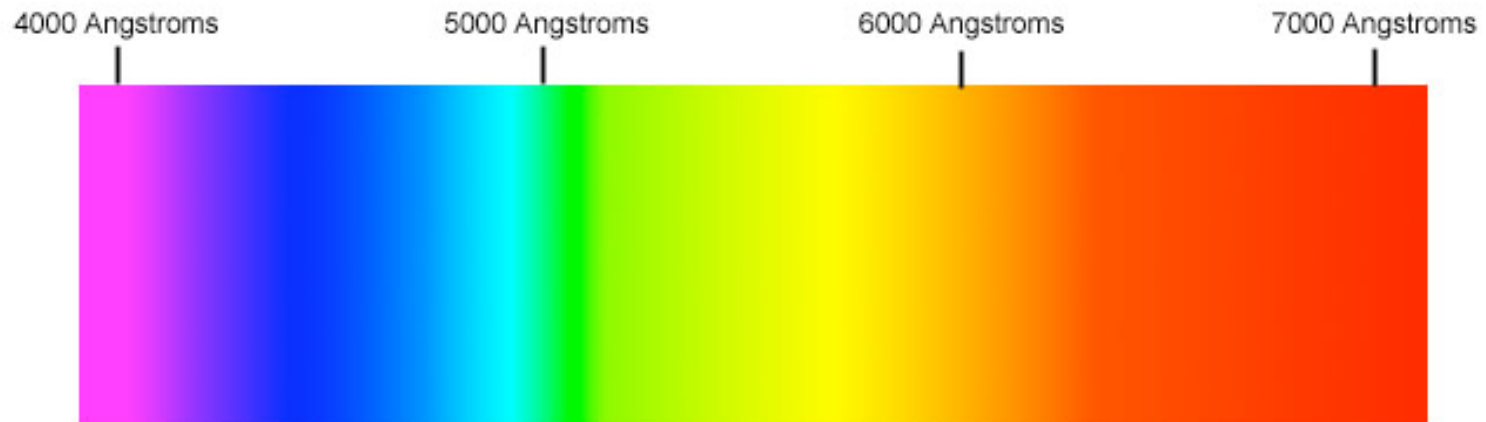


2006/6/8
UTAPセミナー

光の散乱と青空

樽家 篤史

Color of monochromatic light



波長 (nm)	10~ 380	380 ~ 430	430 ~ 460	460 ~ 500	500 ~ 570	570 ~ 590	590 ~ 610	610 ~ 780	780 ~1 mm
色相	紫外 線	紫	青	青緑	緑	黄	橙	赤	赤外 線

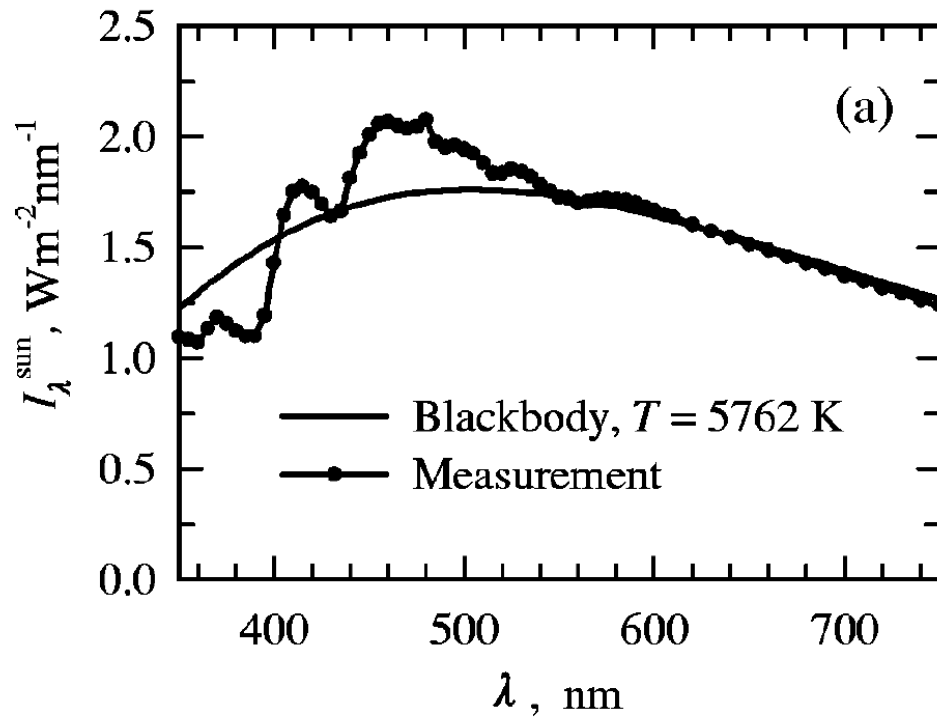
Human color vision and the unsaturated blue of the daytime sky

