

人本照明白皮书

专为人體健康设计：

人本照明

使用前沿LED技术实现人性化照明设计，促进人体健康、生产力和休息

作者

Tom Jory
Yi-Ying Lai
Paul Sims

译者

Kimmy Liang
Yong Yang

2021年10月

序言

光 — 从太阳光到人造光 — 深刻影响着我们的生理节律系统。光线是影响人类生产力、保持精神清醒、维持睡眠质量和健康的关键因素。而且，正如我们所了解的，“劣质的”照明会对身心健康产生不利影响。近年来，随着人们对人本照明 (human-centric lighting, HCL) 的意识不断涌现，一场照明革命正悄然展开。

人本照明的应用手法侧重为工作场所、公共空间和家庭，设计可支持昼夜节律功能的照明。然而，要在室内实现人本照明方案具有挑战性。在白天，凉爽的蓝色调光 (例如：5000 K) 有助于提高警觉性和清醒度；在傍晚，略显橙色的暖白光色 (例如：2700 K) 帮助我们的身体放松下来，睡个好觉。

LED 照明提供许多优势，包括：低功耗和长灯泡寿命。然而，现今大多数的标准 LED 灯泡，其光色之色彩组成，很难在色调和亮度之间取得正确的平衡，以提供舒适且高效的办公室或工作环境。

建筑师、照明设计师和业主，如何兼顾室内照明和夜晚人体对健康及生产力的需求？答案就是人本照明 (HCL)，一种发展于过去十年，全新、全面性的应用方法。人本照明包含了关于光线昼夜节律变化的科学，以模拟大自然的昼夜光循环对人体生物钟的效应，并且广泛考量如何提升居民的生产力、情绪和舒适度。

如今，新发展的 LED 技术可实现更好照明方案，以支持人类昼夜节律功能。朗明纳斯 Salud™ 系列等划时代产品，正帮助设计师们在满足新的建筑标准的同时，去实现人本照明设计，真正兼顾照明和生理昼夜节律。

本书将探索：

- 为什么光线品质深刻地影响着人体？电气照明如何造成健康问题和影响员工生产力？
- 光线的昼夜节律和全新的人本照明科学
- 如何量测和定义光的特性？例如：色温 (CCT)、亮度 (照度，或 lux)
- 针对人类活动、安全和健康的理想照明特性
- 如何在您的照明设计方案中应用人本照明方法？
- 使人本照明成为可能的 LED 技术和新的优化方案

释义

Circadian (adjective)

/sər-ˈkā-dē-ən /

以近乎24 小时的周期或循环为特征 (生物学活性或功能)，用于描述动物和植物在 24 小时内自然发生的过程。

目录

挑战与机遇	1
解决方案	1
朗明纳斯专为人本照明设计的LED产品	1
背景	2
失眠的危害	3
人类视觉和对光的反应	3
案例研究：光觉疲劳	5
关于光	5
光的量化	6
色彩的量化	7
相关色温 (Correlated Color Temperature)	8
光谱功率分布 (Spectral Power Distribution, SPD)	8
显色指数 (Color Rendering Index, CRI)	9
青光断层 (Cyan Gap)	10
什么才是健康的光？	10
褪黑素比值 (Melanopic Ratio)	11
标准LED光源的褪黑素比值 (Melanopic Ratio)	11
如何实现人本照明 (Human-Centric Lighting)？	13
人本照明 1.0：在设计中使用 CCT	13
人本照明 2.0：在设计中融入褪黑激素照度	14
人本照明新标准	14
人本照明设计相关的计算公式	15
现今实现人本照明的普遍方案	17
人本照明全新创新方案：Salud™	17
案例研究：Salud 4000 K 办公室照明方案	19
结论	20
参考文献	20

挑战与机遇

没有电灯我们会在哪里？现代人大部分的生活都围绕着人工照明。在隆冬漫长且黑暗的日子里，光激励着我们，为我们的街道带来了安全。不仅延长了我们的工作时间，更延长了下班后的悠闲时光，让我们尽情地享受阅读、放松、娱乐、运动以及社交。

我们是否知道这些人造光对我们身心健康及生产力的影响？每年都有研究表明，“糟糕的”光与癌症、糖尿病、肥胖、睡眠障碍和心理健康之间存在可能关联性。过于明亮且错误的照明会扰乱我们的昼夜节律周期，进而干扰睡眠和清醒。许多电子设备，例如：整天盯着的电脑屏幕、在家时常翻看智能手机，都可能发出干扰睡眠的光。

除了潜在对健康的影响外，睡眠质量差和睡眠不足也会导致安全问题。间歇性睡眠对人身体机能的损害不亚于血液酒精浓度为0.08的人。连环的健康议题和交通事故，包括高达 25% 的交通事故 [1] 都与睡眠不足有关——而睡眠不足很可能是由错误的灯光引起的。

解决方案

话虽如此，仍有解决方案。我们现在了解到照明如何影响人类生理，以及如何设计出维护我们健康和身体功能的照明方案。通过LED(发光二极管)产品的优势，优化色温及可见光谱，如此一来，无论白天还是黑夜，我们仍然可以继续享受人工照明的好处，而不会对健康和安全产生不利影响。

朗明纳斯专为人本照明设计的LED产品

动态COB模块 (Dynamic Chip-on-Board Modules)

- **色温可调COB (CCT-Tunable COB)**：此系列模块提供 9、14、18 和 22mm LES(发光面)选项，均具有两个独立通道(暖色和冷色)，以提供 6500K 至 2700K 或 4000K 至 1800K 的 CCT调节范围。广泛的选择，使灯具制造商能够灵活设计出独立 CCT、调光控制、以人为本的照明方案。[了解更多](#)
- **暖调光COB (Warm Dimming COB)**：此系列模块通过调光过程，动态地将CCT 从 3000K 调到1800K 或从4000K 调到2700K，以模仿传统灯泡技术。这种“随着微暗变暖”的效果提供放松、以人为本的环境，非常适合餐厅、酒吧、酒店、零售和住宅环境。[了解更多](#)

PerfectWhite™

PerfectWhite™旨在实现卓越的白光光谱，提供均匀的光谱响应(无青色断层)且无紫外线或紫光辐射，是博物馆、艺术画廊、专业零售商和酒店场所的理想选择。[了解更多](#)

Salud™

除了 CRI、R9、CCT 和光通量，Salud 是专为melanopic/photopic ratios (MRs) 设计。通过增强青色光谱抑制褪黑激素，并加强660nm光谱达到自然肤色色调。Luminus Salud 系列可提供更温暖、更舒适的光线，让人们保持健康、精神专注和活力。[了解更多](#)



背景

光对我们的情绪、健康和生产力有巨大(通常是潜意识的)的影响。这并不奇怪——历经亿万年，地球上几乎所有的生物都是被太阳以某种形式塑造而成 (图 1)。随着地球围绕太阳旋转，包括人类在内的所有生物都在进化。

地球每一次的运行，人类自然的活力都会对一天长度的变化做出反应。随着地球绕轴自转，人类已经进一步适应了昼夜 24 小时循环。我们是天生的昼行生物，白天活跃，晚上放松和睡觉，这种生物适应就是所谓的昼夜节律周期 (circadian cycle)。

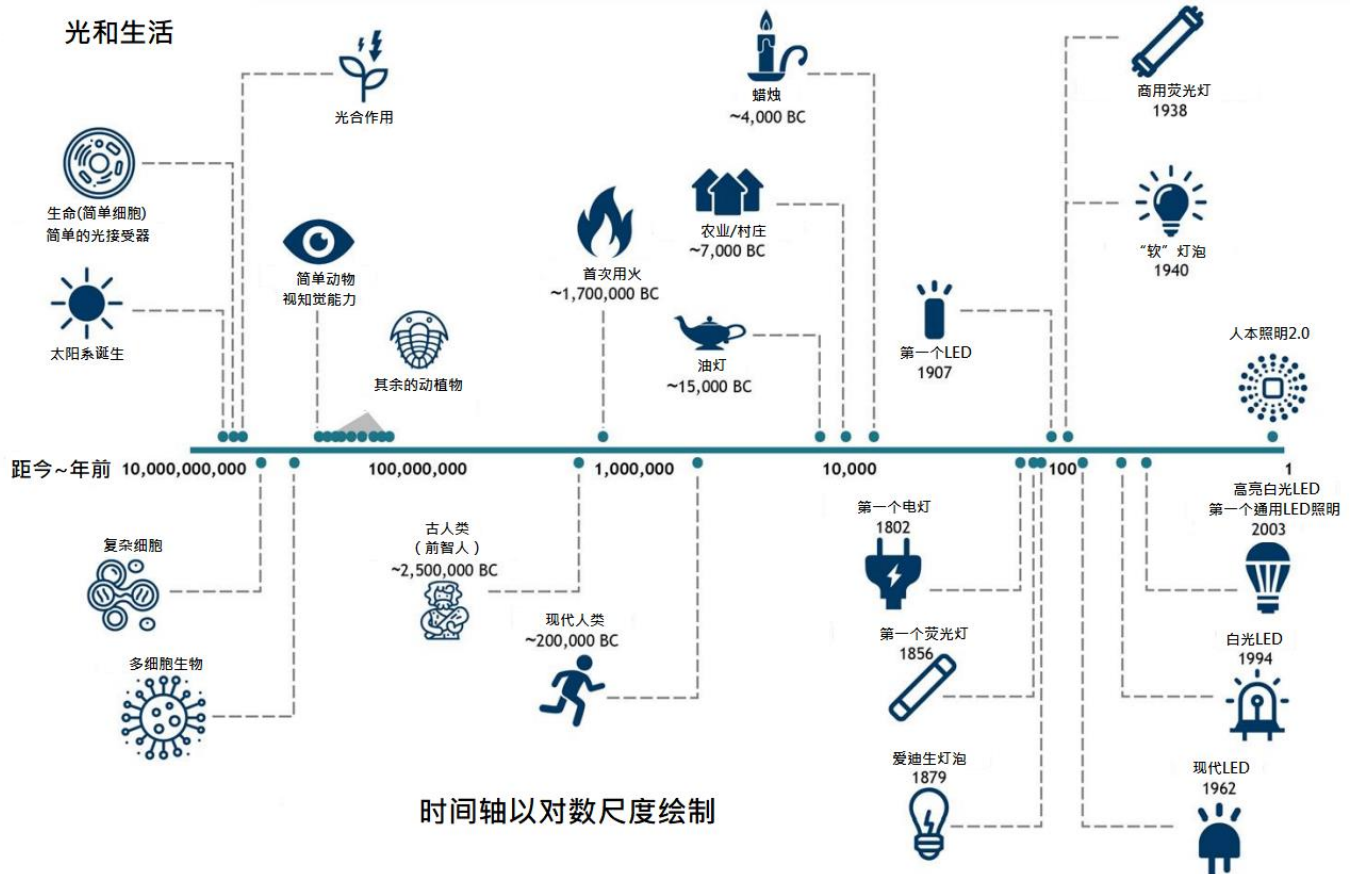


图 1 - 光在太阳系的时间轴。从最早的细胞生物到现代人类，地球上的生命体已进化出应对太阳的电磁光谱。火、油灯、蜡烛和早期的白炽灯泡发出的暖色光，不会干扰人体的昼夜节律。直到冷色调电灯出现，大约 150 年前(与千年历史相比，这只是小小的昙花一现)，才开始扰乱人体自然的昼夜节律。

