

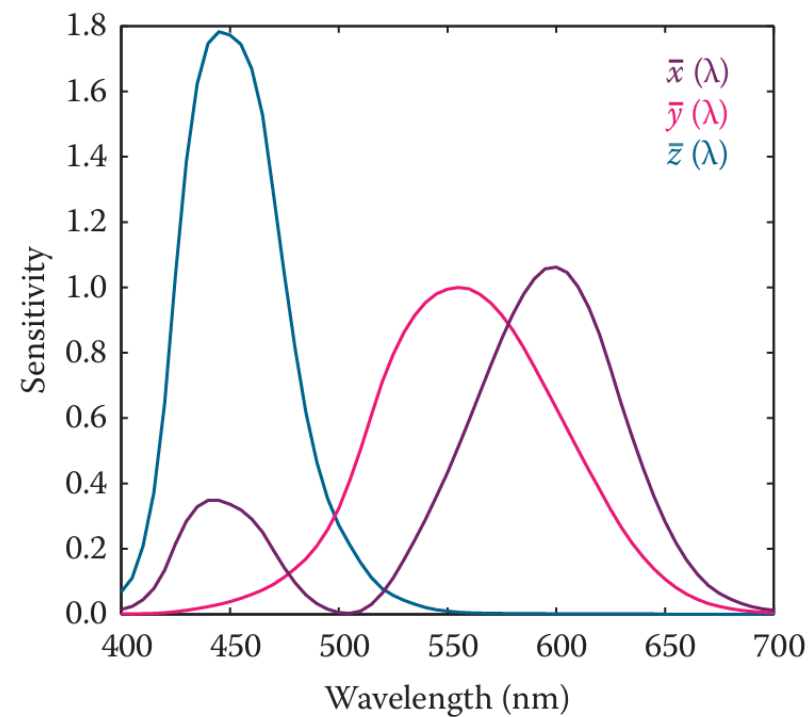
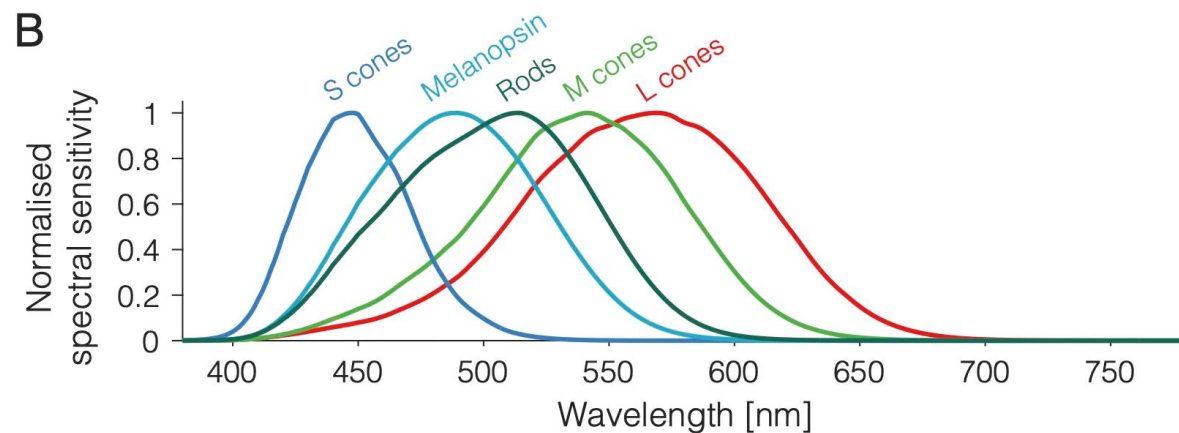
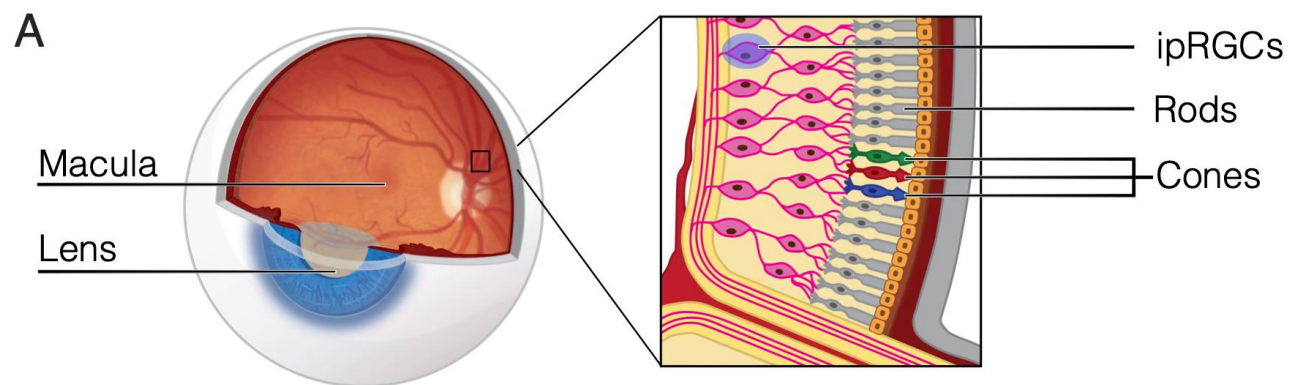
色彩

