

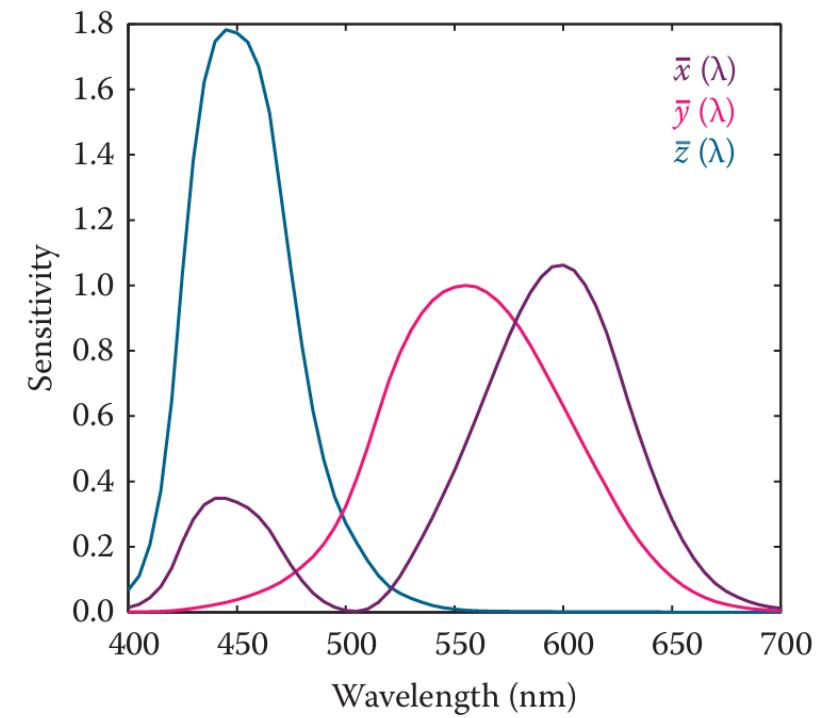
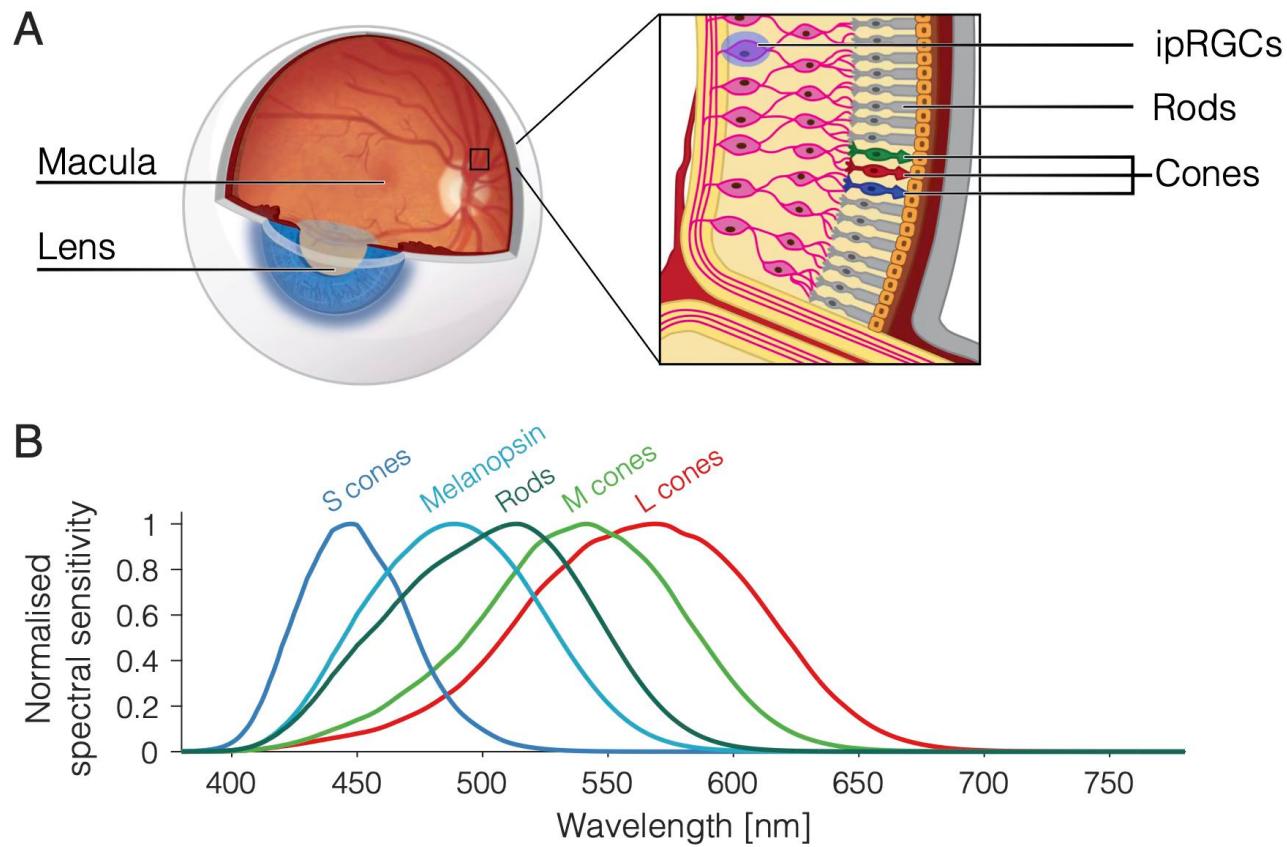
色彩