然而，现今的我们在夜晚拥有的光，比历史上任何时候都来得多。在过去的 150 年里，我们一直在人工照明下工作、生活和娱乐。增加的光线可以提升人们的情绪并提高生产力。人工照明为全天24小时/7天 经济做出贡献，工厂得以日夜运转，并为被照亮的街道提升安全性。人们在任何时候都能体验“与白天一样明亮”的光线，并在整个夜晚保持活跃。

然而，所有这些提高的生产力都伴随着一些不利因素。办公室工作人员白天待在室内时，经常抱怨在荧光灯或其他非自然光的照射下感到疲倦，人造光和电子屏幕的光使我们精疲力竭，并使我们一直保

持清醒。

美国疾病控制和预防中心表示，晚上暴露在蓝光和含有蓝色的白光下会扰乱和剥夺睡眠 [2]。暴露在蓝光会抑制身体释放褪黑激素(一种睡眠激素)，从而扰乱昼夜节律。

失眠的危害

睡眠不仅仅关乎个人舒适度。睡眠可促进愈合、抵抗病毒细菌入侵，并将白天的经历化成脑海的记忆。睡眠还可以调节胰岛素，睡眠不足会破坏胰岛素和血糖系统，使人容易患糖尿病。睡眠不足还会增加身体的炎症反应，影响抗癌细胞的功能和抗感染抗体的生成。

此外，疲劳限制了我们思考、学习和决策能力。睡眠不足会降低抑制冲动的能力，使人们容易出现危险行为，例如：酒后驾驶。即使没有施打影响精神的药物，若驾驶人的睡眠时间少于四小时或有间断性的睡眠，其在开车时的警觉性、反射反应和判断力与血液酒精浓度为 0.08 者相同。

显然，睡眠不足给工业社会带来了严重的问题。鉴于光对人类的睡眠模式和质量有关键影响，制定最理想的照明解决方案的第一步是了解我们如何感知光。

人类视觉和对光的反应

人眼包含称为视杆细胞(rods)和视锥细胞(cones)的光感受器，如图2所示。视杆细胞使我们能够在微光的环境下看见物体，但其对物体的色彩不敏感，因而称为暗视觉(scotopic vision)，这也就是为什么在暮色和夜晚的场景中，人眼感知的物体呈现黑色与白色。而视锥细胞负责强光下的视觉(明视觉)和对颜色的感知。

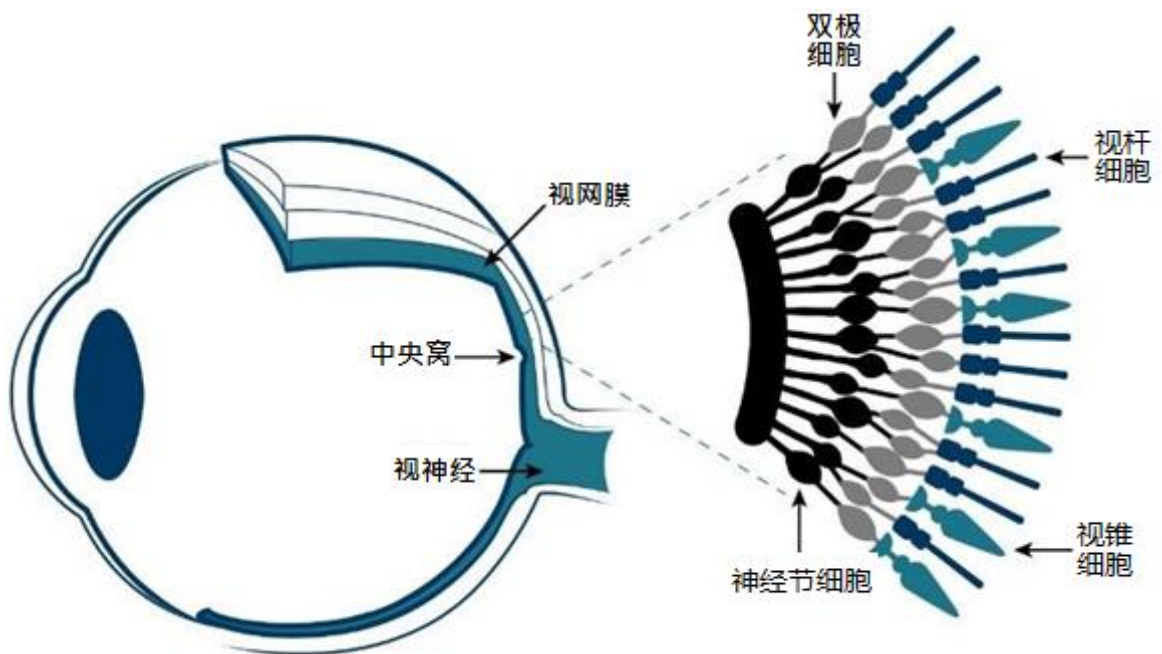


图 2 - 人眼的感光结构包括：视网膜(retina)、神经节细胞(ganglion cells)、视杆细胞(rods)和视锥细胞(cones)，视锥细胞负责明视觉和颜色感知。过去 20 年，研究人员已经确定神经节细胞负责视觉-褪黑色素反应，这会影响我们的昼夜节律周期。

我们之所以能看到，是因为光线照射到视网膜上的视杆细胞和视锥细胞，从而激发视紫质(rhodopsin)和光视蛋白(photopsin)。这种瞬间的化学变化通过视神经向大脑发送信号，然后大脑将这些信号处理为图像。

在过去的 20 年里，研究人员在眼睛结构中亦发现其他不参与视觉处理的光敏细胞——视网膜神经节细胞(retinal ganglion cells, RGC)，也称为光敏视网膜神经节细胞(photosensitive retinal ganglion cells, ipRGC)，其散布在视网膜中，视杆和视锥细胞的上方。ipRGC 形成了眼睛通往大脑下丘脑区域的主要神经通路，下丘脑是人体生物钟的位置，掌管身体内部周期机制——也就是我们昼夜节律。

为了让昼夜节律调整一致，当光线进入眼睛时，它会在每个 ipRGC 中发射一种称为黑视素(melanopsin)的光敏蛋白。在这个多步骤的过程中，黑视素在白天抑制褪黑激素(此激素会诱发睡眠)，并随着进入夜晚，光线逐渐消失，逐渐增加褪黑激素的产生(图 3)。为什么会有这样的现象？因为黑视素对日光组成的主要颜色——蓝色和青色(blue and cyan)的反应最大。因此，人眼对光的反应不仅仅是视觉感官刺激，还会通过释放褪黑激素来触发荷尔蒙反应。更重要的是，即使在视力受损的人中，RGC 也能控制昼夜节律机制。