G.S.Smith, *Am.J.Phys.***73** (2005) 590

Spectral irradiance of sunlight

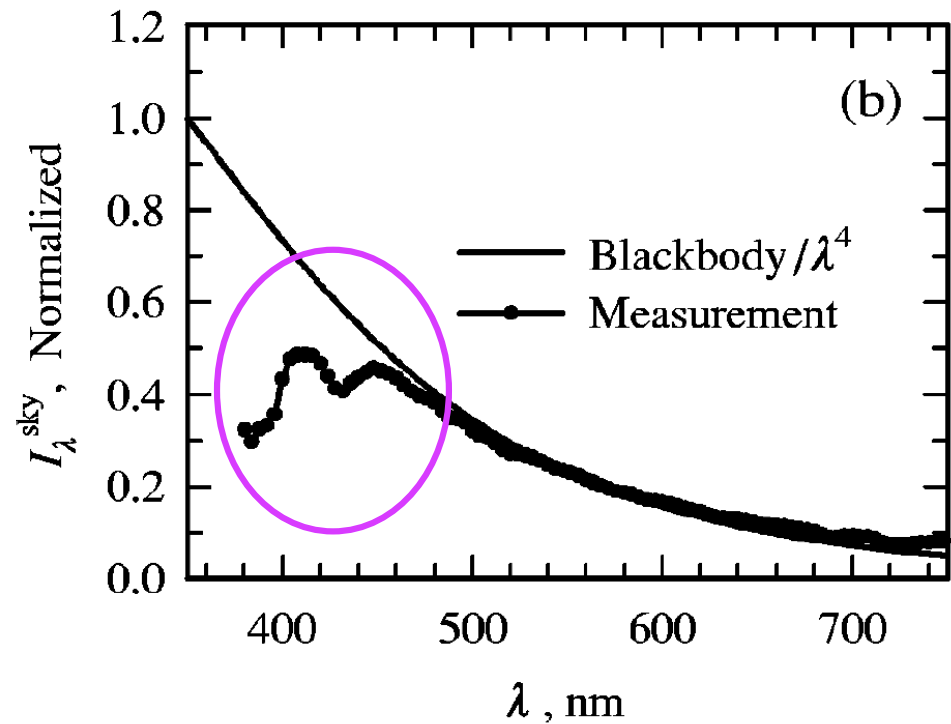


Outside the Earth



Violet
Blue
Green
Yellow
Orange
Red

Zenith skylight at sea level



Violet
Blue
Green
Yellow
Orange
Red

昼間の空は本当に青い？

紫色の光 (~400nm) も結構混じっている

————→ 青空というより、むしろ紫空

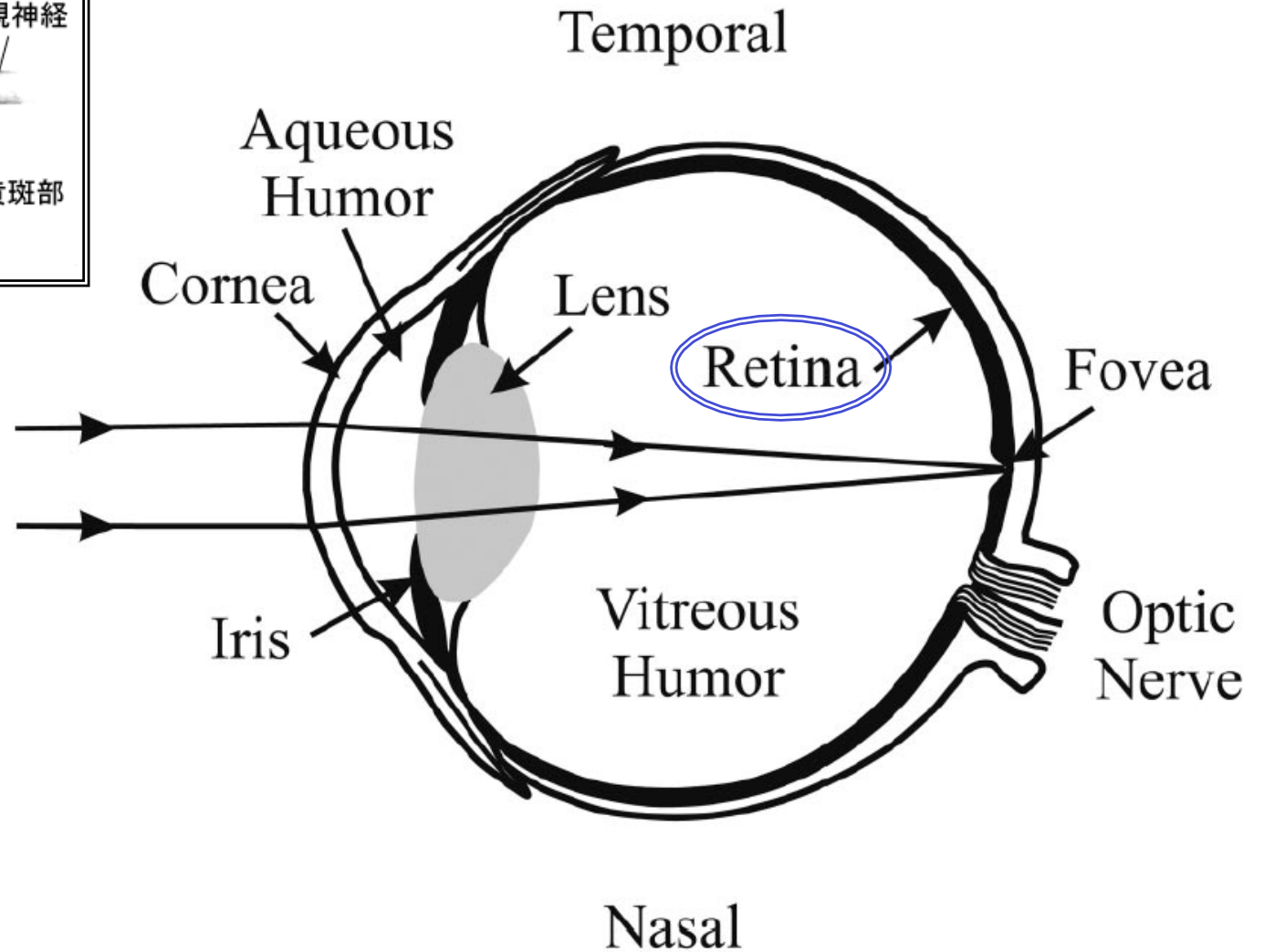
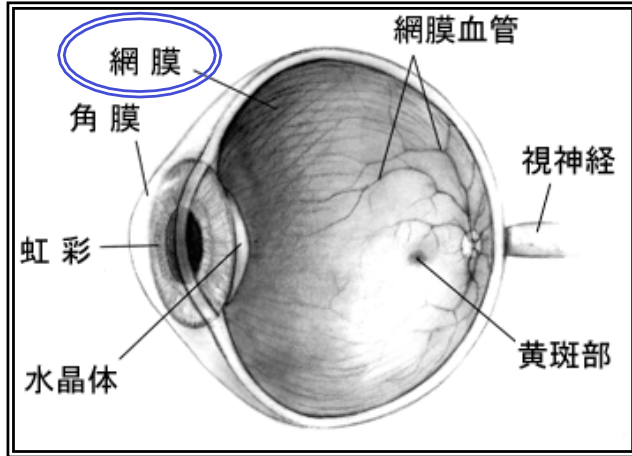