Lecture 2 - Color

布朗尼蛋糕

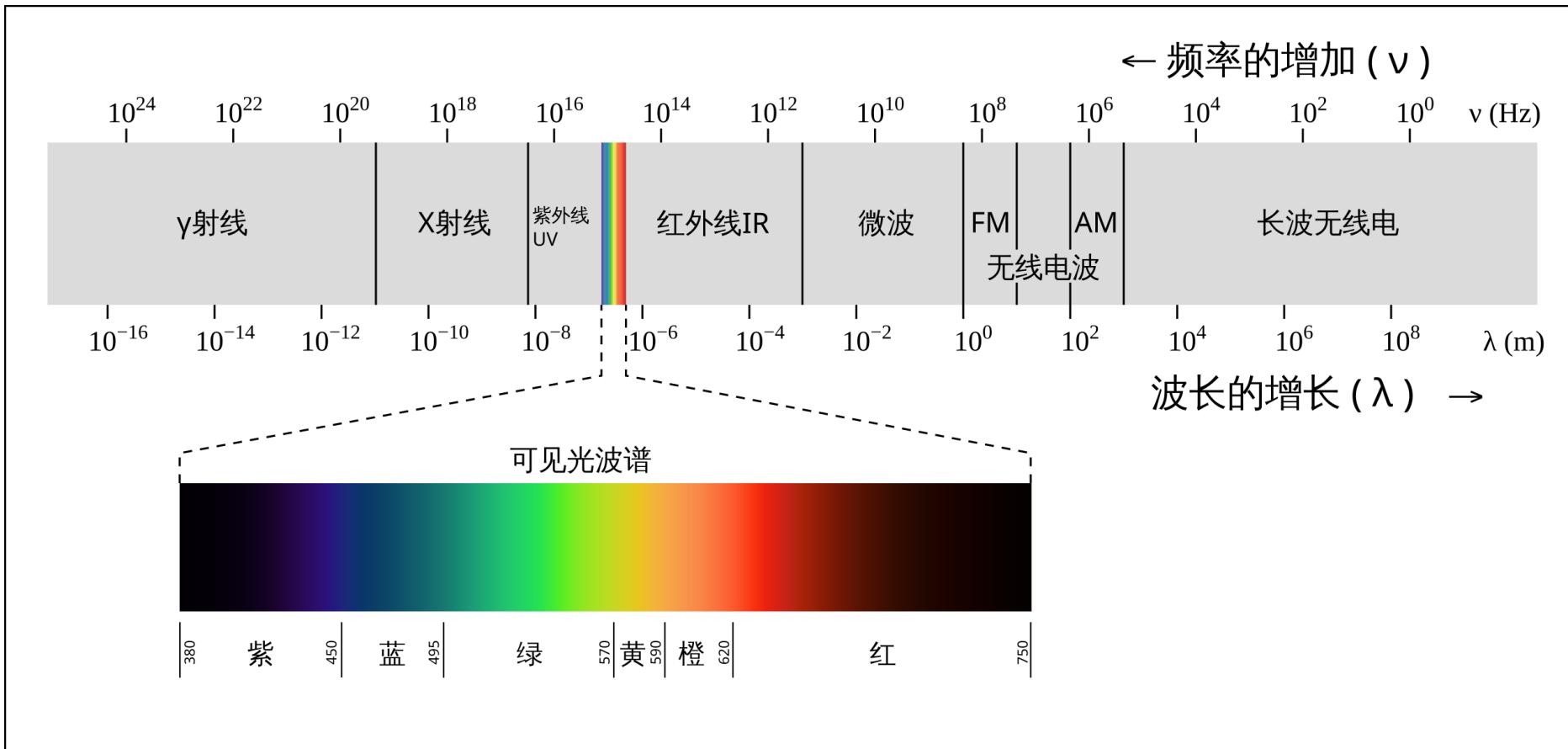
Light

- 能引起人眼视觉效应的电磁波，一般在 380 – 750 nm。



Light

- 能引起人眼视觉效应的电磁波，一般在 380 - 750 nm。



颜色模型：减色法模型

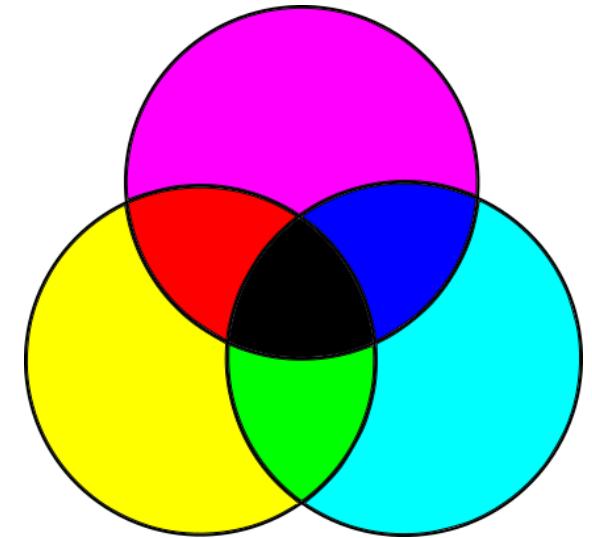
- 在现实中使用的水彩 (crayon)。
- 减色法模型 (Subtractive Color Model)。
- 混合三种基色后，得到黑色。

三种基色

青色 (cyan, C)、品红色 (magenta, M)、黄色 (yellow, Y)