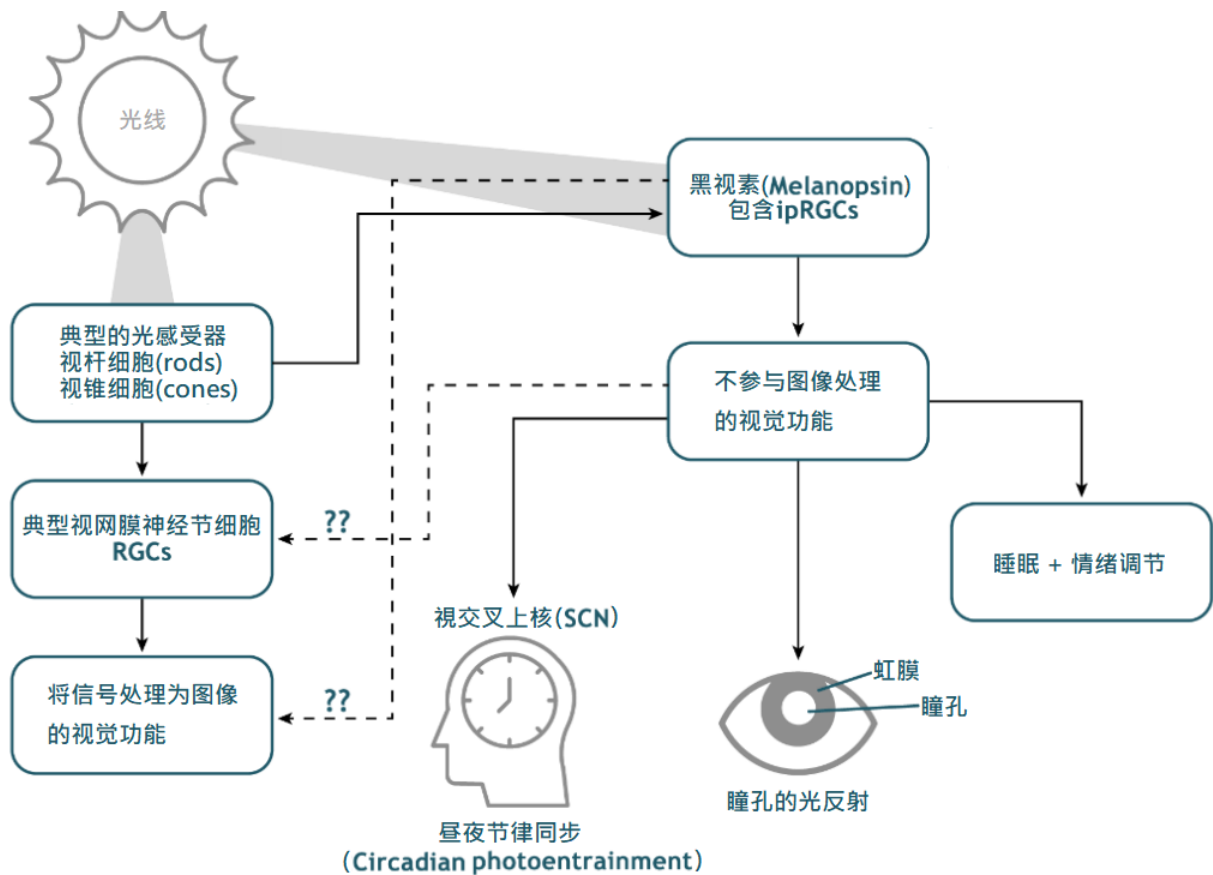


图 3 - 通过眼睛接收到的光会影响大脑和身体重要的生理功能

案例研究：光觉疲劳

一名 47 岁男性主诉严重疲劳和白天嗜睡，被送往疲劳和睡眠医学研究中心进行治疗。 [3]

20 多年来，他经历不规律的睡眠-觉醒模式、抑郁和慢性疲劳，这些症状随着时间的推移而恶化，甚至影响他每一天的生活。到最后他不得不减少工作，但只能做兼职。迄今为止，抗抑郁药物和褪黑激素都未能缓解他的症状。

临床团队进一步调查，他们发现该男子过去都在傍晚/夜晚轮班工作。更值得注意的是，他持续在专业钻石级设备下工作，该设备的灯产生超过 8000 lux 的光，强度如同白天，而且光线也可能具有高蓝光 CCT。

通过照射真正的晨光(称为强光疗法)，晚上服用褪黑激素补充剂，患者终于感受到“显着地改善”——白天保持清醒，晚上拥有健康的睡眠 [3]。

这个案例说明夜间暴露强光对人类昼夜节律、睡眠-觉醒周期、抑郁和忧郁的潜在风险。虽然不是每个人都坐在钻石级灯下，但即使是普通手机发出的蓝光/白光也会扰乱人类的睡眠。

关于光

我们对办公室、学校或家中的电灯的质量了解多少？它与自然光相比如何？要了解是什么构成“健康的”光，我们要从光是如何被表征和量化开始谈起。大多数人认为光就是我们眼里所看到的，但可见光只是全光谱电磁辐射中的一小部分，所以专家常使用能量或波长(成反比)来描述辐射，如图 4 所示。

电磁波谱从一端的短波、高能伽马(gamma)射线一直延伸到另一端的长波、低能微波(microwaves)和无线电波(radio waves)。频谱中间的一小段是人眼可见光的范围，约为 380 纳米 (nm) 至 750 nm，左右两端以紫外线 (UV) 和红外线 (IR) 为界。

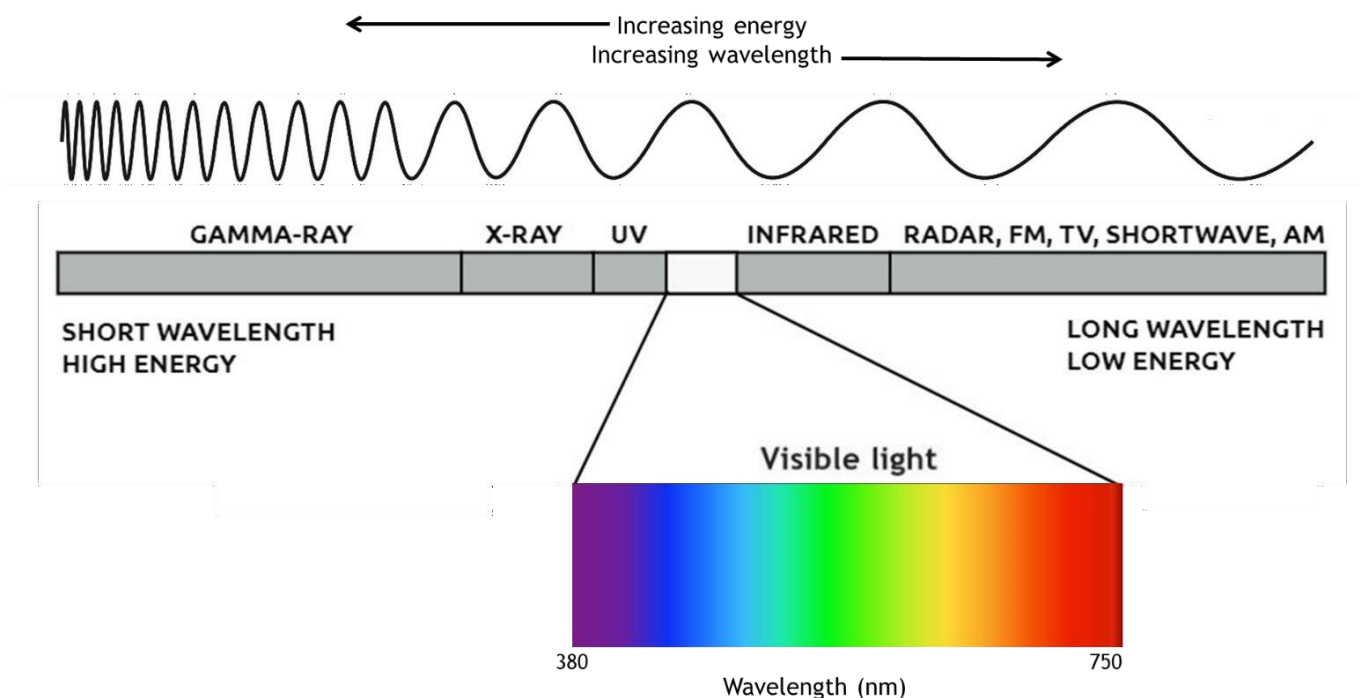


图 4 - 电磁辐射的频谱，包括不可见的波长范围，例如 X 射线和无线电波，按波长(以米为单位)递增的顺序绘制。底部长条是可见光谱的扩展视图，人眼可感知的电磁辐射范围，从大约 380 纳米 (nm) 到 750 nm。

光的量化

从物体发射或反射的光量称为光亮度(luminance)——通常称为亮度(brightness)。光通量(luminous flux)是光源发出的光总量，对光的整个角跨度做积分，以流明 (lm) 为单位。发光强度(luminous intensity)是特定方向之光源发出的光量。照度(illuminance)是指照射在物体表面上的光量，以每平方米流明 (lm/m²) 为单位，也称为勒克斯(lux) (参见图 5)，是室内照明设计的重要考虑因素。

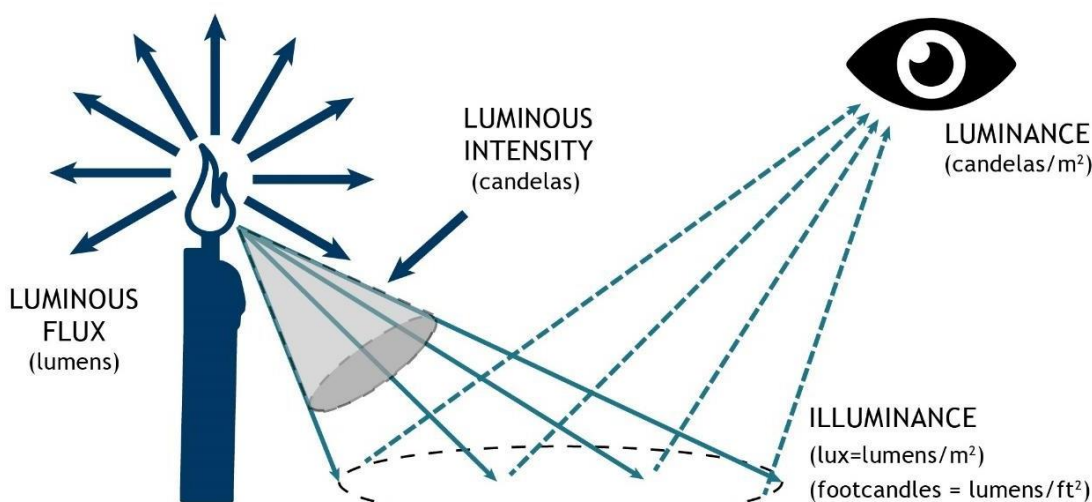


图 5 - 光的测量术语

色彩的量化

1931 年，CIE (Commission Internationale de L'Eclairage，国际照明委员会) 针对颜色的物理特性，定义了科学量化的标准。CIE 色彩空间描述了人眼对可见光的反应，以及我们对波长分布的颜色感知。自标准发布以来，CIE 色彩空间(图 6)已经能够为印刷、光源和照明显示屏等广泛的应用，提供准确测量、描绘表达和复制这些颜色。

图 6 中显示的黑体轨迹 (也称为普朗克轨迹, Planckian locus)，是一种被称为“黑体辐射源”的光源，其色度坐标图。您可以将“黑体辐射源”理解成一颗在特定绝对温度——Kelvin (K)的铂球。在 CIE 图中，黑体轨迹所在区域的光线呈现白色，而人造白光之色度坐标通常在黑体轨迹附近。但是，白光的光谱功率分布 (spectral power distributions, SPD) 可以由多种波长组合而成，不一定如“黑体辐射源”般有平滑曲线。