Lecture 2 - Color

布朗尼蛋糕

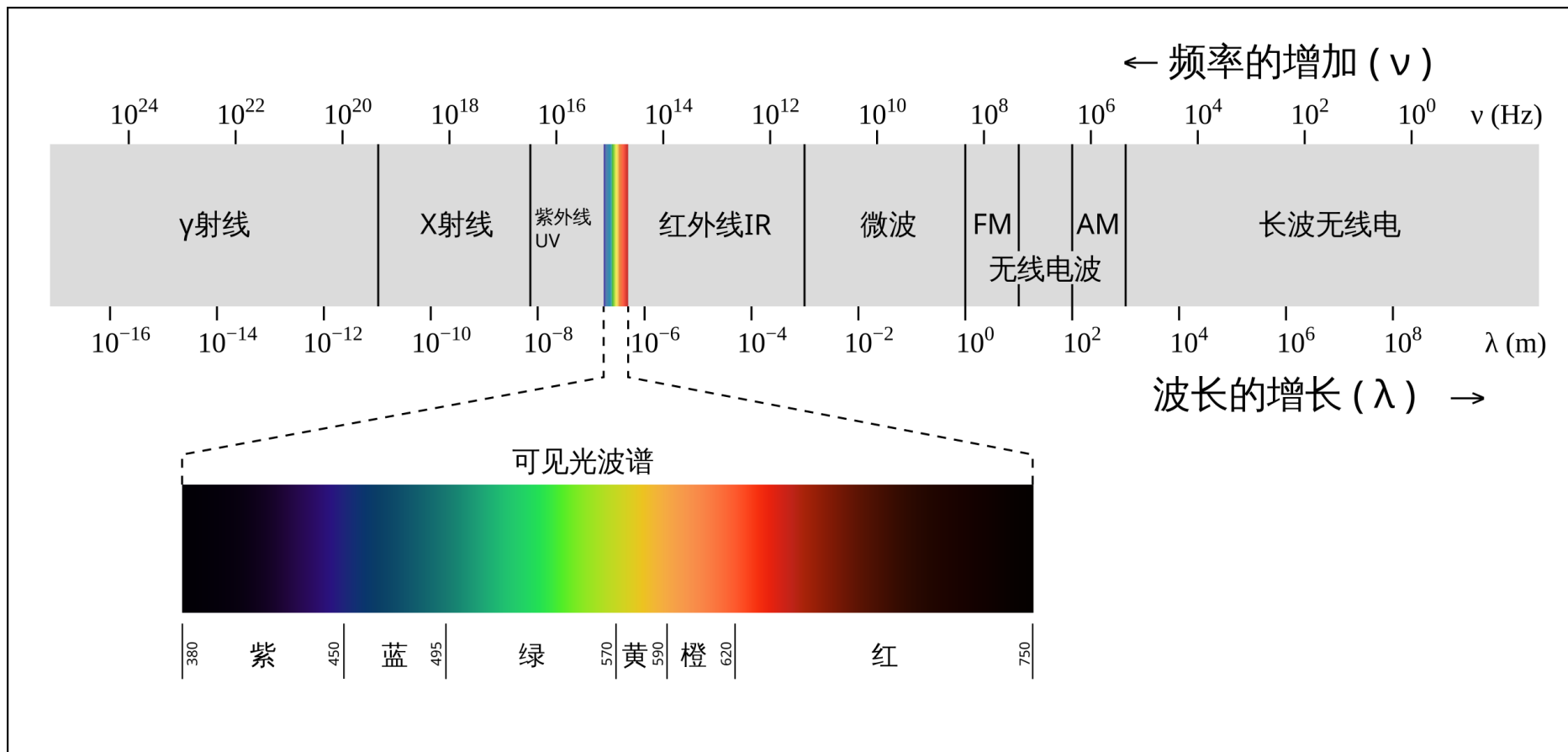
Light

- 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

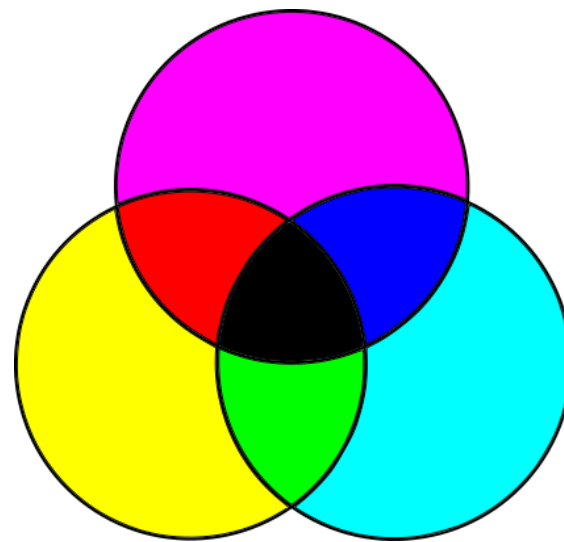
- 在现实中使用的水彩 (crayon) 。
- 减色法模型 (Subtractive Color Model) 。
- 混合三种基色后，得到黑色。

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 。