混合了三种颜色之后，会产生某种较暗的颜色，但不是完全的黑色。

于是添加一种纯黑色 (black, K)，最终得到 CMYK 模型。



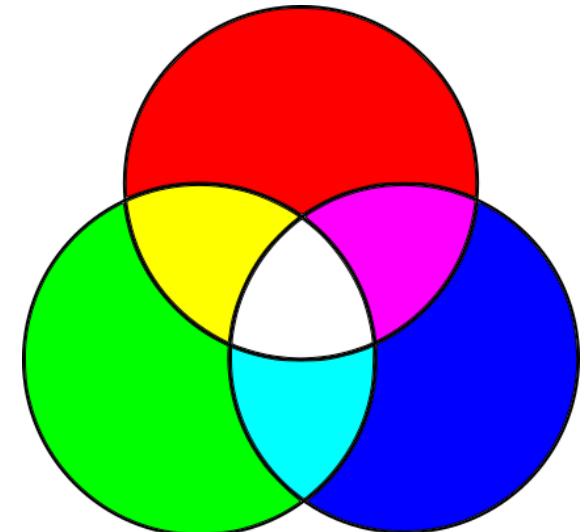
颜色模型：加色法模型

- 在计算机中的颜色表示。
- 加色法模型 (Additive Color Model)。
- 混合三种基色后，得到白色。

三种基色

红色 (red, R) 、绿色 (green, G) 、蓝色 (blue, B)

这就是 **RGB** 模型。



Representing Color

- RGB 模型，加色法。
- 任何一种颜色 \vec{c}_i 都可近似地表示为 $\vec{c}_i = (r_i, g_i, b_i)$
- 所有颜色 $\vec{c}_i \in R^3$ 可构造一个 RGB 颜色空间 (color space)

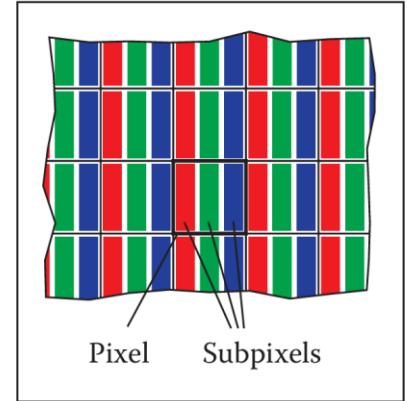
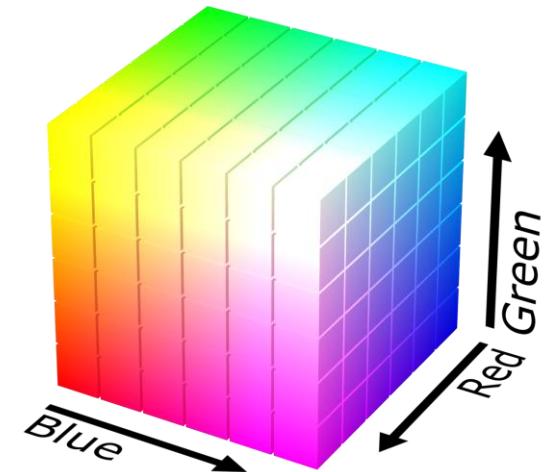


Figure 3.2. The red, green, and blue subpixels within a pixel of a flat-panel display.



Representing Color

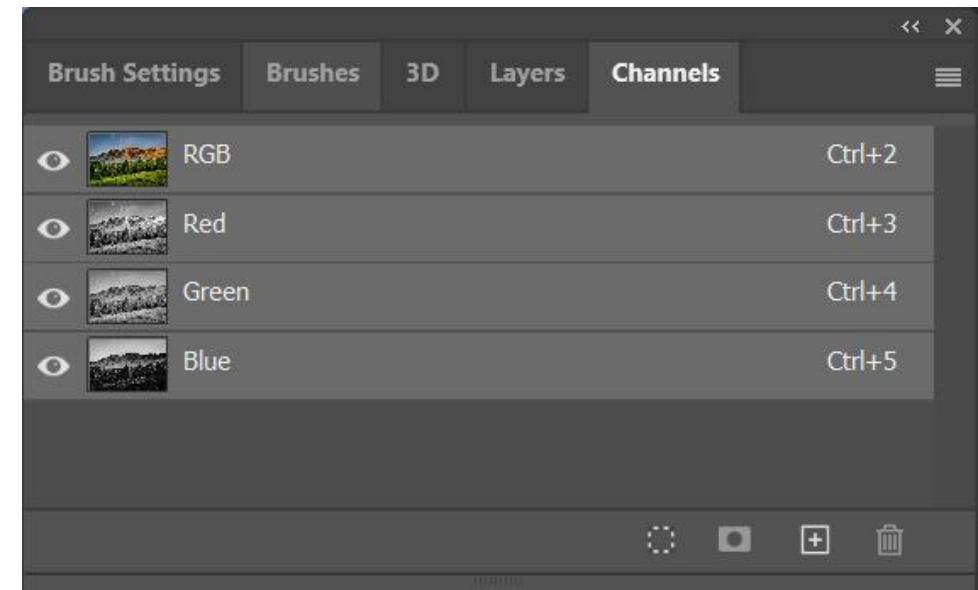
计算机的颜色表示分为 3 个通道 (channel) , 分别为 R, G, B。

- 存储结构: 0-1 序列

8-bit : 00000000 ~ 11111111

每个通道分配 8 位, 则 RGB 总共 24 位。

24 位色深 (color depth) 最多可表示 $2^8 \cdot 2^8 \cdot 2^8 = 2^{24} = 16,777,216$ 种颜色。



右图: Adobe Photoshop 中的颜色输出及其 R, G, B 通道。

Representing Color

格拉斯曼定律 (Grassman's Law)

- 人眼对颜色的感知大约是线性的。 (linearity)