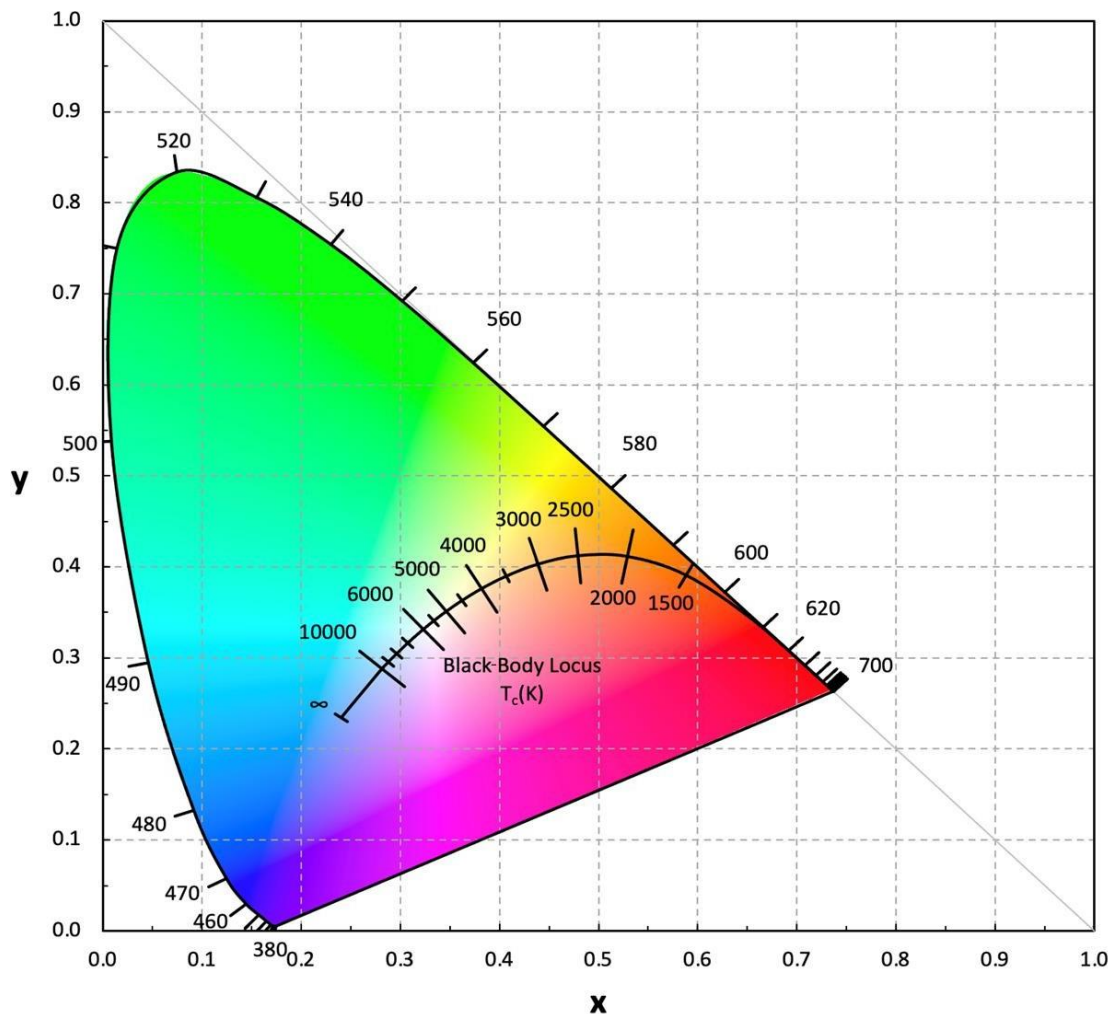


图 6 - CIE 1931 色彩空间，绘制了人眼可见的所有颜色，“马蹄形”边缘的数字定义了该空间边界所代表的单色光波长。在空间内部，每个可感知的颜色都有一个坐标，称为 CIE_x、CIE_y，其中也包含了黑体(普朗克)轨迹坐标。T_c(K)是黑体温度，通常称为 CCT。

相关色温 (Correlated Color Temperature)

相关色温 (CCT) 是一种用数字表征任何白光光源其颜色外观的方法。人造白光可以使用可见光谱中的颜色组合而成，不同的波长比例会导致光看起来“更冷” (蓝/青色波长) 或“更暖” (黄/橙色波长)。

光源的 CCT 是在普朗克轨迹上，与该光源的色度坐标最接近 (在感知上) 匹配的点，称为色温。如果光源不是黑体辐射源，但它的色度坐标靠近普朗克轨迹，我们可以用 CCT 来表征它的颜色。CCT 以开氏度 (Kelvin, K) 为单位：暖光约为 2700 K，中性白约 4000 K，冷白约 5000 K 或更高 (图 7)。Luminus LED 涵盖从 1800 K 到 8000 K 全系列 CCT，适用于各种照明应用。

相关色温 (CCT)

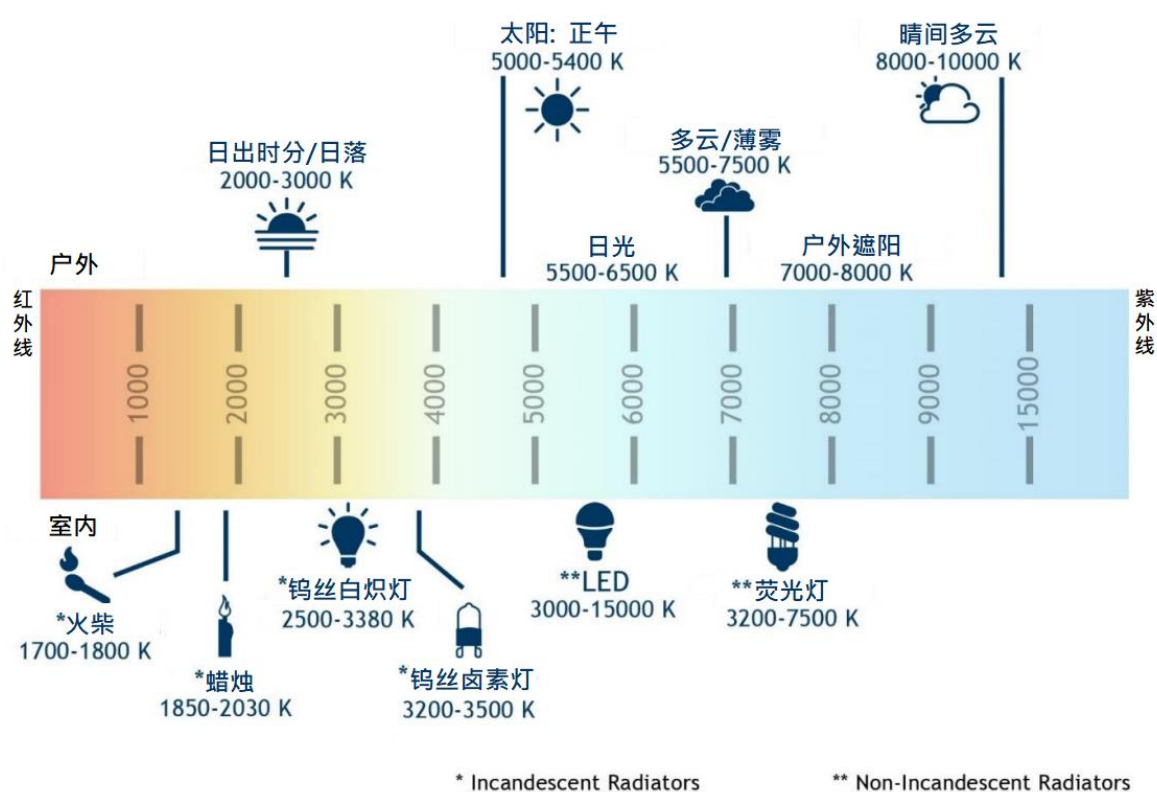


图 7 - 比较各种光源的 CCT，包括一天中不同时间和天气条件下的阳光，以及室内人造光源。大气层上方的太阳光约 5900 K。当太阳穿过天空，它可能会呈现红、橙、黄或白色，具体取决于它的位置，这些颜色的变化主要是来自大气气体分子散射光的结果。

光谱功率分布 (Spectral Power Distribution, SPD)

光谱功率分布将光源的功率量化为波长的函数。换句话说，通过光谱仪的量测，SPD 描述了光源在每个波段发出的光功率。因此，光源的辐射通量特性通常用 SPD 图表示，其中波长 (以纳米为单位, nm) 位于 X 轴上，光谱功率 (以瓦特/纳米为单位, W/nm) 分布在 Y 轴上。Y 轴通常被归一化为任意单位，比如强度 (如图 8 所示)，或归一化强度/相对灵敏度 (如图 10)。SPD 量测的结果会与代表人眼感知响应的数学

式相结合，以计算人眼的颜色感知。

请注意，SPD 不等于 CCT。CCT 表征人类如何感知光源的色调；而 SPD 则捕捉整个波长光谱，包括一些人眼不可见但仍可能具有昼夜节律效应的波长。您可以将 CCT 理解为光谱内容的近似值[4]。

