给出了不同锥细胞以及杆细胞对不同波长(频率)的电磁波的敏感度。一般来说,S-视锥细胞对波长

420nm 的光线最为敏感，M-视锥细胞 530nm 的波长最为敏感，而 L-视锥细胞对于 560nm 的波长最为敏感。此外，人类对于锥细胞形成的色彩丰富的信号的空间感更强，这是因为每个视锥细胞都连接到不同的神经纤维，因此大脑能够精确确定视觉刺激的位置。所以视锥细胞提供了非常清晰的视觉图像。然而，杆状细胞可能与多达 10,000 个其他杆状细胞共享神经纤维，大脑难以确定电信号究竟是哪一个视杆细胞提供的，所以在夜晚，人们的空间感就会差很多。

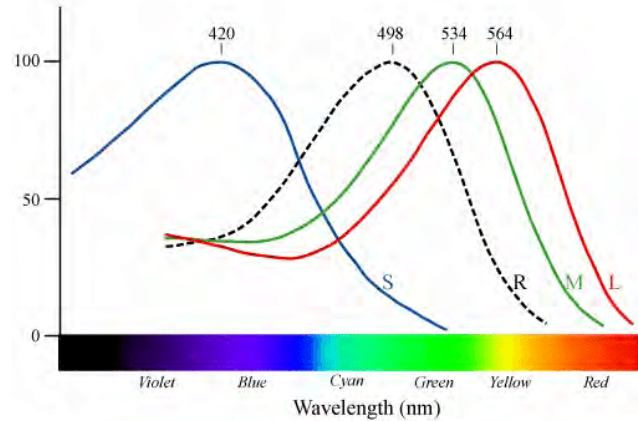


Figure 10: 不同锥细胞以及杆细胞的敏感度

另外值得注意的是人的视觉系统本身就是在不停调整，很难去对其量化分析，例如，当电影开始播放时我们进入黑暗的电影院时，就会发生所谓暗适应。起初，我们似乎看不到任何东西。但是很快，虹膜就会张开，让更多的光线进入视网膜。杆细胞也会发生我们感受不到的适应，在黑暗环境中度过的最初 20 到 25 分钟内，由于视杆中视紫红质的不再被光频繁刺激，它们更容易被再次激活，从而使视杆对光的敏感性提高了大约一百万倍！当我们的眼睛适应了黑暗之后，离开剧院后，我们会暂时失明，直到这一适应完成了逆过程，即光适应。在此过程的第一步，虹膜会迅速关闭，以减少进入眼睛的光量。接下来，在黑暗适应过程中发生的其他生物学变化也将被逆转，因此仅需几分钟，视力就可以适应晴天的明亮光线。一般来说，视锥细胞适应光的速度比视杆细胞适应黑暗的速度相对快一些。

图10实际并不能完全说是 rod 和 cone 对某种波长的光的敏感度，准确的说是科学家在某种条件下，采用特定波长的光照射单个 rod 和 cone 细胞，再利用显微分光光度计测出这些细胞（也就是它们内部的视黄醛）吸收了多少能量。人一共可以区分一千万种颜色，这些颜色对应的是我们的 cone 和 rod 在不同波长的光的照射下吸收能量的数量，那么这些吸收的能量又是怎么被我们的视觉系统测量出来的呢？本人查阅了一些资料，由于视黄醛的光敏异构反应触发的反应基本在 $10^{-12}s$ 内就完成了，现在还很难建立起波长和最原始的电信号之间的精确映射关系。当光子使得处于共价键的电子处于激发态后，视紫质的机械能会增加，增加的原理服从 Franck-Condon 原理（图11）。Franck-Condon 原理大体的意思为电子运动会比原子核快，所以光子对电子产生刺激之后，会造成分子获得振动能量，而 Franck-Condon 原理说明振动能量的强度和涉及到的两个振动态的波函数重叠部分成正比（不太懂量子力学，似乎从底层来看，视觉系统是一台 CH 共价键量子计算系统）。也有学者 [2] 利用纳米传感器对视紫质的振动频率进行了测量（图12），发现视紫质在 490nm 的波长下振动最明显，而在 530nm 波长下振动则不明显。

眼睛的出现实际也是进化的结果，具体过程大概是，最早能够进行光合作用的藻体（21 亿年前）产生了叶绿素和类胡萝卜素，这些元素的共价键也可以和可见光发生反应，它们最终将地球变成了今天的绿色。之后 5 亿年前的生命产生了眼点，这时的感光细胞只能感受到光线的强弱，但这一进步已经在生物躲避天敌的本领上迈出了重要一步。随着生物的演化，逐渐进化出了对感光细胞保护的结构。比如，同样是寒武纪的涡虫，在眼点的位置产生了一个凹陷，有数值计算表明只需要 35000 代的进化，生物就可以从眼点变化出保护的凹陷，一部分早期具有感光细胞的脊索动物和软体动物，选择用凹陷的方法保护感光细胞，随着凹陷越来越深，最终眼睛形成了前段有小孔的形状，另一部分三叶虫、奇虾、海蝎为首的节肢动物进化出了“复眼”，靠成千上万个小眼睛将不同角度的图像整合成一个完整的影像，随后脊椎动物发育出了眼球，并且眼球前段出现了可以变焦的晶状体，更重要的是出现了可以解析图像的视网膜，这种眼睛构造与现在人