根据以上定律，可推理出对颜色的线性操作。

两种颜色的混合规律：

$$(r_1, g_1, b_1) + (r_2, g_2, b_2) = (r_1 + r_2, g_1 + g_2, b_1 + b_2)$$

颜色的强度规律：

$$k \cdot (r, g, b) = (k \cdot r, k \cdot g, k \cdot b)$$



Representing Color

24 位色深：每通道 0~255

为了做归一化 (normalization)，需要除以 255。

例如纯红色： $R = (\frac{255}{255}, 0, 0) = (1, 0, 0)$ 。

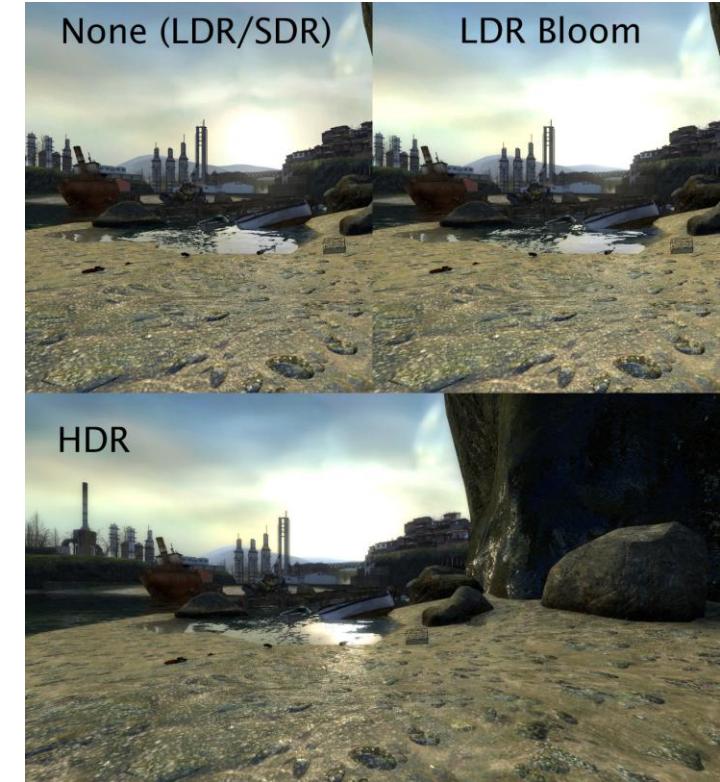
若超出范围，则需要钳制 (clamp) 到 1。 (普通显示器会要求这样)

高动态范围 (HDR) 与标准动态范围 (LDR/SDR)

SDR 使用整数，例如刚刚举例的就是 24 位整数；并且表示范围固定在 [0, 1]。

HDR 一般使用浮点数，并且表示范围并不限制在 [0, 1]。

Case Study: HDR 显示器能较为准确地表达很亮的部分。



Representing Color

- 1-bit grayscale—text and other images where intermediate grays are not desired (high resolution required);
- 8-bit RGB fixed-range color (24 bits total per pixel)—web and email applications, consumer photographs;
- 8- or 10-bit fixed-range RGB (24–30 bits/pixel)—digital interfaces to computer displays;
- 12- to 14-bit fixed-range RGB (36–42 bits/pixel)—raw camera images for professional photography;
- 16-bit fixed-range RGB (48 bits/pixel)—professional photography and printing; intermediate format for image processing of fixed-range images;
- 16-bit fixed-range grayscale (16 bits/pixel)—radiology and medical imaging;
- 16-bit “half-precision” floating-point RGB—HDR images; intermediate format for real-time rendering;
- 32-bit floating-point RGB—general-purpose intermediate format for software rendering and processing of HDR images.