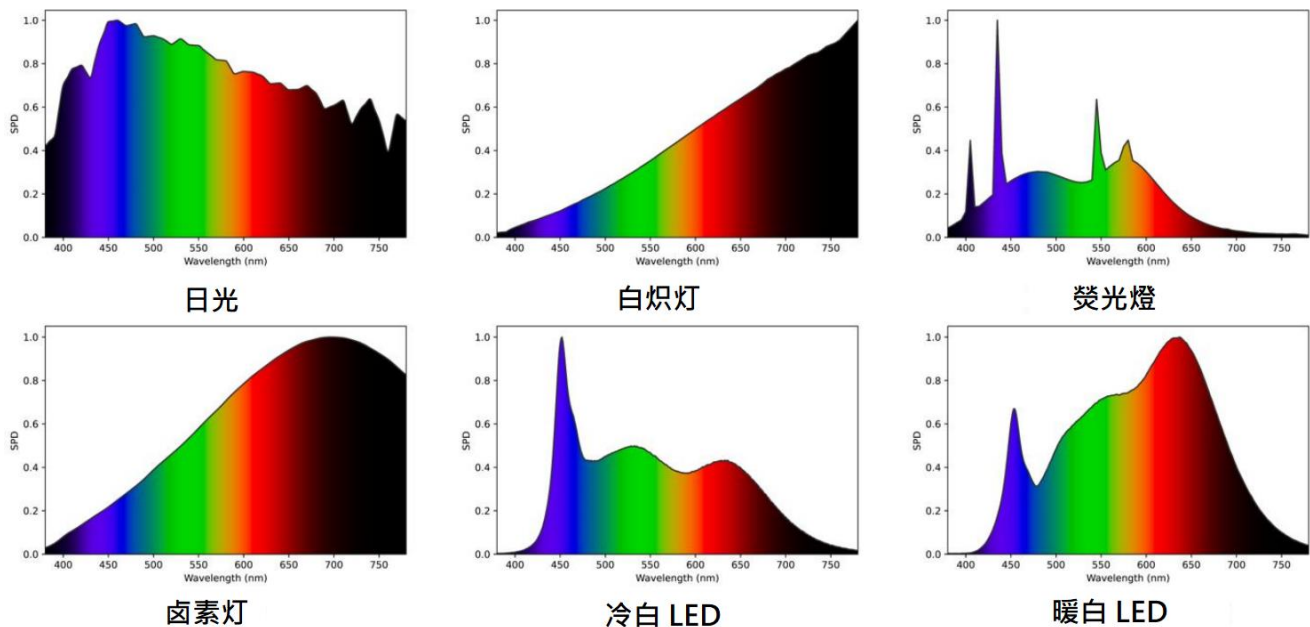


图 8 - 不同白光光源的 SPD 比较，我们可以设计不同色温的白光LED。举例来说：日光(左上角，以北半球典型冬季晨光为代表)拥有最宽的光谱；白炽灯泡中的红光波长占主导地位。(图片来源：Admesy)

显色指数 (Color Rendering Index, CRI)

了解光源的 CCT 对人类的影响非常重要；而对于照明设计应用来说，了解其对视觉感官环境的影响同样很重要。显色指数 (CRI) 是衡量光源照亮 (渲染) 物品颜色的准确程度。传统的 CRI 是依据光源展示出的平均准确度 (使用定义好的颜色参考样本)。

在满分 100 (优秀) 的评分范围中，CRI 分数为 50+ 的光源被认为是可用的，具体取决于应用。优质 LED CRI 范围为 80 到 95。虽然 CRI 是一个数字，但它代表了光源在渲染一组标准化颜色样本时的平均表现得分。传统 CRI 使用 8 个核心样本和 7 个补充样本，每个样本称为 Rx。例如，R9 是一种深红色，在许多应用中，常被参考作为关键颜色质量指标。

近期照明工程学会 (IES) 发布了评估 LED 灯具颜色的新标准——TM 30-18，它有 99 个单独的颜色样本 (取代了传统 15 个 CRI 样本)。更多关于 Luminus 产品的 TM-30-18 信息，可联系：
techsupport@luminus.com。

青光断层 (Cyan Gap)

标准白光 LED 在可见光谱的青色区域中常呈现“波谷”，这种光谱功率下降的现象称为青光断层，会降低 LED 的光线质量，在需要全光谱照明的应用中效果较差。

举例来说，在需要提高警觉清醒和生产力的办公室照明，青色光谱需达到某目标水准。如果所使用的 LED 青光含量较低，那么设计师必须使用更多 LED 才能达到所需的青光水平。这种“过度照明”会使空间充满其他波长的多余的光，这些光不但对昼夜节律功能没有贡献，同时会造成出令人不舒服的明亮环境。

Luminus 的 PerfectWhite™ COB 是解决青光断层、迈向人本照明的一项巨大技术成就 (图 9)。

PerfectWhite™ 不但弭平了青光断层，更减少潜在有害的紫外线，使这些光不会随着时间的推移而损坏物品，非常适合应用在艺术博物馆等空间。

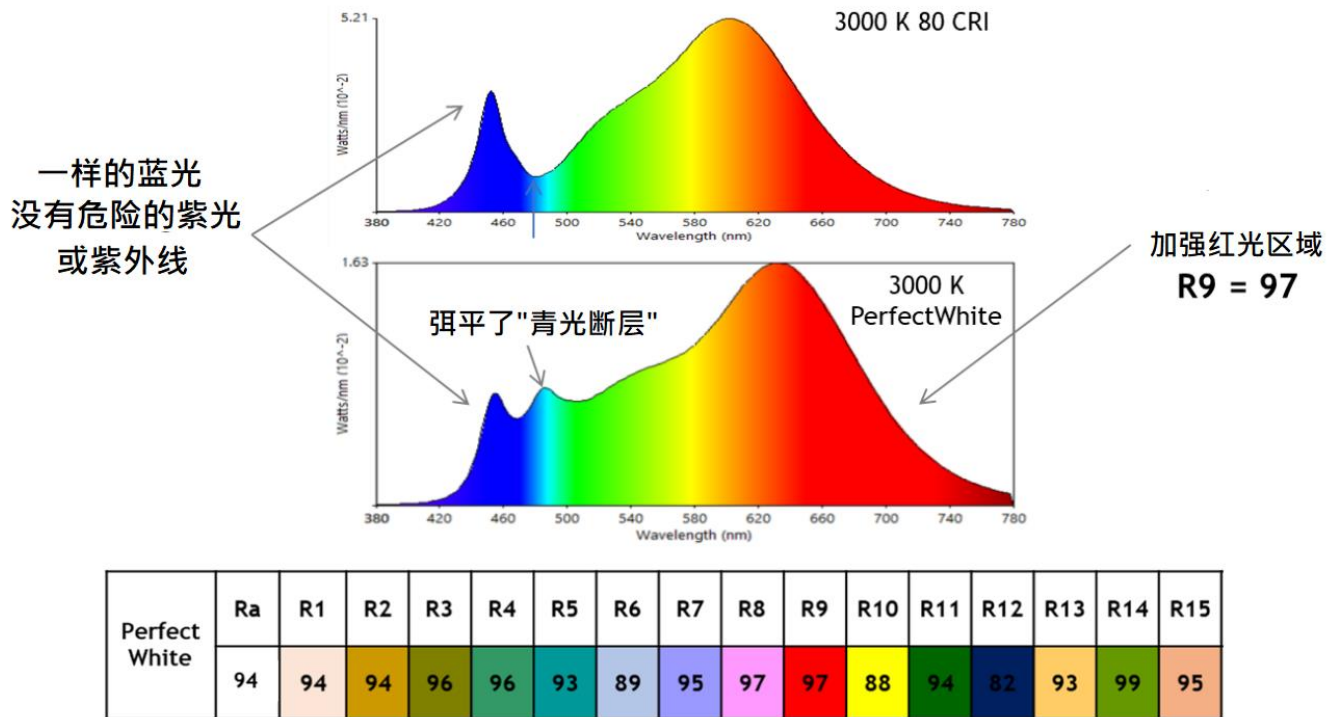


图 9 - 两张图显示 PerfectWhite LED 矫正青光断层后 (与标准 3000K CRI 80 的 LED 相比)，提供了更平衡的全光谱。

表中数值显示 PerfectWhite 出色的 CRI，15 个颜色样本 (R1-R15) 的平均值 (Ra) 为 94.3 (满分 100)

什么才是健康的光？

一天中的大部分时间，太阳提供 6500 K 的光，此蓝白光抑制了褪黑激素并使我们清醒。褪黑激素被称为“睡眠荷尔蒙”，它会向身体发出信号，让身体放松准备入睡。没有它，我们会更加警觉。

光的存在和颜色都会影响生物钟或昼夜节律，这种效应被称为黑视素视觉(melanopic vision)，定义为光的生物影响以及它如何影响褪黑激素的产生。日光的天然光谱中富含蓝光，抑制了这种激素的产生。随

着白天接近尾声，黄昏呈现出更温暖的橙色和红色色调，而蓝光逐渐消退。作为回应，我们的身体开始产生更多的褪黑激素来帮助我们入睡。

当我们的祖先掌握火时，它为傍晚和夜间带来了更多的光。然而，因为火是一种暖光，与傍晚的阳光非常接近，所以它不会对人类自然的睡眠模式造成不利影响。

Melanopic Ratio

明视觉(Photopic vision)是指我们在白天和光线充足的空间能看到物体，即光对视觉的影响 (图 10)。

Melanopic Ratio (MR, Melanopic/Photopic ratio, M/P ratio*或 MP ratio) 量化了光对昼夜节律的影响：光源对人类昼夜节律系统的刺激程度。基本上，MR 比率越高，光源的昼夜节律效应就越强，越能促进警觉性和清醒。

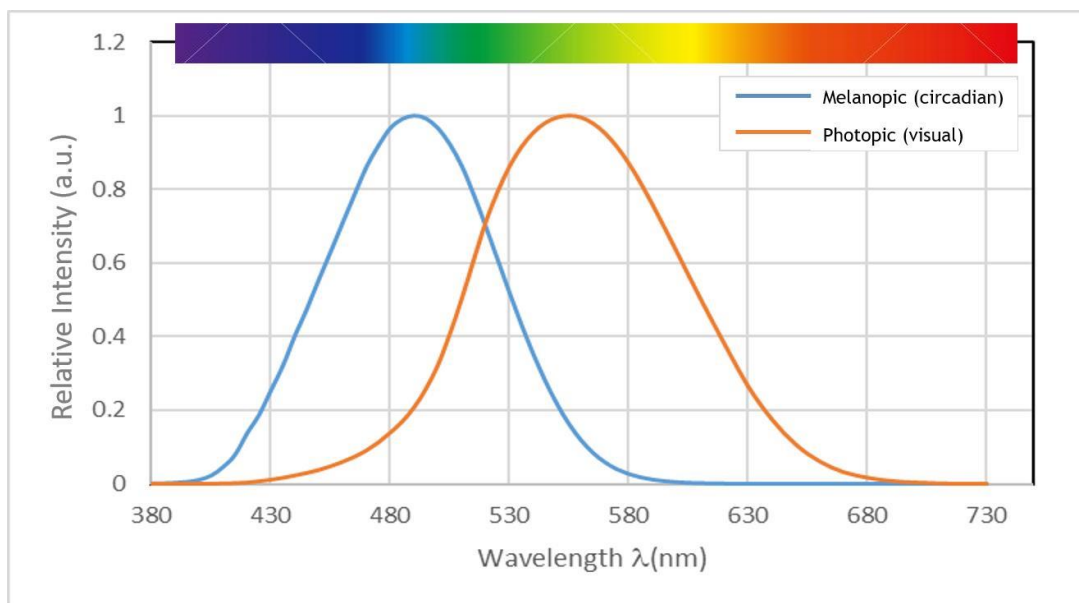


图 10 - 比较人类明视觉 (Photopic) 和黑视 (Melanopic) 的响应曲线，峰值代表眼睛对光的峰值响应。在视觉上，人眼对绿色或黄绿色光的反应最为强烈；在生物学上，蓝光会引起最强烈的反应，抑制褪黑激素的产生并促进清醒。