レイリー散乱による散乱現象だけで、青空を説明しきれない

空が青く見える理由は、実は、観測者にも原因がある

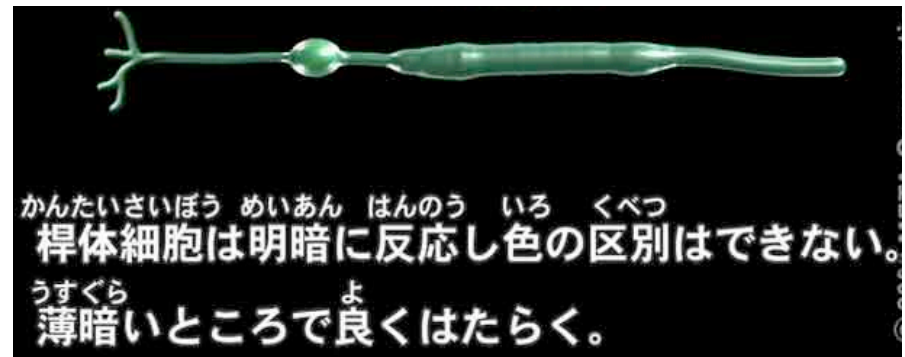
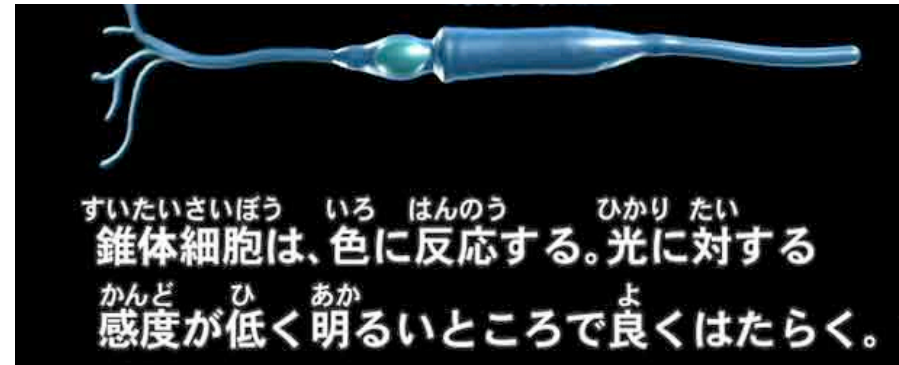
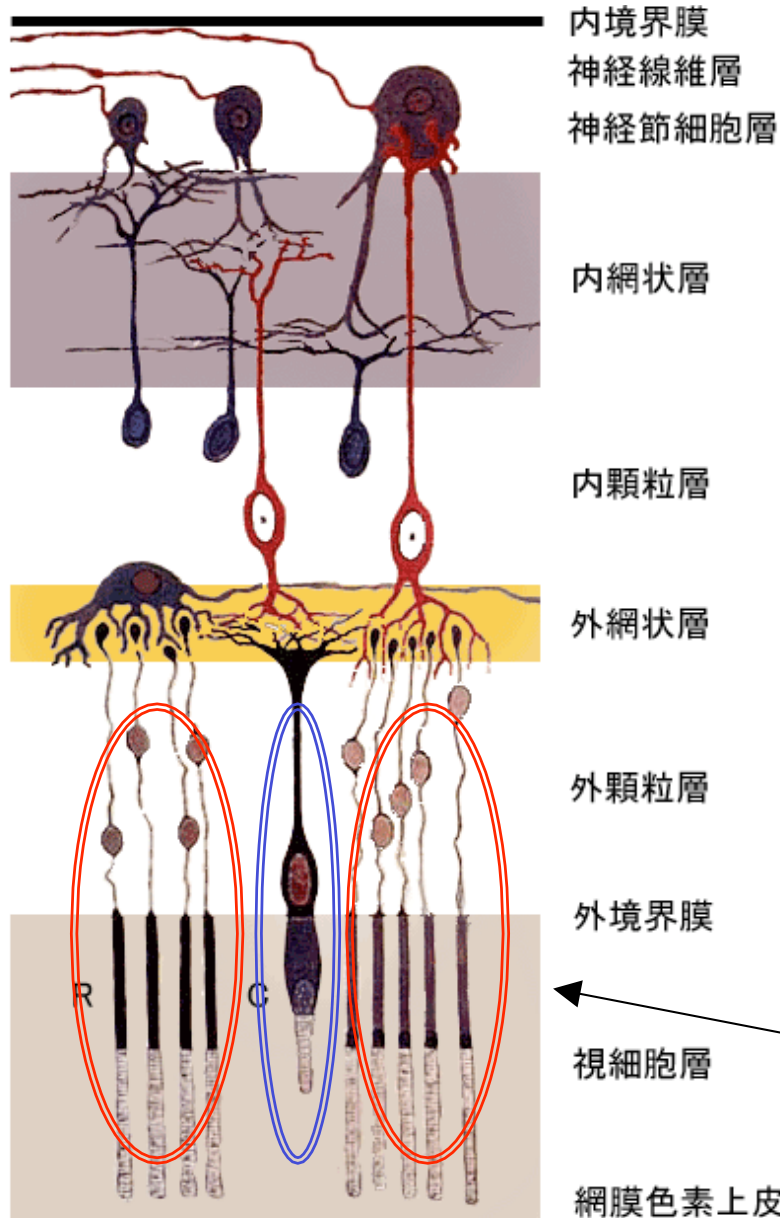
↘ 人間の色覚