常用颜色表示格式参考：

Color Conclusion

- 人眼在现实感知色彩**

三种视锥细胞，对应三种不同的基色（对不同波长的感应程度）。

- 计算机能表达的色彩**

CMYK 模型与 RGB 模型；

颜色空间 (color space) ；

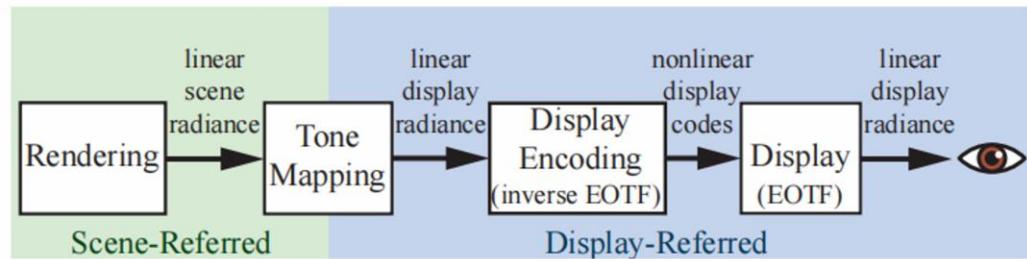
格拉斯曼定律 (Grassman's Law) ；

HDR 与 SDR；

Tone Reproduction

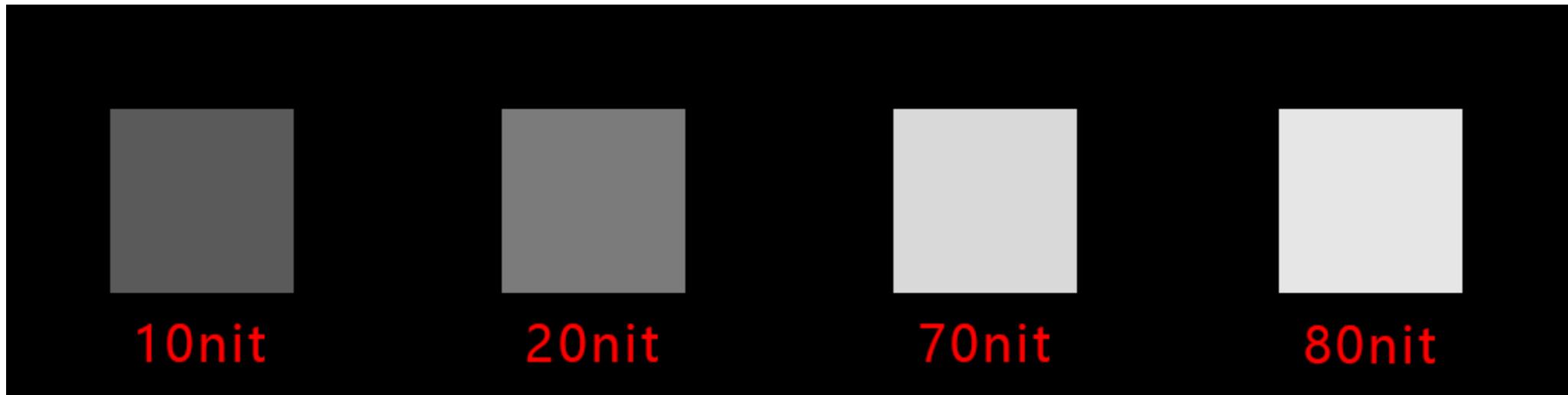
- 从计算机模拟的世界到人眼感知的世界

人眼感知强度并非是线性的。



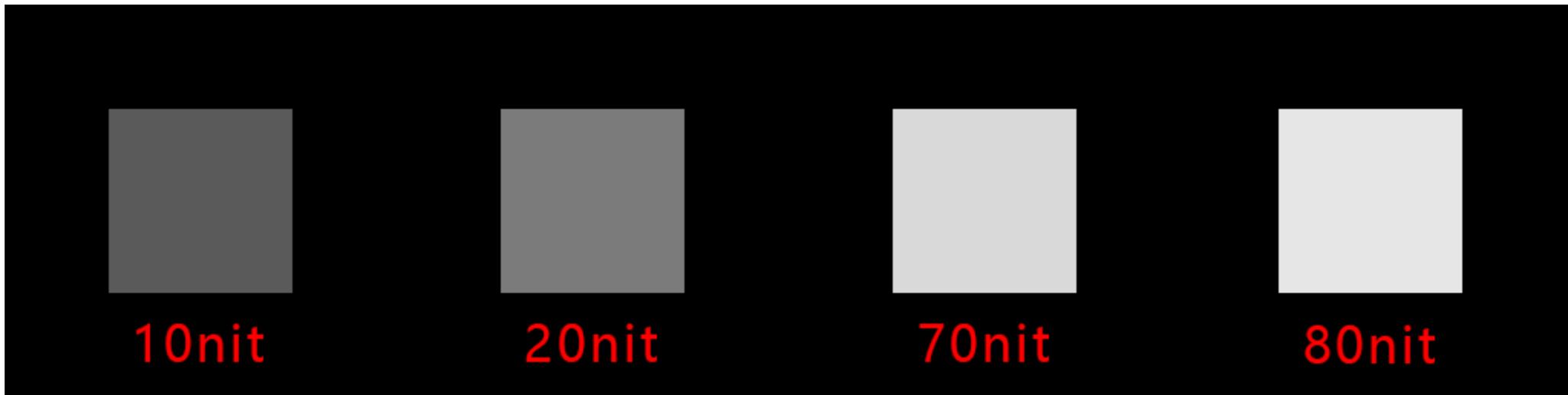
Perceptual Intensity

- 人眼对光强度的感知



Perceptual Intensity

- 很明显，人眼对较暗区域的变化更敏感。



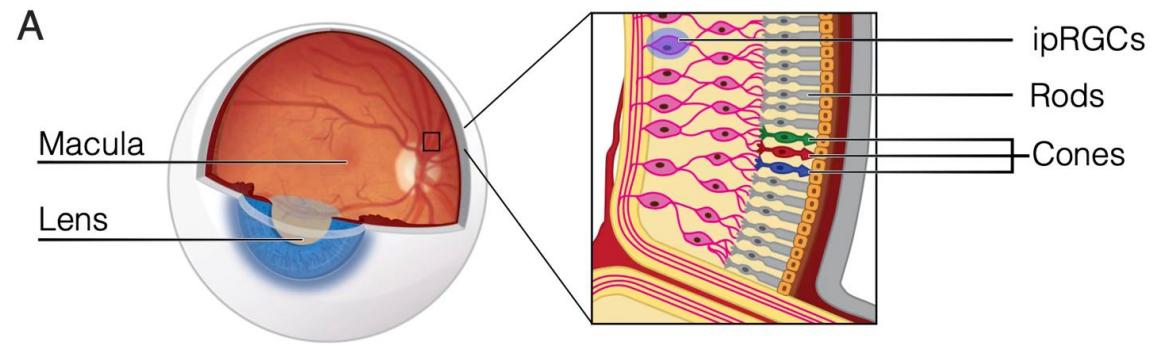
Perceptual Intensity

- 视锥细胞的颜色的感知近乎线性。