标准LED光源的Melanopic Ratio

蜡烛就像过去用来照明，具有约 1900 K 的 CCT，是一种非常温暖的光。近来LED的发展使得微调灯泡和灯具的CCT 和光谱成为可能 (表 1)，人造光可以具有不同的亮度级别 (lux) 和 CCT。暖光灯泡具有大约 2200 K 的 CCT 和低 MR比，具有较少的蓝光/青光，最适合夜间放松和准备入睡。

* 备注：Melanopic Ratio 在行业中通常也称为Melanopic/Photopic ratio或“M/P”ratio，CIE 使用“MR”比率。不应将 melanopic/photopic ratio中的 M/P 与“mesopic luminance”混淆，它有时也被称为“M/P ratio”，其描述了与人类夜视相关的户外照明。在本白皮书中，我们使用 MR 代表melanopic ratio以减少混淆

相比之下，6500 K 冷 CCT 的光源往往具有较高的 MR 和更多的蓝光/青光，从而抑制褪黑激素的产生。它适合白天于学校、工厂、办公室、控制室等场所使用，可保持清醒专注和生产活动力。图 11 比较了不同 CCT 下 LED 的色彩配置 (SPD)，图 12 展示了人眼对不同 CCT 光源的视觉呈现。

表 1 - LED 示范光源的 CCT 和 MR

标准 LED CCT	典型的MR
2400 K	0.399
2700 K	0.442
3000 K	0.525
3500 K	0.631
4000 K	0.668
5000 K	0.836
6500 K	0.976

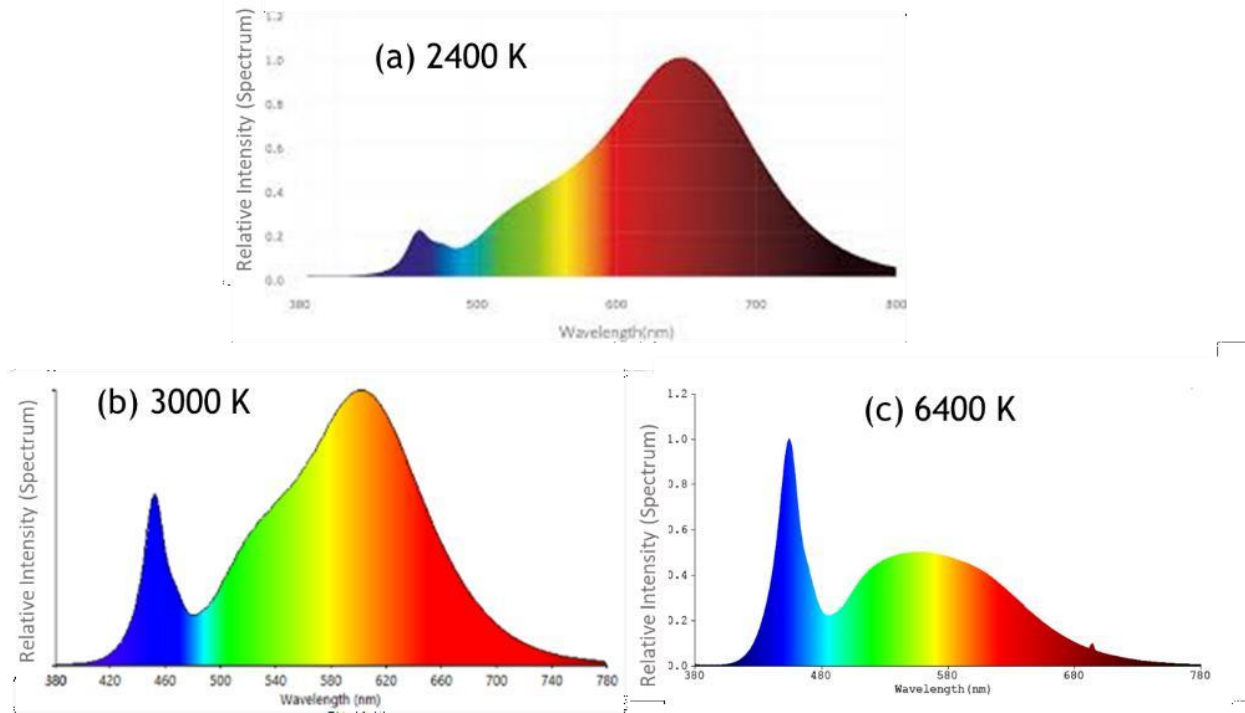


图 11 - 展示三种不同CCT的LED光源如何定制光谱，并达到所需的 MR 比

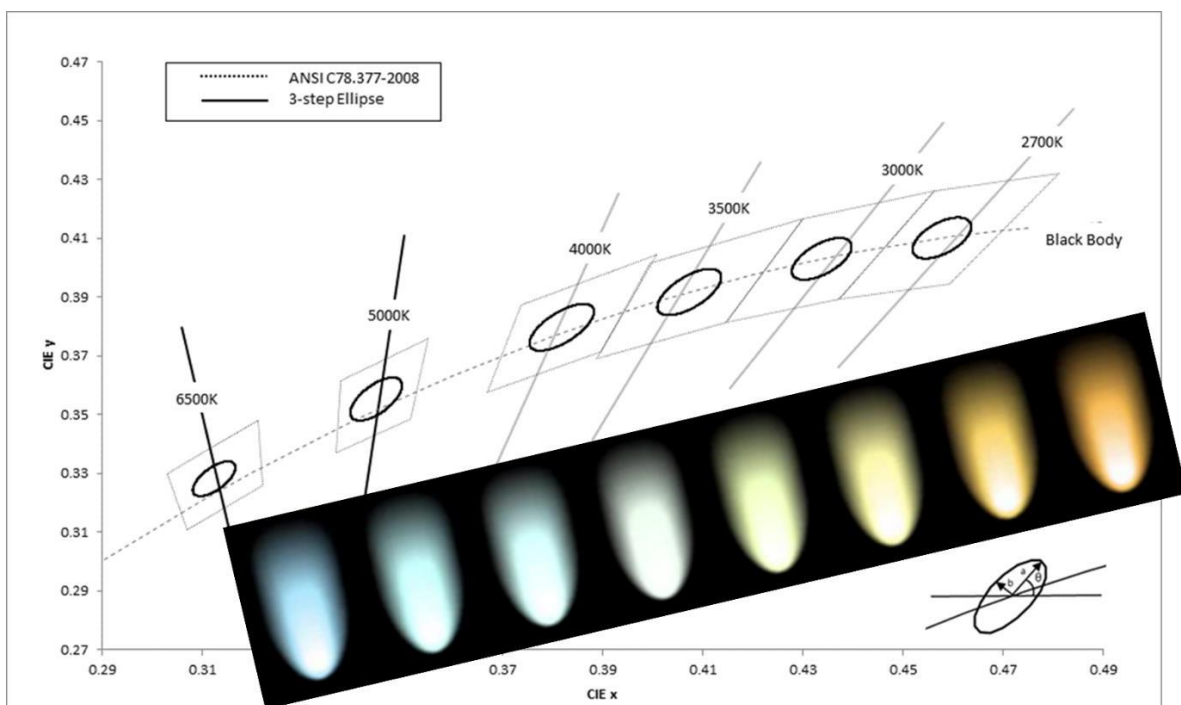


图 12 - 不同 CCT 的光如何呈现在人眼中：6500 K 时为“冷”蓝色，当光进入 3000 K 范围及以下时为“暖”橙黄色。
† 与 CIE 坐标相关

如何实现人本照明 (Human-Centric Lighting) ?

建筑师、照明设计师和业主，如何兼顾室内照明和夜晚人体对健康及生产力的需求？答案就是人本照明 (HCL)，一种发展于过去十年，全新、全面性的应用方法。人本照明包含了关于光线昼夜节律变化的科学，以模拟大自然的昼夜光循环对人体生物钟的效应，并且广泛考量如何提升居民的生产力、情绪和舒适度。

人本照明 1.0：在设计中使用 CCT

本质上，以人为本的照明利用不同色温所带来的促进或放松效果，在一天中的不同时间和不同环境中发挥优势。例如：在家、餐厅或在夜晚放松度过的场所，2200 K 到 2700 K 间的暖白光加上低蓝光占比能很好发挥作用。此 CCT 范围内的 LED 比烛光有更多的蓝光，但会产生类似于白炽灯泡的暖白光，并且具有低 MR，最适合晚上放松和准备入眠。

相比之下，6500 K 左右的冷白光 LED 可用于学校、办公室和其他需要警觉性的场所的白天照明。这种色温的 LED 就像阴天时的蓝白光，具高 MR，能抑制褪黑激素分泌以刺激人类的昼夜节律系统，使人们保持清醒、警觉和生产力。

† 如图 12 和图 6 所示，描述人类色温感知的术语为“暖” (低 CCT) 和“冷” (高 CCT) 光，与实际测量黑体辐射源的色温相反。对于黑体辐射源，数字越大意味着更高的温度 (Kelvin degrees)。就本白皮书而言，除非另有说明，否则任何提及暖光和冷光都是指感知 CCT，而不是黑体辐射源的温度。