眼球の構造



網膜の構造

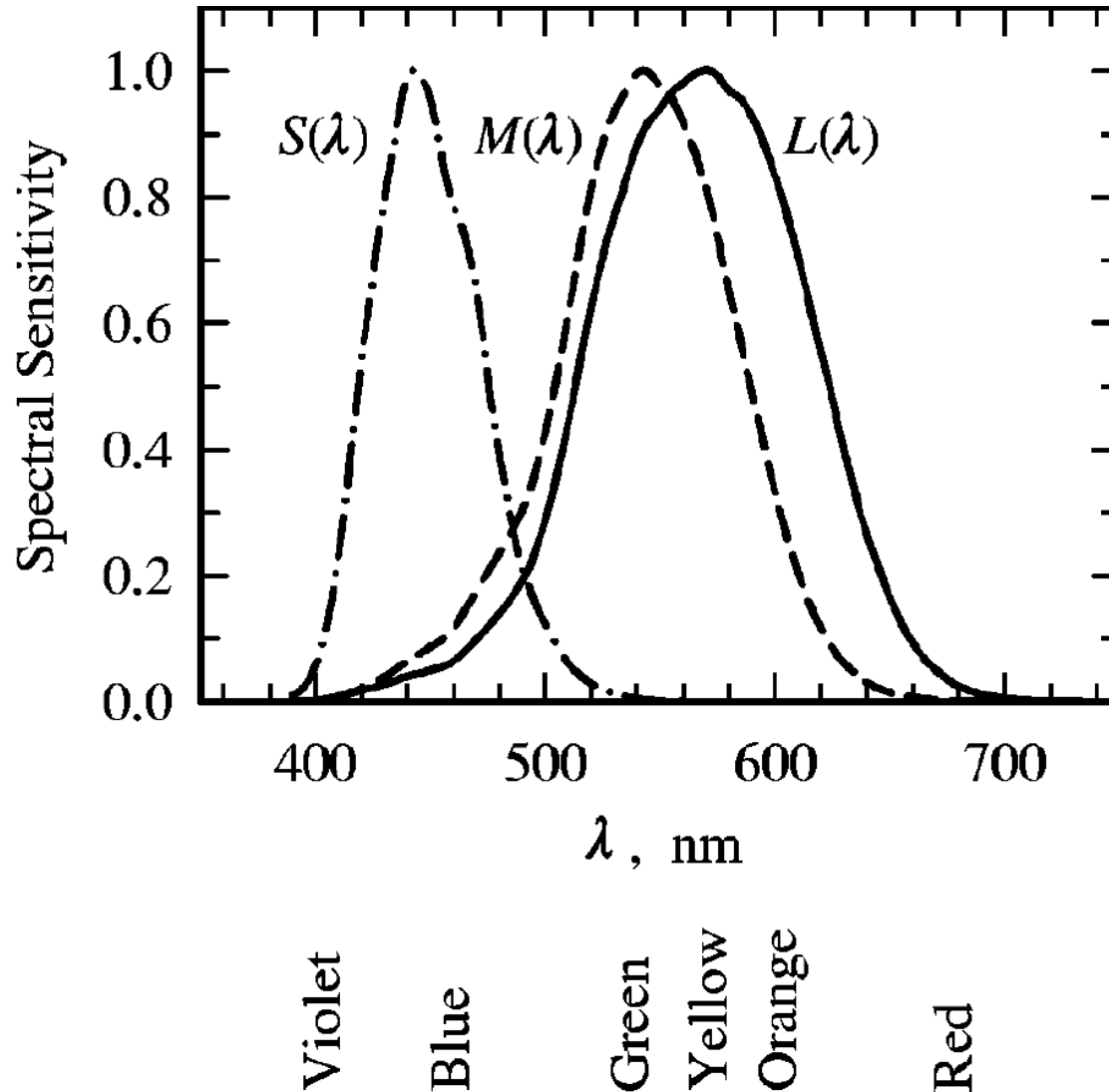
光の方向
↓



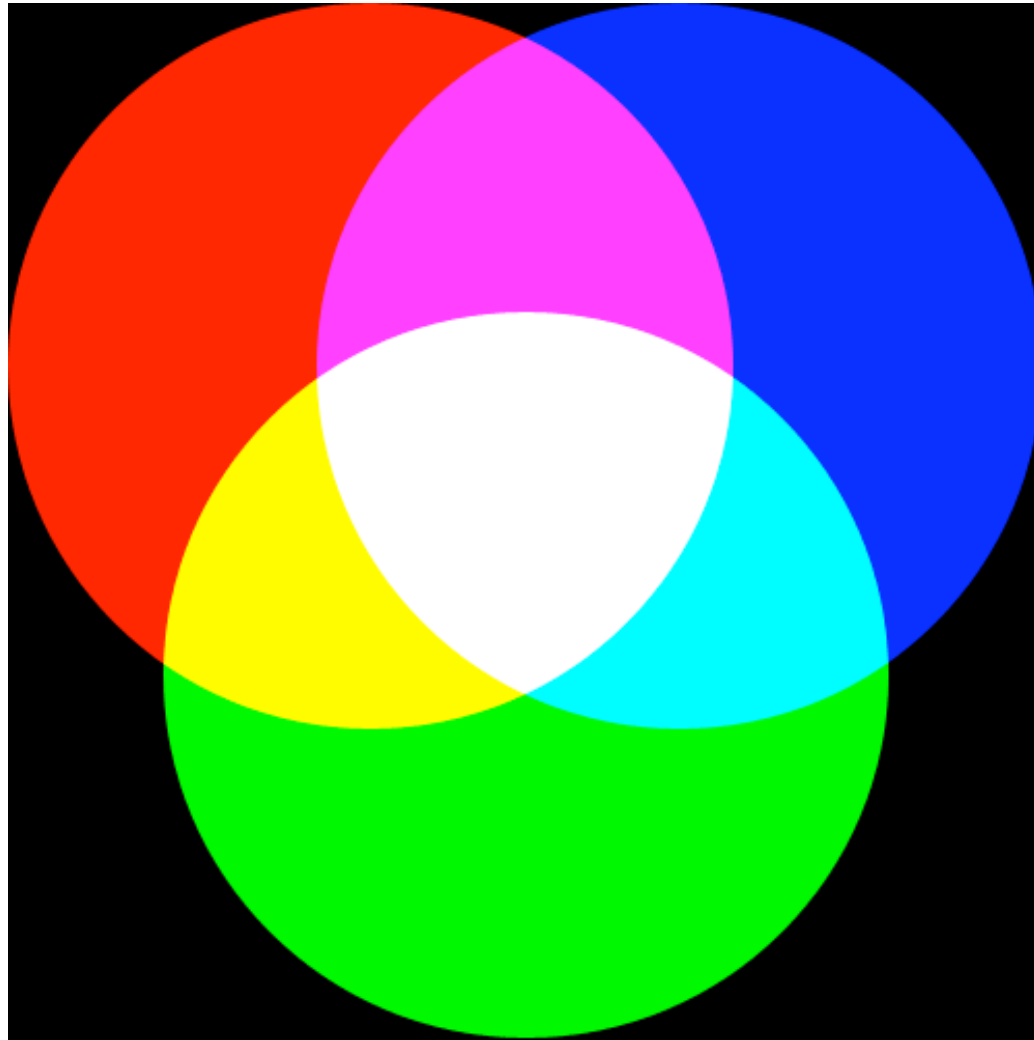
R: 桿体 (rod)