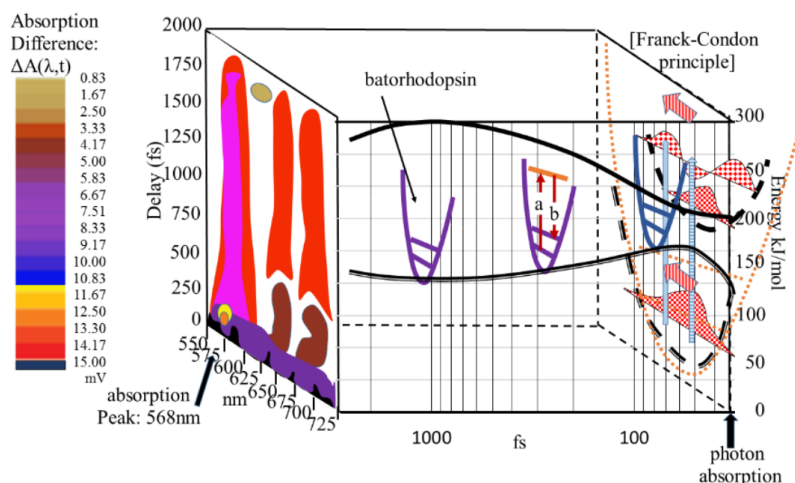


Figure 11: 视紫红质中能量转移过程的时间以及与对应光谱的关系 [1]。

类的已经十分相似了。随后，脊椎动物的眼睛在早期鱼类的基础上继续演化，主要是对神经系统的优化，功能和原理上并没有什么大的改变。

3 结语

视觉系统可以被视为一种深层的编解码器，第一步是利用共价键中的电子对特定波长电磁波的反应产生电信号，然后逐层编解码（放大拟制），最后产生视觉以及更高层次的应用（移动物体跟踪，物体识别等）。深度学习的成功可能是因为其基本原理和生命意识产生的基本原理是相符的，然而目前人类对于自己这台计算机的内部结构还不够了解，以视觉系统为例，还很难精确了解每一层编解码器的具体激活函数，目前只是发现了一些结构能够起到编解码的作用而已。

柏拉图在其理想国对话集第七卷的开篇曾经描述过一个地穴寓言，设想在一个地穴中有一批囚徒；他们只能看面前洞壁上的影子。囚徒自然地认为影子是惟一真实的事物。如果他们中的一个囚徒碰巧获释，转过头来看到了火光与物体，他最初会感到眩晕（就像才从电影院走出来一样），但是没有关系，他会慢慢适应。此时他看到有路可走，便会逐渐走出洞穴，看到阳光下的真实世界，此时，他会意识到以前所生活的世界只不过是一个洞穴，而以前所认为的真实事物也只不过是影像而已。洞穴是人体感官所能及的世界的化身，是它表示人类所处的普通环境，人们通常会把这个环境同存在的整体等量齐观。上升至日光，则代表灵魂从可视的世界，提升到“精神境界”，感受到世界善的本质。

对于我们感受的光，如果我们止于“颜色”这些感官到的东西就是绝对真理，就等同于被身体这套感官囚禁的囚徒，而对光这些基本现象进行研究的科学家则是最先转头的囚徒，帮助其它无知的囚徒认识更高层次的真理。生物之所以存在，是因为进化过程为我们构建了一个相对安全的地穴，而某个时刻，有着复杂大脑的生物出现了，它们正在试图用自己的大脑去走出感官构建的地穴。

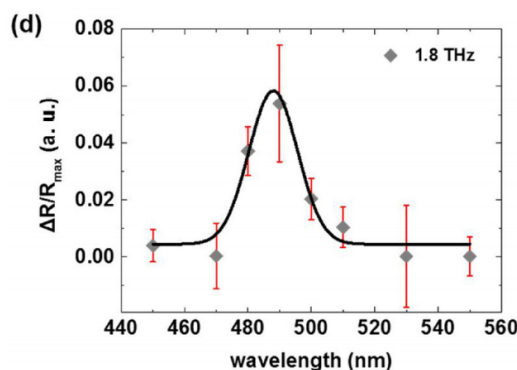


Figure 12: 纳米材料检测到的视紫质在不同波长光照射下的振动幅度。

4 参考文献

- [1] Splinter, R. (2014, November). Ultrashort Phenomena in Biochemistry and Biological Signaling. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 548, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.
- [2] Lee, D. K., Yang, H., Song, H. S., Park, B., Hur, E. M., Kim, J. H., ... Seo, M. (2018). Ultrasensitive terahertz molecule sensor for observation of photoinduced conformational change in rhodopsin-nanovesicles. Sensors and Actuators B: Chemical, 273, 1371-1375.