这种方法的缺点是大多数人对这种非常冷的白光感到刺眼且不舒服。出于这个原因，照明设计师通常将环境布置为 4000 K，从而牺牲一些日光的优势。

然而，Luminus Salud LED 提供了一种新的解决方案。此系列LED 具有高青色光谱含量和高 MR，结合更舒适的暖光 CCT，为白天室内照明提供理想的组合方案。除了 Luminus Salud，PerfectWhite和CCT 可调模组等具备全光谱和高显色性的产品，已被证明能满足最新 HCL 的设计标准。进一步的升级，将帮助照明工程师和设计师实现最佳的 HCL——经济高效且不会过亮。

人本照明 2.0：在设计中融入褪黑激素照度

与照明质量相关的参数已成为建筑和设计的新标准，但仍在不断发展中。如果 HCL 1.0 意味着简单地了解 CCT 对人类的影响，

并出于特定目的和活动去选择适合不同空间的冷光或暖光灯具，那么将褪黑激素照度(melanopic lux)纳入照明布局设计的考虑因素，被视为 HCL 照明的下一个阶段—HCL 2.0。

人本照明新标准

WELL 建筑标准® (WELL Building Standard, WBS) 是第一个以健康为重点的建筑标准，它提供了一个循证系统，用于测量、认证和监控建筑环境对健康的影响。WBS 考虑建造和设计如何帮助在该建筑物活动的人们，其舒适度、心情、睡眠和工作表现。

该标准使用等效褪黑激素照度 (Equivalent Melanopic Lux, EML) 来描述健康的光。EML 公式区别于其他计算可见光的公式，是量化照明对人类生物(褪黑激素)效应的方法。该公式加权强调视网膜神经节细胞(ipRPG) 的反应，与传统上强调视锥细胞(cones)的lux不同。

另一个昼夜节律标准是来自美国伦斯勒理工学院照明系统与应用中心 (LESA) 中心的昼夜节律标准 (Circadian Standard, CS)。近期，美国安全试验所 (UL) 决定采用伦斯勒模型(Rensselaer model)

先前，行业标准仅考虑水平的勒克斯(lux)。水平勒克斯测量照射在桌面或地板等水平表面上的照明。新方法考虑垂直勒克斯，也就是测量光线照射垂直面后，并在视线高度进入瞳孔(图 13)，这直接影响褪黑

基础人本照明(HCL 1.0)

早期对照明带来的昼夜节律效应的理解，形成了HCL 的基本原则，概述如下。近年来，科学研究和 LED 技术的进步使得更复杂的 HCL 方法得以实现（请参阅人本照明 2.0章节）。

白天灯光：

- 使用凉爽的 6500 K CCT LED
- 注重光谱中青光比例
- 高 Melanopic Ratio
- 适合：学校、工厂、办公室、控制室

晚间灯光：

- 使用温暖的 2200 - 2700 K CCT LED
- 光谱中的青色和蓝色较少
- 低 Melanopic Ratio
- 适合：晚上和夜间放松和准备就寝

激素的反应。WBS 将“视线高度”定义为离地面 1.2 米/4 英尺。遵循 WBS 的照明设计师必须在垂直和水平平面上指定 EML，并建议白天最低为 200 EML。但是，建筑物的顶灯对居住者感受水平勒克斯的贡献有多大？而且，水平勒克斯如何转换为垂直勒克斯？

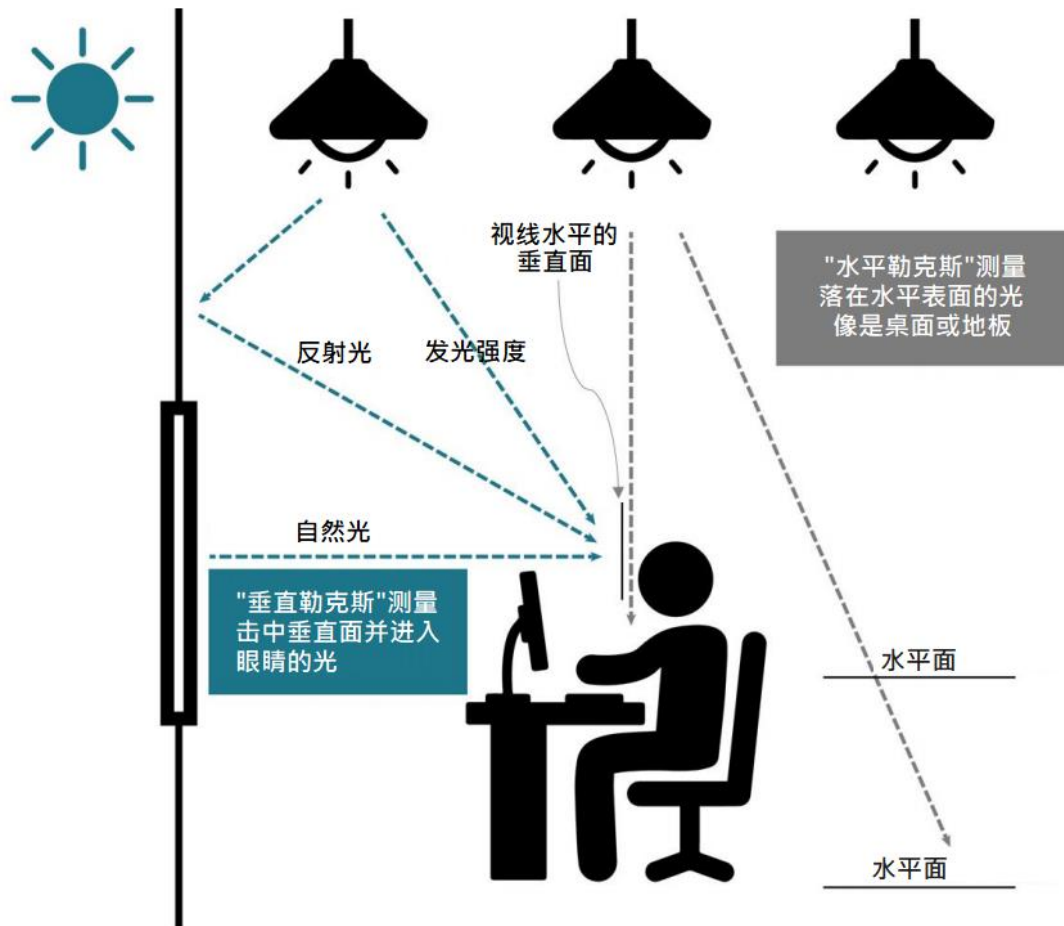


图 13 - 过去量测勒克斯是水平的，也就是测量落在平面上的光，而 HCL 则考虑了水平和垂直勒克斯。垂直勒克斯测量居住者前方垂直平面和他们的视线水平上的光。在 WELL 建筑标准中，关于昼夜节律照明的指南 [4] 将视线高度假设为 1.2 m 或高于完工地面 4 英尺。。

备注：垂直勒克斯和水平勒克斯是常见的简写术语。从技术上讲，垂直勒克斯指的是垂直明视照度 E_v ，水平勒克斯指的是水平明视照度 E_h 。

人本照明设计相关的计算公式

对于任何给定的室内环境，有几种计算方法和步骤可用来计算人本照明方案。该过程依赖于上面讨论的概念，包括 Melanopic Ratio (MR) 和等价褪黑激素照度 (EML)。该过程出于对灯具的考虑而使用特定的数据，例如照度和光谱功率分布 (SPD)。Luminus 推荐以下计算方法：

步骤 1. 确定灯光设计标准

WBS 建议在人眼高度 (大约离地面 1.2 米或 4 英尺) $EML \geq 200 \text{ lux}$ 。在设计好照明方案之前，您无需计算目标 EML，设计人员只需遵循 WBS 指南即可。

作为参考，计算 EML 的公式是：

$$EML = K_M \int_{380}^{780} M(\lambda) E(\lambda) d\lambda$$

$K_M = 832.4 \text{ lm/W}$ 是功率 (W, 瓦特) 到光通量 (lm, 流明) 的转换系数

$M(\lambda)$ 是归一化的褪黑激素加权函数

$E(\lambda)$ 是视线水平上的光谱辐照度，表示为 W/nm-m^2

步骤 2. 设计照明方案

传统照明方案仅计算水平勒克斯，但是满足 WBS 的 HCL 设计还必须考虑垂直勒克斯 (垂直明视照度)。首先，您必须确定照明方案在该建筑空间中的发光强度分布†。一个方案可以使用许多不同类型的灯具，在这个例子，我们只使用一种类型。请考虑使用照明设计软件 (如 DIALux) 来计算建筑空间中的空间分布和纵横照度比 (vertical-to-horizontal illuminance ratio)，我们称之为 R_{VH} ：

$$\text{纵横照度比, } R_{VH} = E_V / E_H$$

E_V = 垂直明视照度, 或 垂直勒克斯

E_H = 水平明视照度, 或 水平勒克斯

例如，请参阅第 23 页上的案例研究，计算出的嵌入式筒灯之 E_V/E_H 比为 0.42。因此，500 水平勒克斯具有与之相关联的 210 垂直勒克斯。

步骤 3. 选择可满足 HCL 属性所需的光源和 SPD

首先，您必须确定 MR 比，即昼夜节律刺激因子。至少有四种不同的方法可以计算光源的 MR 比 [5]，不同的组织推荐了不同方法，这些方法都是相关的，并且根据应用的具体情况同样有效。

Luminus 推荐 WELL 建筑标准中概述的方法。该方法根据以下公式，其中光谱函数被归一化，使得最大值为 1。计算 MR 比：

$$MR = K \frac{\int_{380}^{780} M(\lambda) P(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda}$$