C: 錐体 (cone)

Spectral sensitivity of human cone



光の三原色



Metamars

Cone response:

$$R_L = K_L \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L(\lambda) I_\lambda(\lambda) d\lambda,$$

$$R_M = K_M \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} M(\lambda) I_\lambda(\lambda) d\lambda,$$

$$R_S = K_S \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) I_\lambda(\lambda) d\lambda,$$

$$\lambda_{\min} \approx 350 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\max} \approx 750 \text{ nm}$$

Condition of "**metamerism**":

Metameric matching
(条件等色)

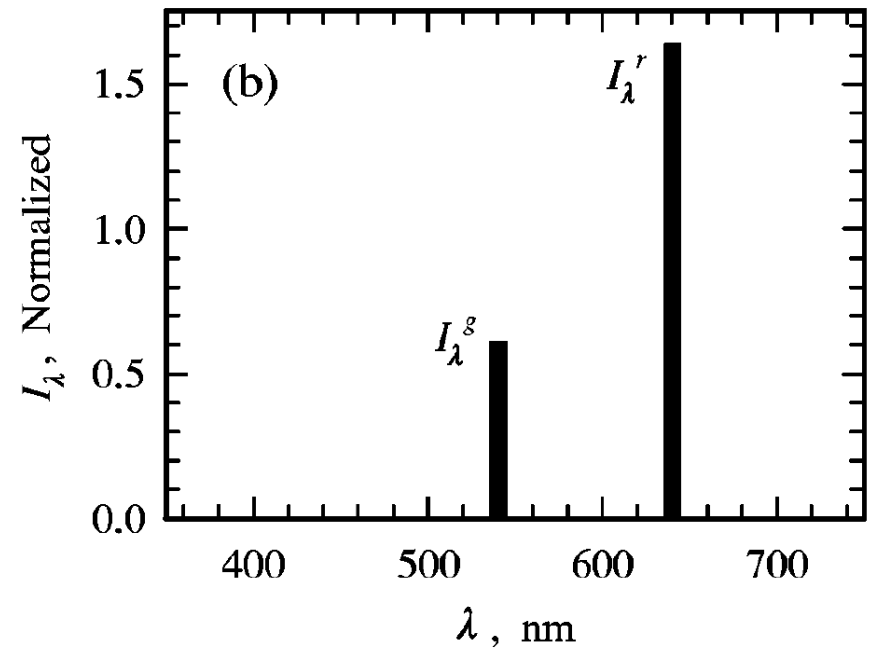
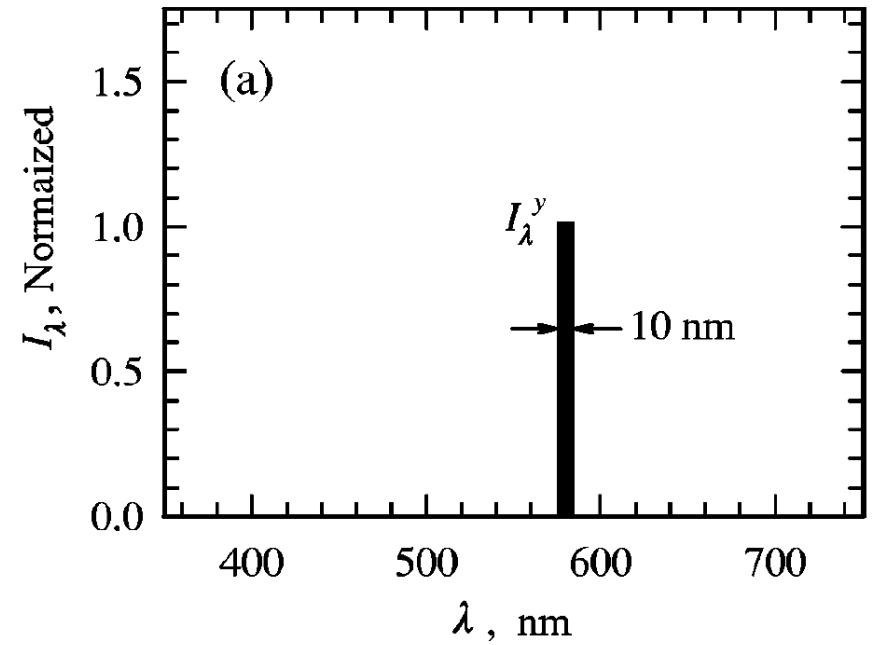
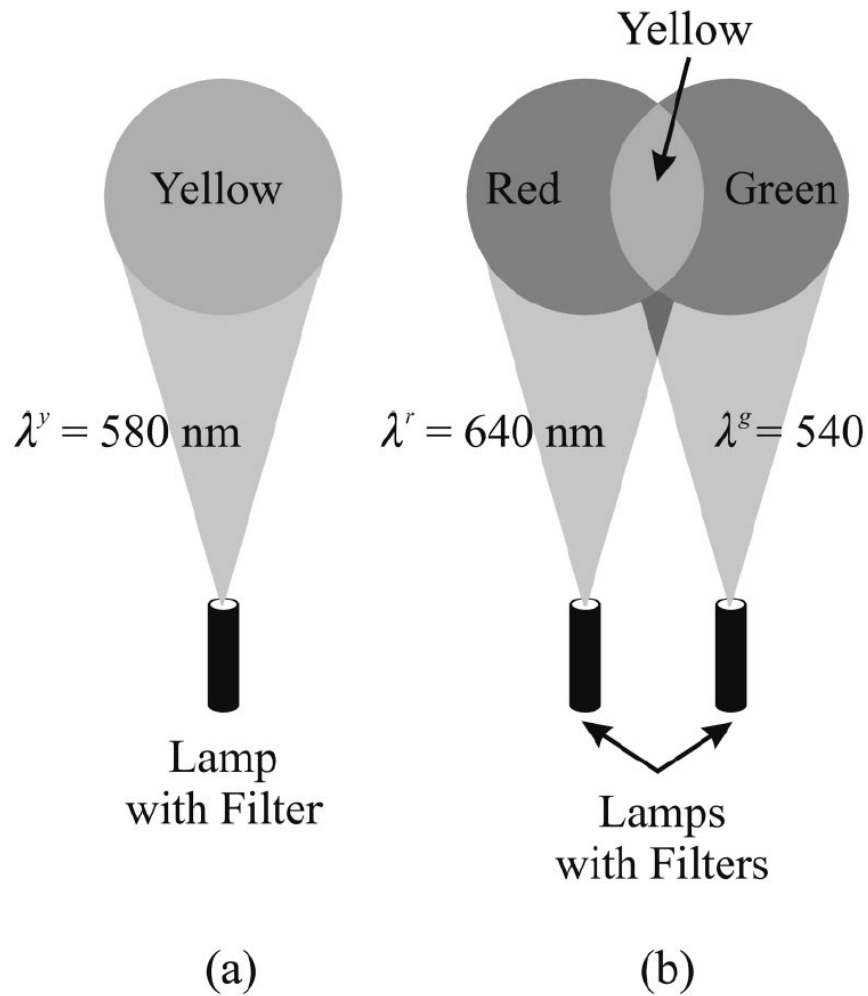
Even with different spectra $I_\lambda^a(\lambda)$, $I_\lambda^b(\lambda)$,