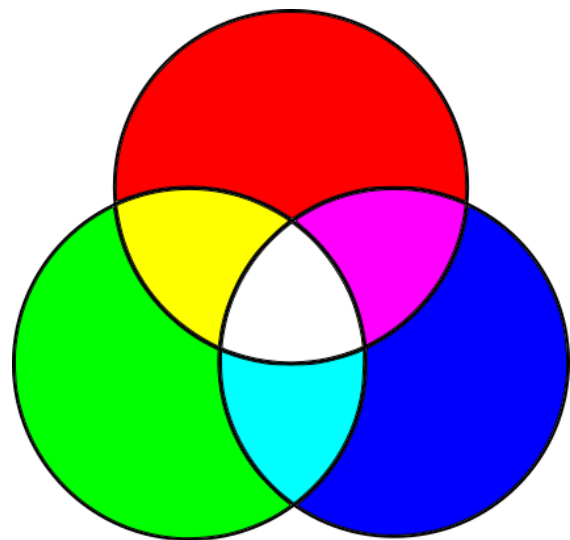
颜色模型：加色法模型

- 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)

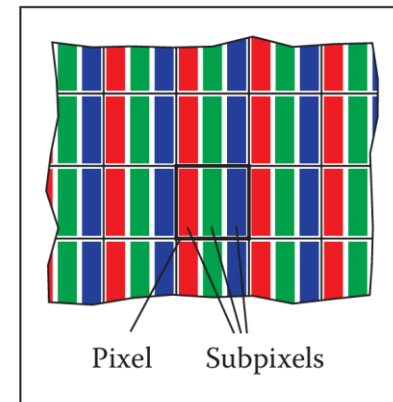
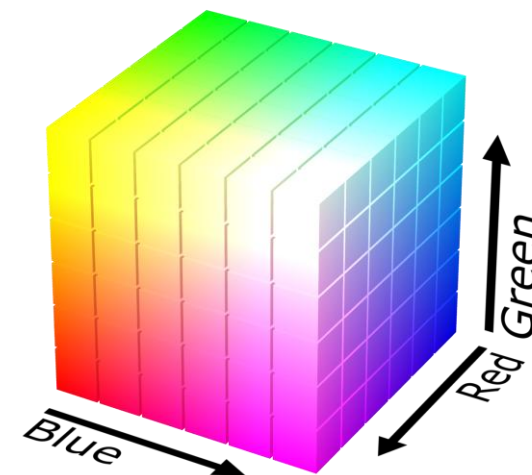


Figure 3.2. The red, green, and blue subpixels within a pixel of a flat-panel display.