$P(\lambda)$ 是光源的光谱功率分布

† 亮度/照度等的定义参见图5

$M(\lambda)$ 是归一化的褪黑激素加权函数[§]以 490 nm 为中心

$V(\lambda)$ 是归一化的明视加权函数，以 555 nm 为中心

$K = 1.219$ ，这是黑视和明视响应之间的转换因子，将辐照度转换为勒克斯

步骤 4. 计算 EML

计算该照明系统的 EML：

$$EML = E_v \times MR$$

步骤 5. 比较结果

确定您选择的照明系统是否符合昼夜节律有效照明设计标准，EML 是否满足步骤 1 中选择的标准(在此案例中，EML 需满足 ≥ 200 lux)？

现今实现人本照明的普遍方案

透过市场上现有的 LED 产品生态链，您可以快速实现最基本的人本照明解决方案。Luminus 的中功率 LED 用于分布式照明，COB 用于定向照明，两者皆实现限定 CCT 的技术。动态 COB 产品提供了简单的 CCT 选择范围，3000 → 1800 K 或 4000 → 2700 K。这些产品使用标准调光器开关控制 CCT，已达到类卤素灯或亮度线性调整的功能，而不会降低产品的亮度表现。

人本照明全新创新方案：Salud™

理想情况下，人本照明提供 LED 的所有优势，例如控制、效率和耐用性，加上可支持人本照明设计的最新技术。最新的人本照明准则，要求暖光 CCT 附加高 CRI 和高 MR。上述这些条件，完美地集中在：Salud™ 以人为本的中功率 LED 3030-21C2——全球上第一款指定 MR 的 LED 产品。

Luminus 研发的最新成果 Salud™ LED 使设计人员能够满足褪黑激素照度目标，并使建筑物内的居民保持警觉和清醒，而无需使用 6500 K 或过度照明环境以达到所需的褪黑激素照度水平。凭借全光谱、高青光含量达到抑制褪黑激素分泌(图 14)和准确的显色性(最低 90 CRI)，Salud™ LED 在该系列暖光 CCT 中附加高 MR，以提供舒适、充满活力和色彩鲜艳的环境。

[§] 参考图 10 比较视觉(明视)和黑视反应曲线

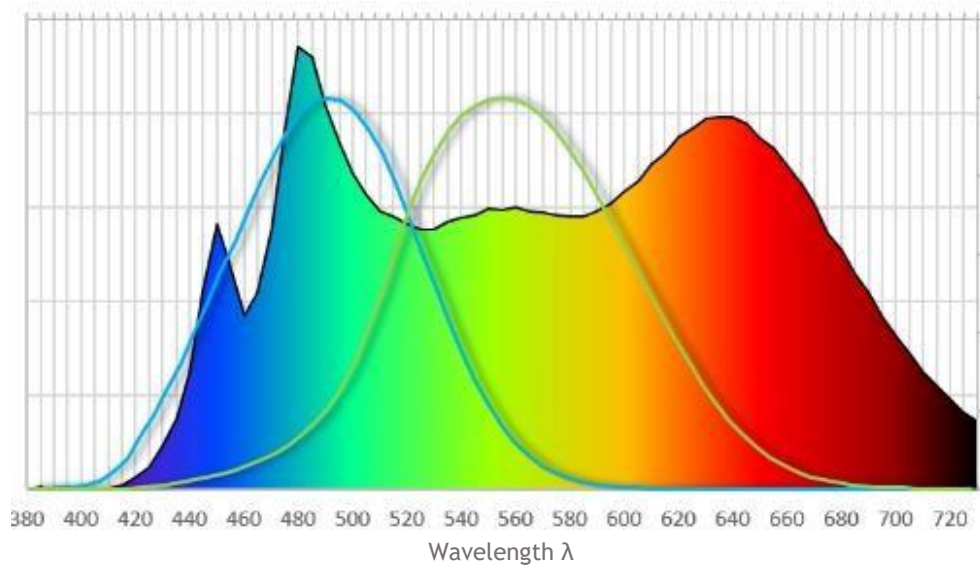


图 14 - 4000K Salud™ LED 的 SPD，以昼夜节律(蓝色)和视觉(绿色)响应曲线表示。Salud LED 提供足够的红光以实现准确的肤色渲染，并填充青光断层以增强与褪黑激素响应有关的光谱含量。

Salud™ 产品优势：

- 提供增强的青光光谱，而无需使用刺眼的蓝光 6500 K CCT
- 增强青光且无青光断层
- 减少眩光
- 无需过度照明
- 较少的灯具数量即可满足标准，同时节省电力(请参阅下面 4000 K 办公室案例研究)
- 比阳光更安全，没有近紫外线辐射
- 良好的显色性(Ra 90+)
- 出色的红光(高 R9)可实现准确的显色性，例如肤色
- 提供 3000 K、3500 K、4000 K 和 5000 K 版本



Salud™ 人本照明中功率LED
3030-21C2

表2 - Salud 中功率 LED 规格表*

CCT	产品型号	Typical MR	Minimum CRI	Typical R9	标准光通量 (lumens@45mA)
3000K	MP-3030-21C2-30-90	0.68	90	95	33
3500K	MP-3030-21C2-35-90	0.72	90	75	36
4000K	MP-3030-21C2-40-90	0.80	90	65	38
5000K	MP-3030-21C2-50-90	0.96	90	85	38

** Luminus 可提供白光产品的标准MR数值 (techsupport@luminus.com).

案例研究：Salud 4000K 办公室照明方案

照明设计师通常使用 4000 K、80 CRI，为员工创造兼顾工作效率和舒适度的办公室环境。过去 4000 K、80 CRI LED 照明计划需要 40 个嵌入式筒灯来照亮大型开放式空间，每个隔间座位的桌面均需要 500 勒克斯(水平勒克斯)。在此案例中， E_v/E_h 应为 0.42

然而，4000 K、80 CRI 的传统 LED 其 MR 比约为 0.67。如果使用一般的嵌入式筒灯*，其规格为 500 水平勒克斯，要达到 EML 标准，相关计算如下：

$$500 \text{ 水平勒克斯} \times 0.67 = 335 \text{ 水平褪黑激素照度(lux)} \quad \text{接下来}$$

$$\text{水平褪黑激素照度(lux)} \times 0.42 = 140 \text{ 垂直褪黑激素照度(lux)}$$

因此，要达到 500 水平勒克斯(或 210 垂直勒克斯)，需要 1.5 倍 (50%) 的灯具(60 个筒灯，而不是 40 个)，从而增加了成本。相比之下，使用 Salud 4000 K、90 CRI、MR 0.8 的 LED 只需要多 1.25 倍 (25%) 的灯具(例如，50 个筒灯)。使用 Salud 5000 K、90 CRI 和 0.96 MR，只需要 42 个筒灯即可满足 EML 标准要求。

筒灯方案	筒灯数量	工作檯照度	MR比	水平褪黑激素照度	垂直褪黑激素照度	附加成本	总结
标准4000K LED	40	500 x	=0.67	335	140	健康状况不佳	昏昏欲睡的员工 (占现今欧美办公室~80%)
标准4000K LED 过亮照明	60	750 x	=0.67	500	210	50% 照明成本	刺眼、员工资本支出、高电费、员工要戴太阳眼镜
Salud 4000K	50	625 x	=0.8	500	210	25%	员工在舒适环境活力充沛
Salud 5000K	42	525 x	=0.96	504	212	5%	理想的解决方案，员工健康且生产力高 (对部分设计师而言，色温可能太冷)

*假设每个嵌入式筒灯都提供相同的光通量输出 (流明)

请注意，每个应用的转换系数都不同，取决于光源、墙壁反射率和给定环境的其他细节。对于此案例，我们使用 Rensselaer/LESA 计算值 0.42。照明设计软件通常根据案例不同去计算系数。典型筒灯安装的 E_v/E_h 接近 0.42 (例如，UL24485 标准使用 0.45)。

结论

现代人仍在探讨人工照明如何影响我们的身体和健康，LED 技术将继续演进，帮助建筑师、工程师、设计师和日常消费者们创造能促进人类健康和生产力的室内环境。随着对人本照明的认识，在评估照明方案时，褪黑激素照度变得与 CCT 和 CRI 一样重要。我们的身体在白天需要更高的褪黑激素照度；使用 LED 光谱中的勒克斯水平和 MR 可以轻松计算褪黑激素照度。

创建基本的人本照明方案需要选择具有适当 CCT 的灯具，例如：Luminus CCT-tunable LED。在晚上，当人们准备入睡时，2200-2700 K 的 LED 有助于放松。对于白天，较冷的 CCT LED (例如 4000 K) 可提高警觉性。WELL 建筑标准中的 MR，是创建人本照明方案要遵循的主要指南之一。

然而，以前的 LED 在满足 WBS 要求时，常受限于其性能，因此需要使用 6500 K 非常凉爽的蓝色光，但大多数人不喜欢在这种类型的光下工作。事实上，设计师和建筑师通常使用 4000 K 左右。典型的 LED 具有青光断层，这使得设计师需要过度照明以确保舒适的环境，同时仍能满足最低要求的 MR。

Salud LED 是一突破性的解决方案：因为它填补了青光的间隙，满足 WBS，而无需在室内和办公环境中使用不舒服的超冷 CCT 灯。这款日间 LED 具有高 MR、较低的光输出和出色的 CRI。Salud 帮助照明工程师达到昼夜节律之相关标准，帮助人类提升生产力、舒适度和幸福感。

参考文献

- [1] American Academy of Sleep Medicine Board of Directors; Watson, N.F., et al., "Confronting Drowsy Driving; the American Academy of Sleep Medicine Perspective," *Journal of Clinical Sleep Medicine*, vol. 11, no. 11, pp. 1335-6, November 2015.
- [2] Centers for Disease Control and Prevention : National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), "The Color of Light Affects the Circadian Rhythms," [Online]. Available : <https://www.cdc.gov/niosh/emres/longhourstraining/color.html>. [Accessed 01 March 2021].
- [3] J. K. H. D. Y. Dolijansky, "Working under daylight intensity lamp : an occupational risk for developing circadian rhythm sleep disorder ?," *Chronobiology International*, vol. 22, no. 3, pp.597-605, 2005.
- [4] WELL Building Standard, Feature 54, "Circadian Lighting Design," [Online]. Available : <https://standard.wellcertified.com/light/circadian-lighting-design>. [Accessed April 2021].
- [5] J. Wood, "M/P ratios - Can we agree on how to calculate them ?," 27 November 2019. [Online]. Available : <https://www.ies.org>. [Accessed 23 April 2021].