$$R_L^a = R_L^b, \quad R_M^a = R_M^b, \quad R_S^a = R_S^b$$



同色に
見える

Metameric matching



Color matching (simple example)

Matching condition:

$$\lambda^g = 540 \text{ nm}, \quad \lambda^y = 580 \text{ nm}, \quad \lambda^r = 640 \text{ nm}$$

$$R_L^y \approx K_L L(\lambda^y) I_\lambda^y \Delta\lambda = R_L^r + R_L^g \approx K_L L(\lambda^r) I_\lambda^r \Delta\lambda + K_L L(\lambda^g) I_\lambda^g \Delta\lambda,$$

$$R_M^y \approx K_M M(\lambda^y) I_\lambda^y \Delta\lambda = R_M^r + R_M^g \approx K_M M(\lambda^r) I_\lambda^r \Delta\lambda + K_M M(\lambda^g) I_\lambda^g \Delta\lambda$$

单色光(黄)の応答

2色(緑、赤)を混ぜた時の応答



$$\frac{I_\lambda^r}{I_\lambda^y} = \frac{L(\lambda^g)M(\lambda^y) - L(\lambda^y)M(\lambda^g)}{L(\lambda^g)M(\lambda^r) - L(\lambda^r)M(\lambda^g)},$$

$$\frac{I_\lambda^g}{I_\lambda^y} = \frac{L(\lambda^y)M(\lambda^r) - L(\lambda^r)M(\lambda^y)}{L(\lambda^g)M(\lambda^r) - L(\lambda^r)M(\lambda^g)}.$$

混ぜ合わせの比率が決まる:

$$I_\lambda^r / I_\lambda^y \approx 1.64 \quad I_\lambda^g / I_\lambda^y \approx 0.605$$

or

$$I_\lambda^r / I_\lambda^g \approx 2.71$$

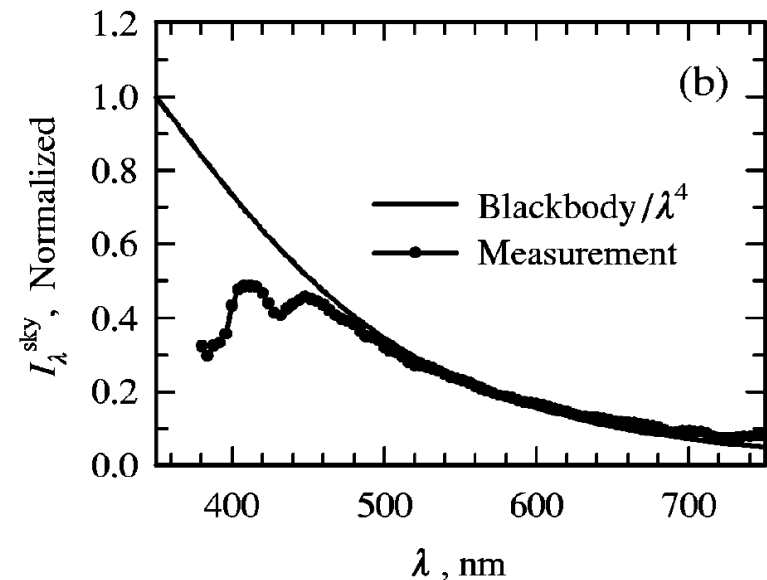
Color of the daytime sky

メタメリックマッチングで、昼間の空が青いことを説明する

注意

太陽の放射スペクトルは、幅広い波長帯に広がっている

単色光に白色光を混ぜたスペクトル
に対して、等色条件を考える



Unsaturated color

$$I_\lambda^{\text{mix}}(\lambda) = \underbrace{I_\lambda^w}_{\text{白色光}} + \underbrace{I_\lambda^u \{ U[\lambda - (\lambda^u - \Delta\lambda^u/2)] - U[\lambda - (\lambda^u + \Delta\lambda^u/2)] \}}_{\text{単色光}}$$