Representing Color

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

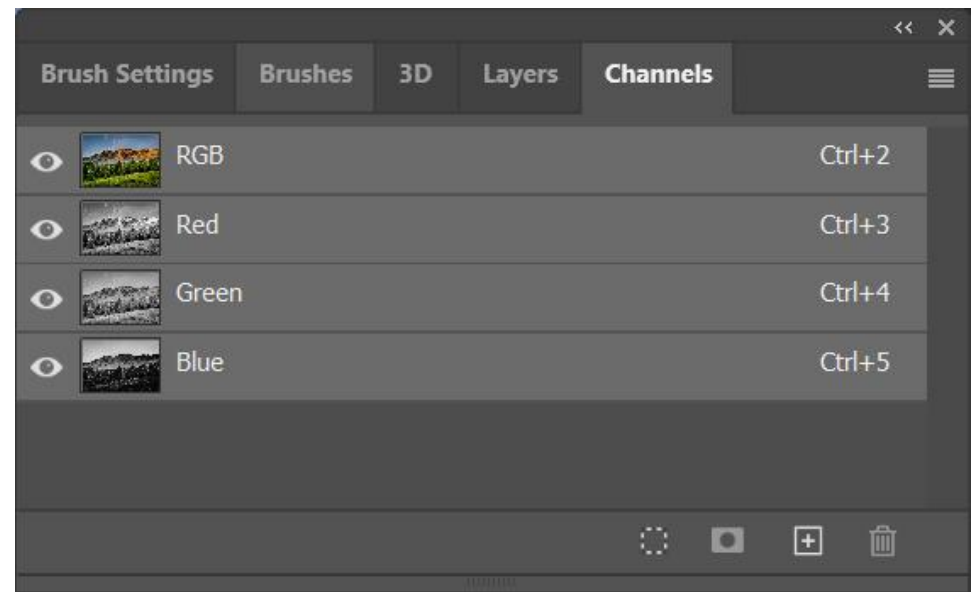
- **存储结构: 0-1 序列**

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: $R = (\frac{255}{255}, 0, 0) = (1, 0, 0)$ 。

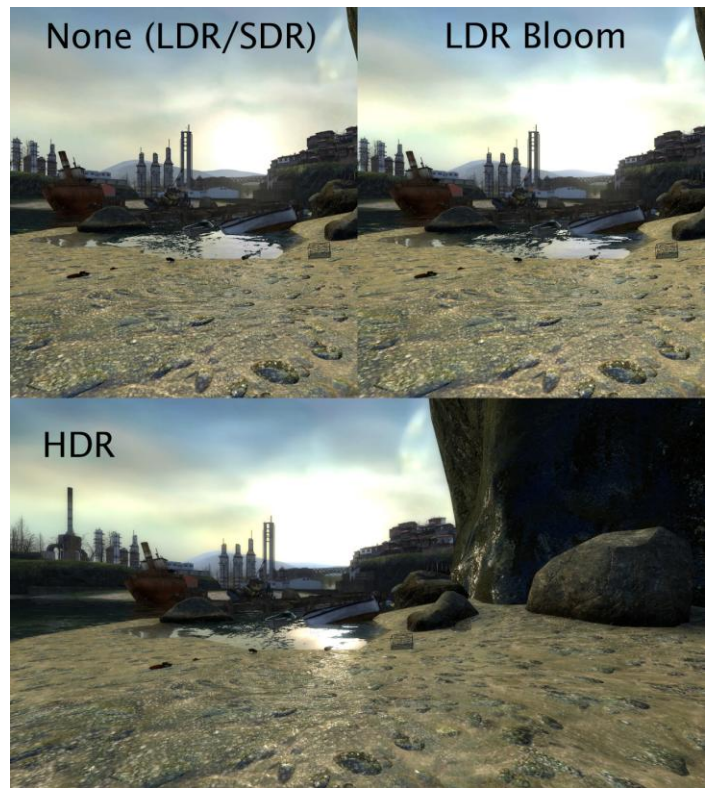
若超出范围, 则需要钳制 (clamp) 到 1。 (普通显示器会要求这样)

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

常用颜色表示格式参考：

- 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.