Grassman 定律

- 视杆细胞对强度的感知却不是线性的。

Stevens 指数定律

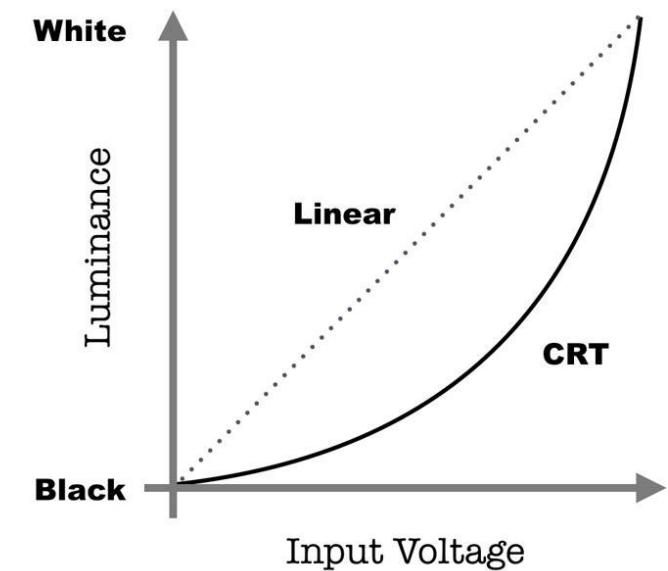
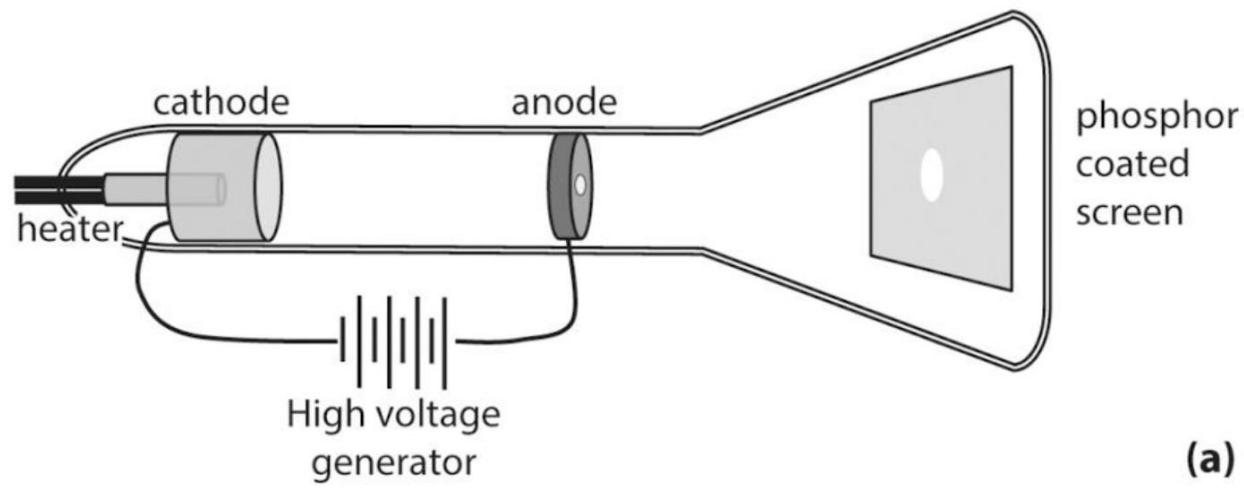


$$Perceived \propto \log(L)$$

Stevens' power law is an empirical relationship in psychophysics between an increased **intensity or strength in a physical stimulus** and the **perceived magnitude** increase in the sensation created by the stimulus. (来自 Wikipedia)

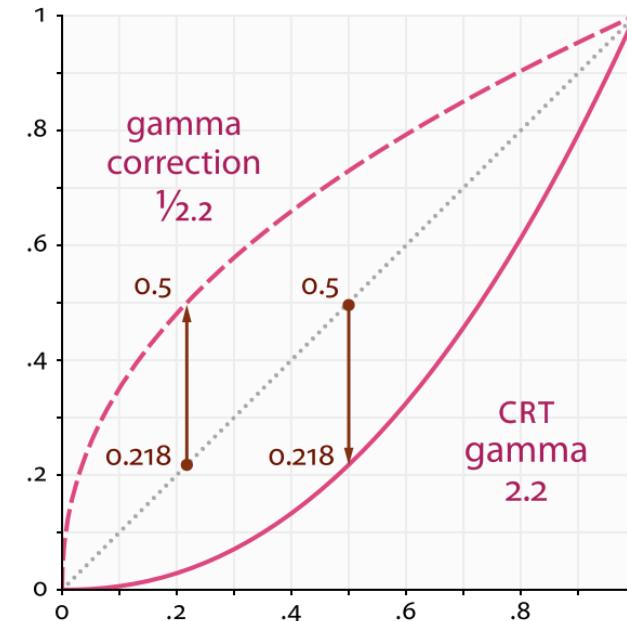
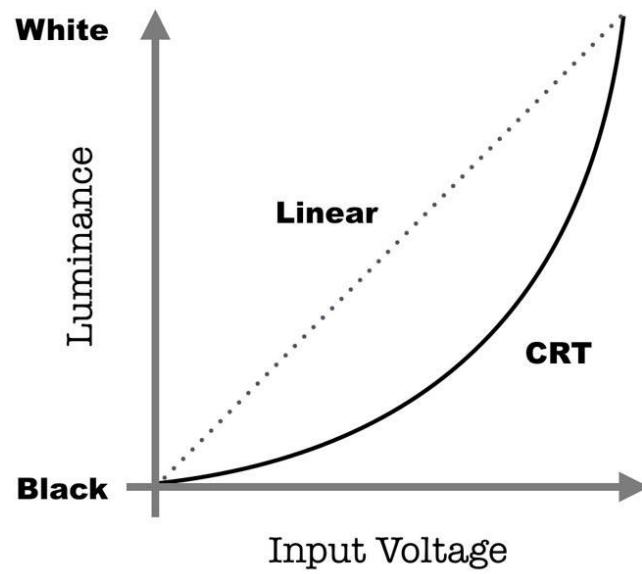
Perceptual Intensity