白色光

単色光

→ 淡い色を表現

ステップ関数

Matching condition

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Unsaturated light: } I_{\lambda}^{\text{mix}}(\lambda) \\ \text{Skylight: } I_{\lambda}^{\text{sky}}(\lambda) \end{array} \right. \dashrightarrow \text{パラメーター}$$

$I_{\lambda}^w, I_{\lambda}^u, \lambda^u, \Delta\lambda^u$

等色条件

$$\frac{R_L^{\text{mix}}}{R_L^{\text{sky}}} = \frac{R_M^{\text{mix}}}{R_M^{\text{sky}}} = \frac{R_S^{\text{mix}}}{R_S^{\text{sky}}}$$



幅 $\Delta\lambda^u$ を与えると、

- λ^u 単色光の波長
- $I_{\lambda}^w / I_{\lambda}^u$ 白色・単色光のバランス

が求まる

Matching condition (2)

等色条件を書き直すと、

$$\frac{1}{\Delta\lambda^u} \left. \frac{I_\lambda^w}{I_\lambda^u} \right|_{L,M} = \frac{[M(\lambda^u)(R_L^{\text{sky}}/K_L) - L(\lambda^u)(R_M^{\text{sky}}/K_M)]}{(R_M^{\text{sky}}/K_M) \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} L(\lambda) d\lambda - (R_L^{\text{sky}}/K_L) \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} M(\lambda) d\lambda}$$

$$\frac{1}{\Delta\lambda^u} \left. \frac{I_\lambda^w}{I_\lambda^u} \right|_{S,M} = \frac{[M(\lambda^u)(R_S^{\text{sky}}/K_S) - S(\lambda^u)(R_M^{\text{sky}}/K_M)]}{(R_M^{\text{sky}}/K_M) \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) d\lambda - (R_S^{\text{sky}}/K_S) \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} M(\lambda) d\lambda}$$

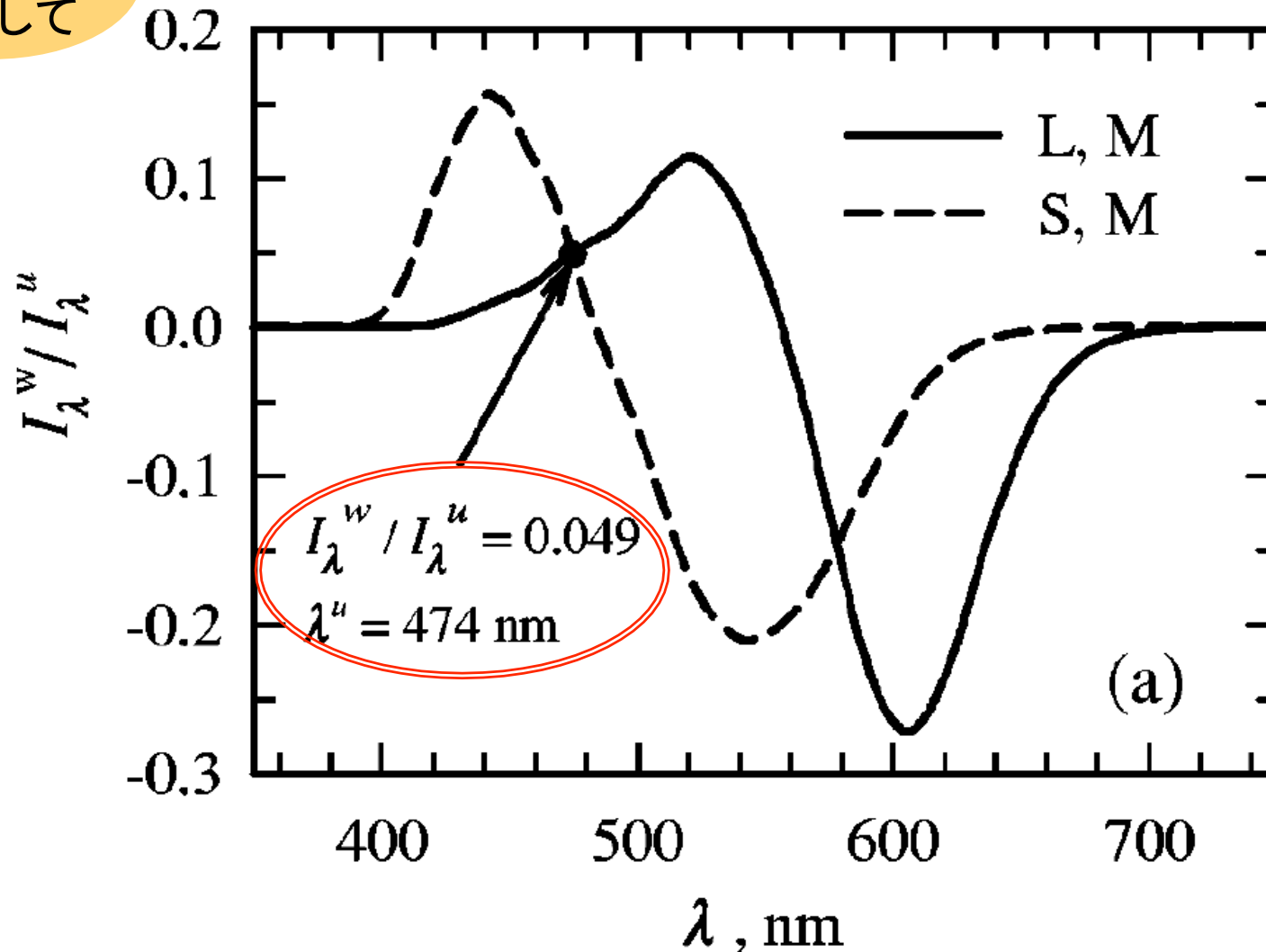
λ^u の関数

$$\left. \frac{I_\lambda^w}{I_\lambda^u} \right|_{L,M} = \left. \frac{I_\lambda^w}{I_\lambda^u} \right|_{S,M} \longrightarrow \lambda^u \text{ と } I_\lambda^w / I_\lambda^u \text{ が求まる}$$