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；

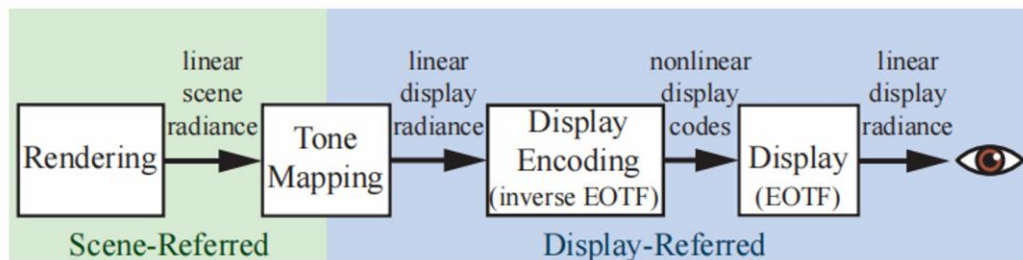
颜色空间 (color space) ；

格拉斯曼定律 (Grassman's Law) ；

HDR 与 SDR；

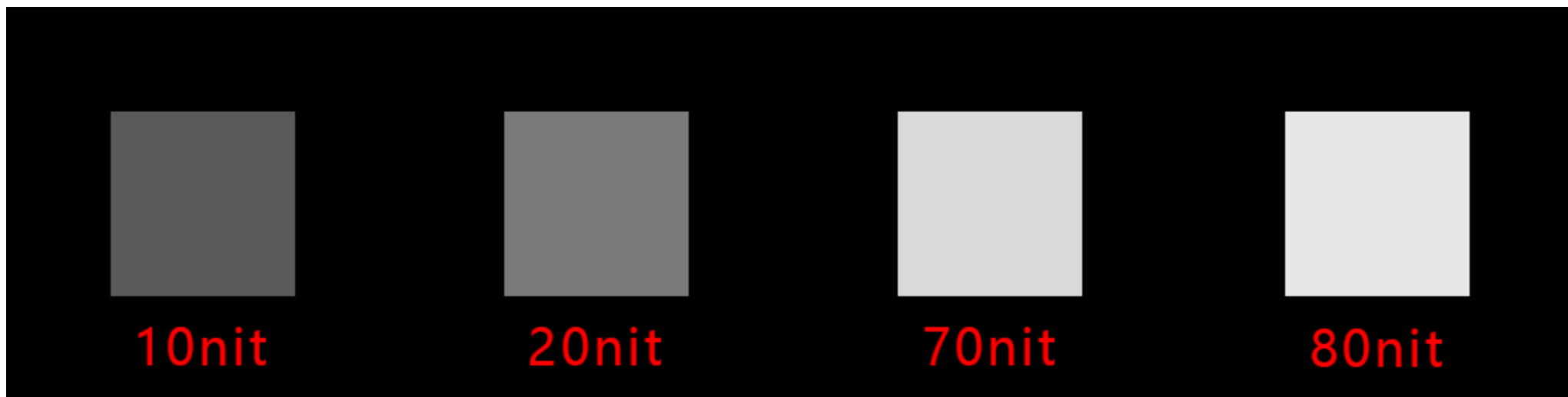
Tone Reproduction

- 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。



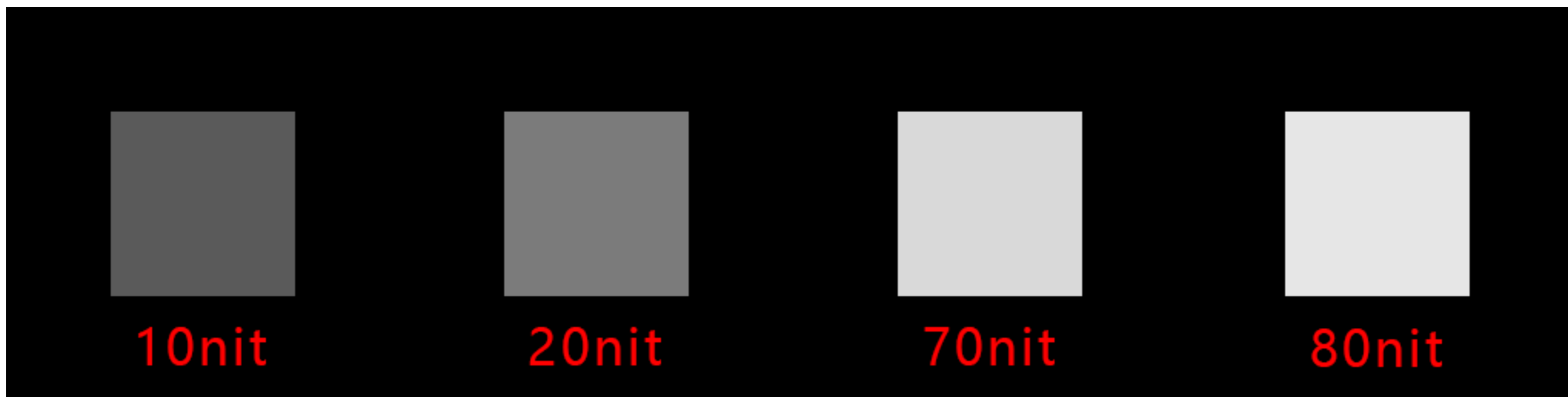
Perceptual Intensity