- CRT 显示器的电压响应曲线 $L = u^{2.2}$



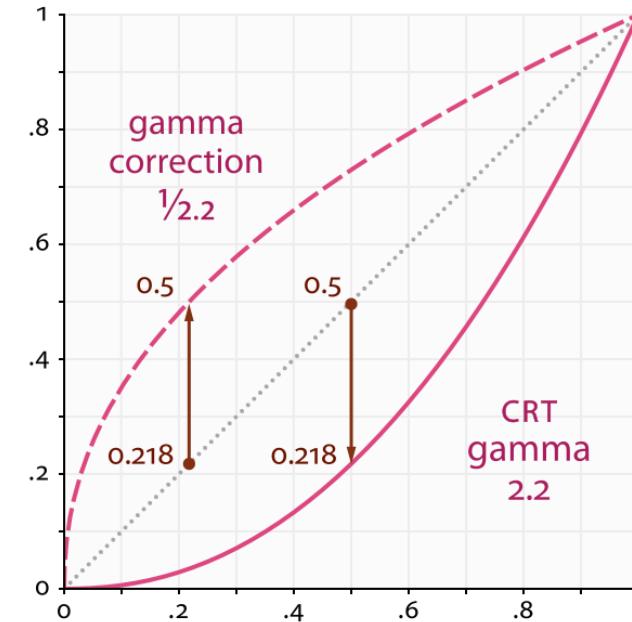
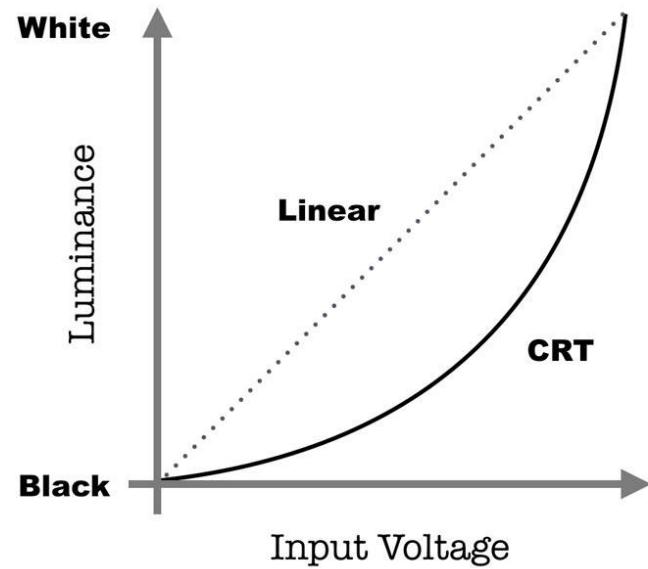
Perceptual Intensity

- 当电压线性增加时，低亮度的范围有更丰富的表示，正好符合人眼对暗部敏感的特点。
- 显示器光电转换函数 $L = u^{2.2}$ 被保留了下来，并且 $\frac{1}{2.2}$ 成为如今 Gamma 校正的标准。



Perceptual Intensity

- **Motivation:** 现代美术资产的生产流程中，美术为了看起来对直接拉高材质反射率。
- 这导致光照计算严重背离现实，因为输入的光照参数都是错的，反射模型再好渲染出来也是一坨。
- 虽然在老游戏（Source）大家都凭感觉，并不是很在意此类问题，但现在（Source 2）不行了。



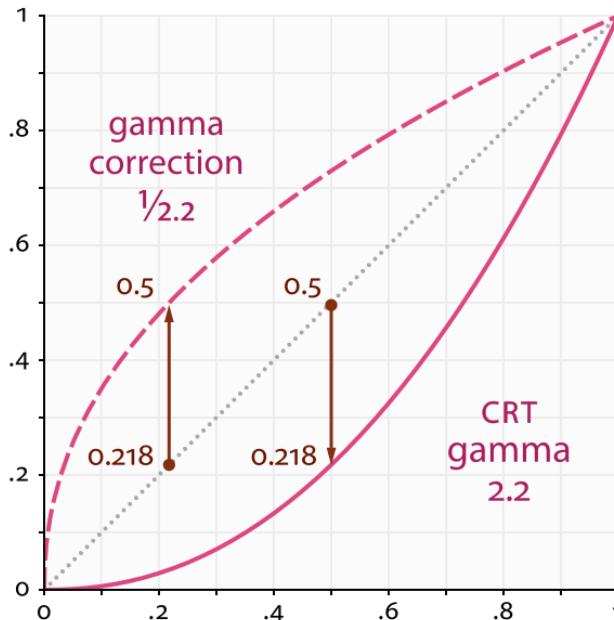
Perceptual Intensity

人眼 -> Gamma 空间

物理 -> 线性空间

Perceptual Intensity

Gamma 空间：为了让人看起来对而扭曲过的空间



Gamma 校正: $\text{pow}(x, 0.45)$

Tone Mapping

Tone Reproduction

- 在渲染管线内



色调映射前 (且未经 Gamma 校正)