- 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。



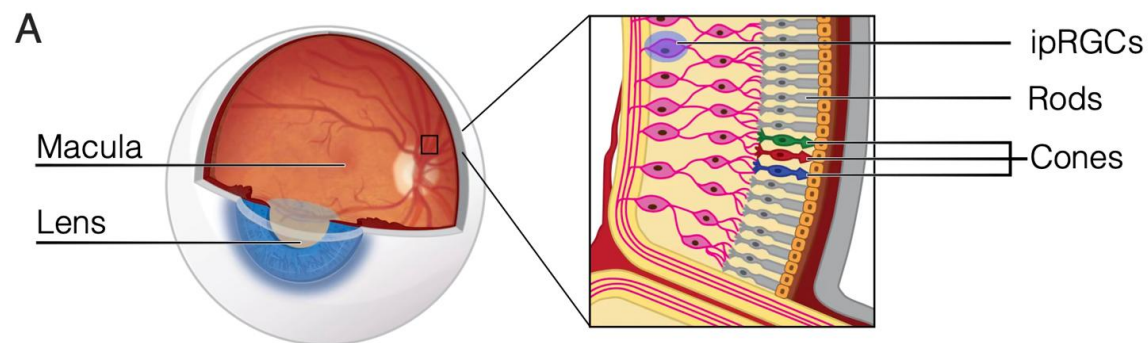
Perceptual Intensity

- 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

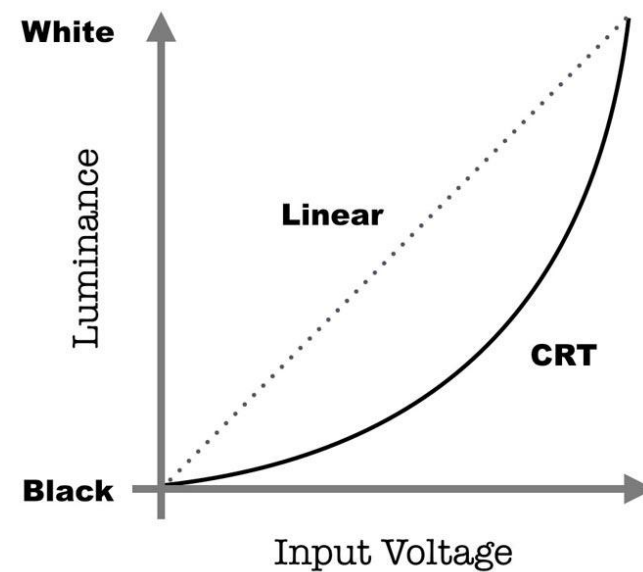
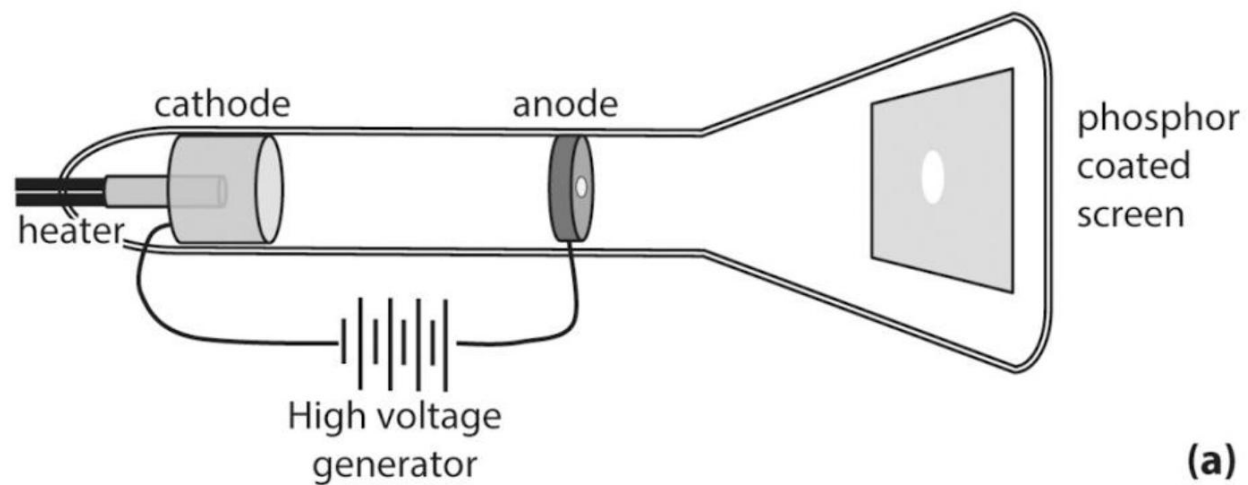


$$Perceived \propto \log(L)$$

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)

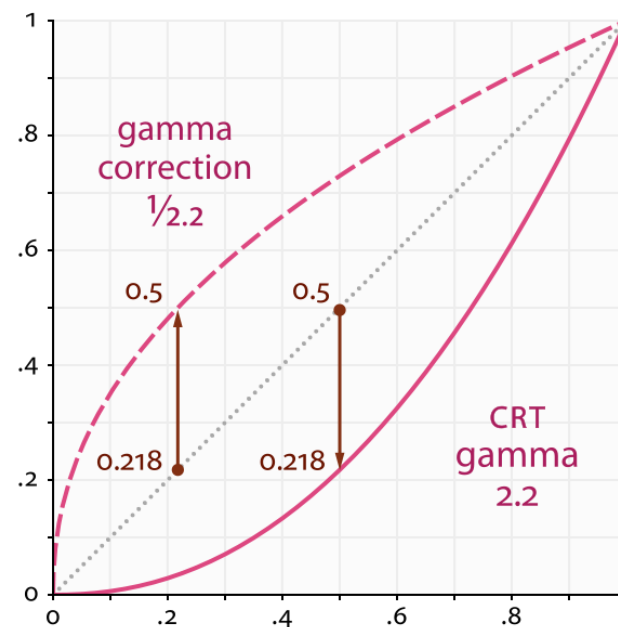
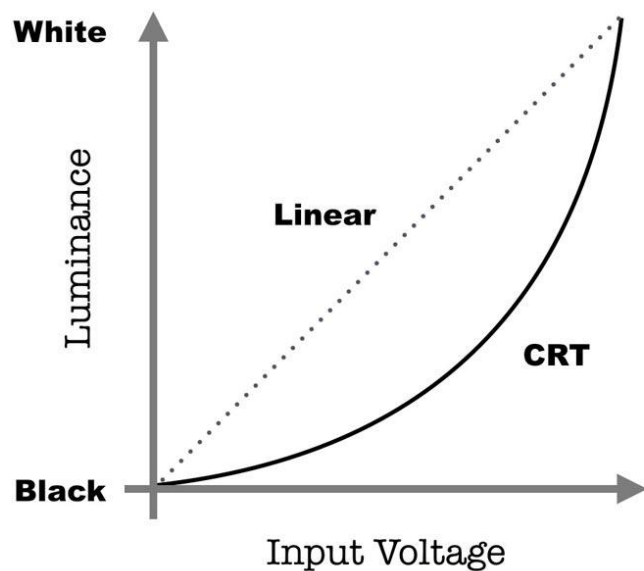
Perceptual Intensity

- CRT 显示器的电压响应曲线 $L = u^{2.2}$



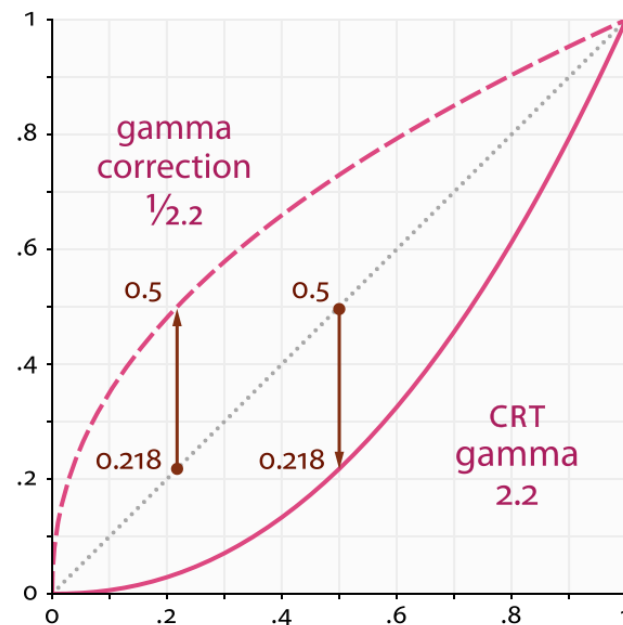
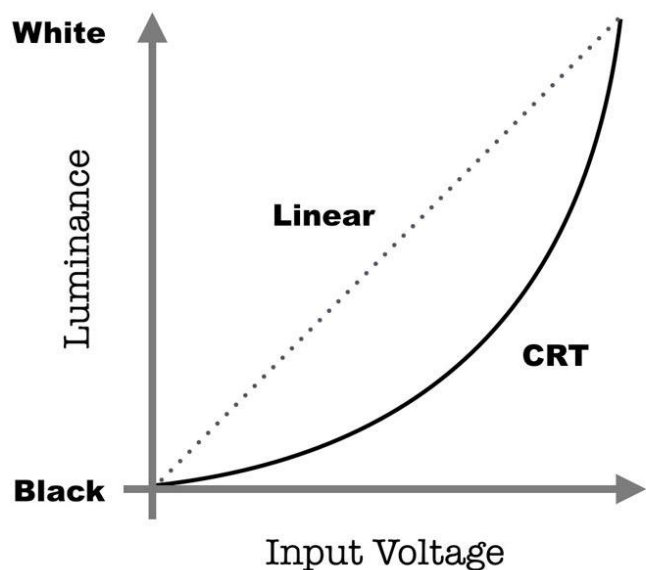
Perceptual Intensity