色调映射后

Tone Reproduction

- 在渲染管线内



事实上，场景的全部光传输已经计算完毕！它们的光能是完全相等的！但为什么连亮度都看起来不一样？

Tone Reproduction

- 除了 Gamma 校正，还需要考虑原来 Linear HDR Radiance 的范围

颜色乘上光强很轻松就 > 1 了。还记得之前提到的 HDR 吗？

(3.5 和 7.0 在映射到显示器之后都是同样的亮白，导致结果过曝)

- Tone Mapping 使得后续显示器正常显示 HDR 的范围（不过曝）。

当然还有调色（大家常说的“滤镜”）

- Tone Mapping 发生在渲染器原始输出和 Gamma 校正之间。

不难发现：刚刚 CS2 的示例中，除了亮度之外，色调都明显不一样。



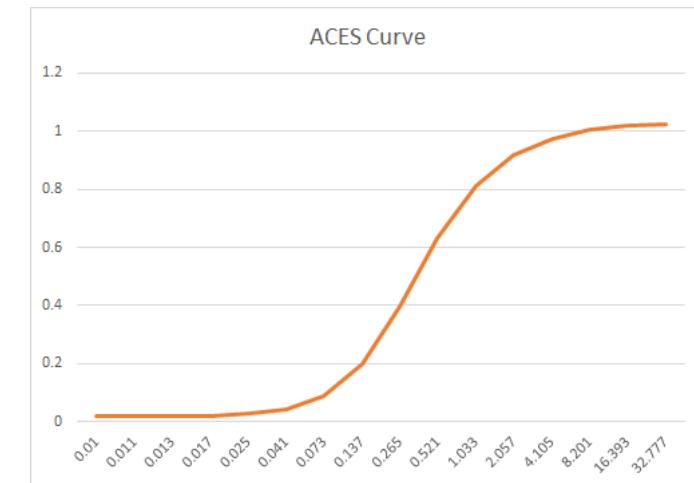
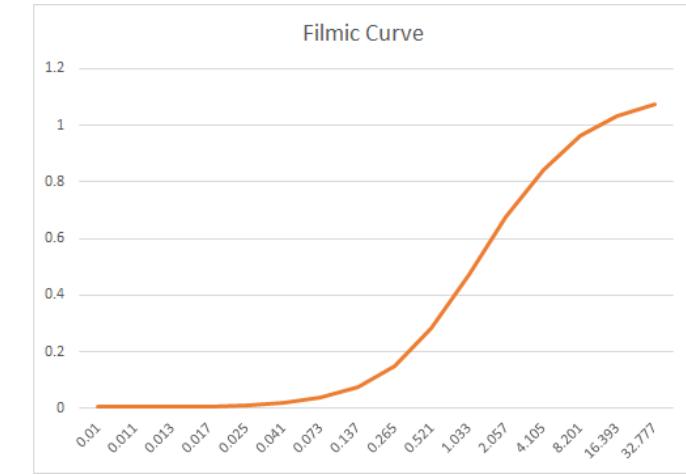
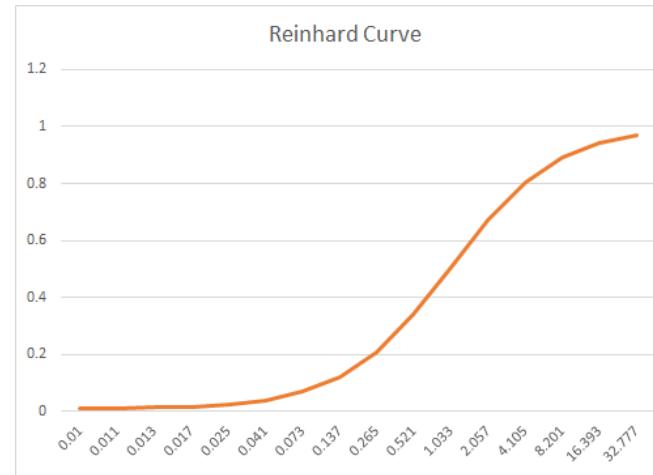
Tone Reproduction

- 作为调色工具的 Tone Mapping
- 全局色调映射 vs 局部色调映射

主流的几种：

1. Reinhard Tone Mapping
2. Filmic Tone Mapping
3. ACES (Academy Color Encoding System)

- 显示器也可能有自己的色调映射。



学院色彩编码系统（Academy Color Encoding System, ACES）是由美国电影艺术与科学学院（AMPAS）下属的科学技术委员会提出的，作为电影和电视行业色彩管理的建议标准。ACES 系统将场景到屏幕的转换过程分为两个部分。第一部分是参考渲染转换（reference rendering transform, RRT），它将场景参考值转换为一个与设备无关的、标准输出空间中的显示参考值，这个输出空间叫做输出颜色编码规范（output color encoding specification, OCES）。第二部分是输出设备转换（output device transform, ODT），它将来自 OCES 的颜色值，转换为最终的显示器编码。有许多不同的 ODT，每一个都是为特定的显示设备和观察条件而设计的。RRT 与适当的 ODT 组合在一起，便构成了整个转换过程，这种模块化的结构便于处理各种显示器类型和观察条件。对于那些需要同时支持 SDR 显示器和 HDR 显示器的应用程序，Hart [672]建议使用 ACES 色调映射变换。

虽然 ACES 最初是为电影和电视设计的，但它的转换过程在实时渲染中的应用越来越多。虚幻引擎[1802]默认启用了 ACES 色调映射，Unity 引擎[1801]也同样支持这一功能。对于 ACES RRT 和 SDR、HDR 的 ODT 转换过程，Narkowicz [1260, 1261]和 Patry [1359]都给出了廉价的拟合曲线。Hart [672]提出了一种 ACES ODT 的参数化版本，它可以支持许多显示设备。

Q&A