- 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。**



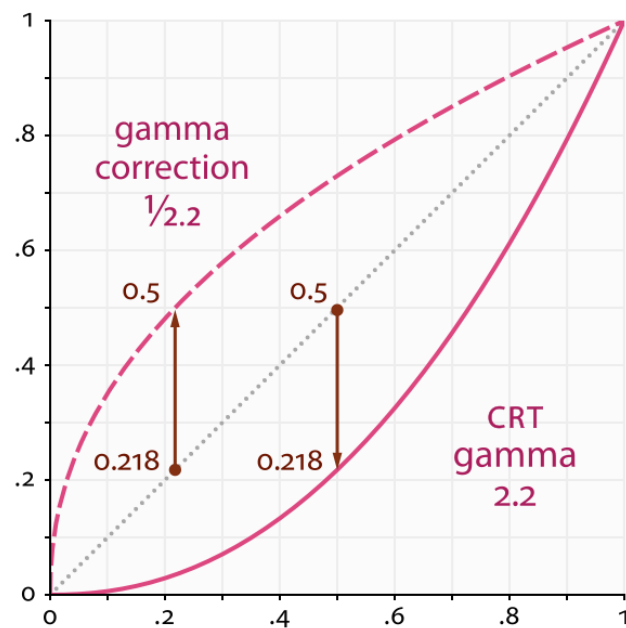
Perceptual Intensity

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。



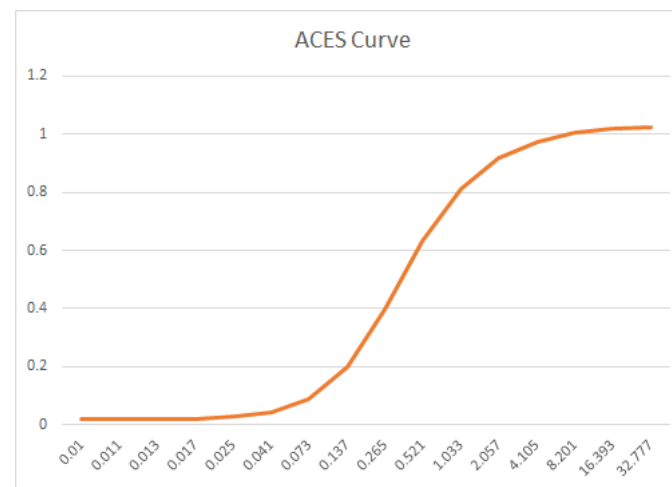
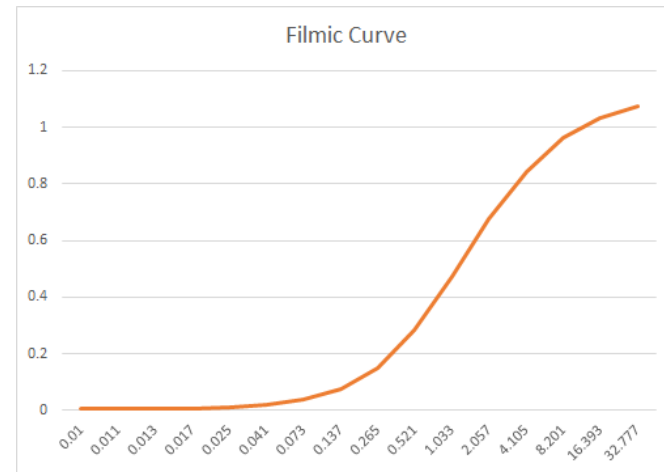
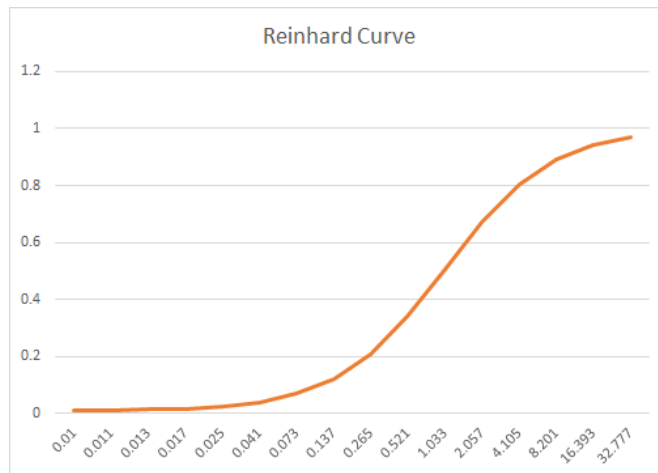
Tone Reproduction

- 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)

- 显示器也可能会有自己的色调映射。



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