Color matching of Rayleigh sky

$\Delta\lambda^u = 10 \text{ nm}$
に対して

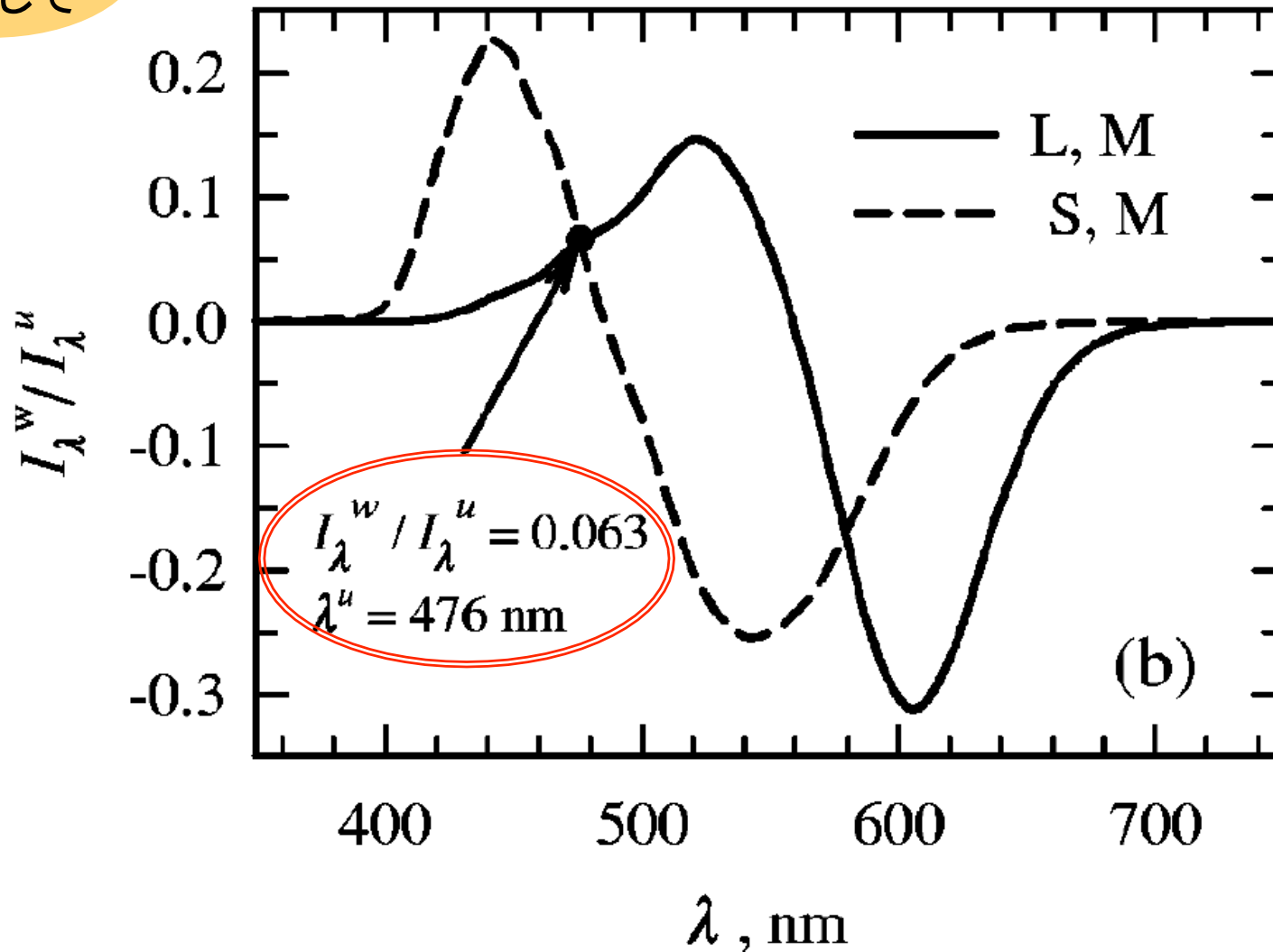
Black body / λ^4 に対する color matching



Color matching of measured skylight

$\Delta\lambda^u = 10 \text{ nm}$
に対して

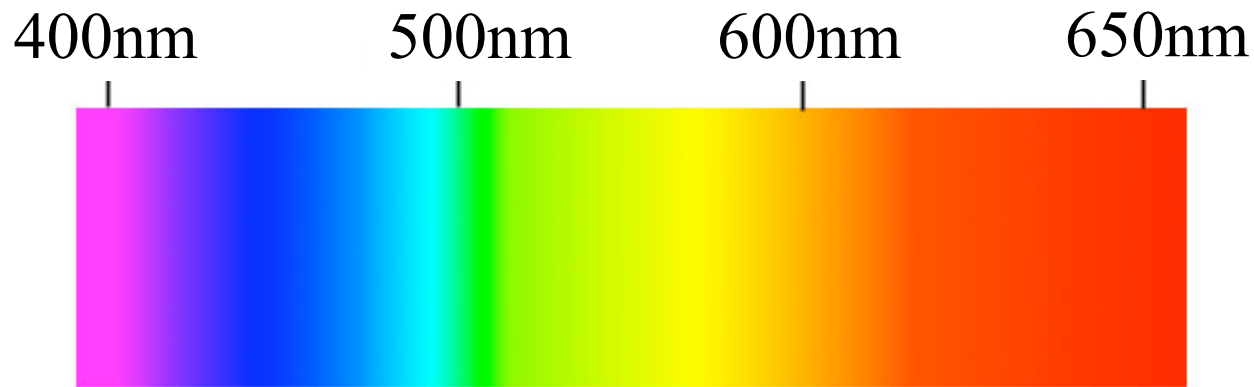
実測スペクトルに対する color matching



小まとめ

{	Black body / λ^4	$\lambda^u = 474 \text{ nm},$	$I_\lambda^w / I_\lambda^u = 0.049$
	実測スペクトル	$\lambda^u = 476 \text{ nm},$	$I_\lambda^w / I_\lambda^u = 0.063$

($\Delta\lambda^u = 10 \text{ nm}$ に対して)

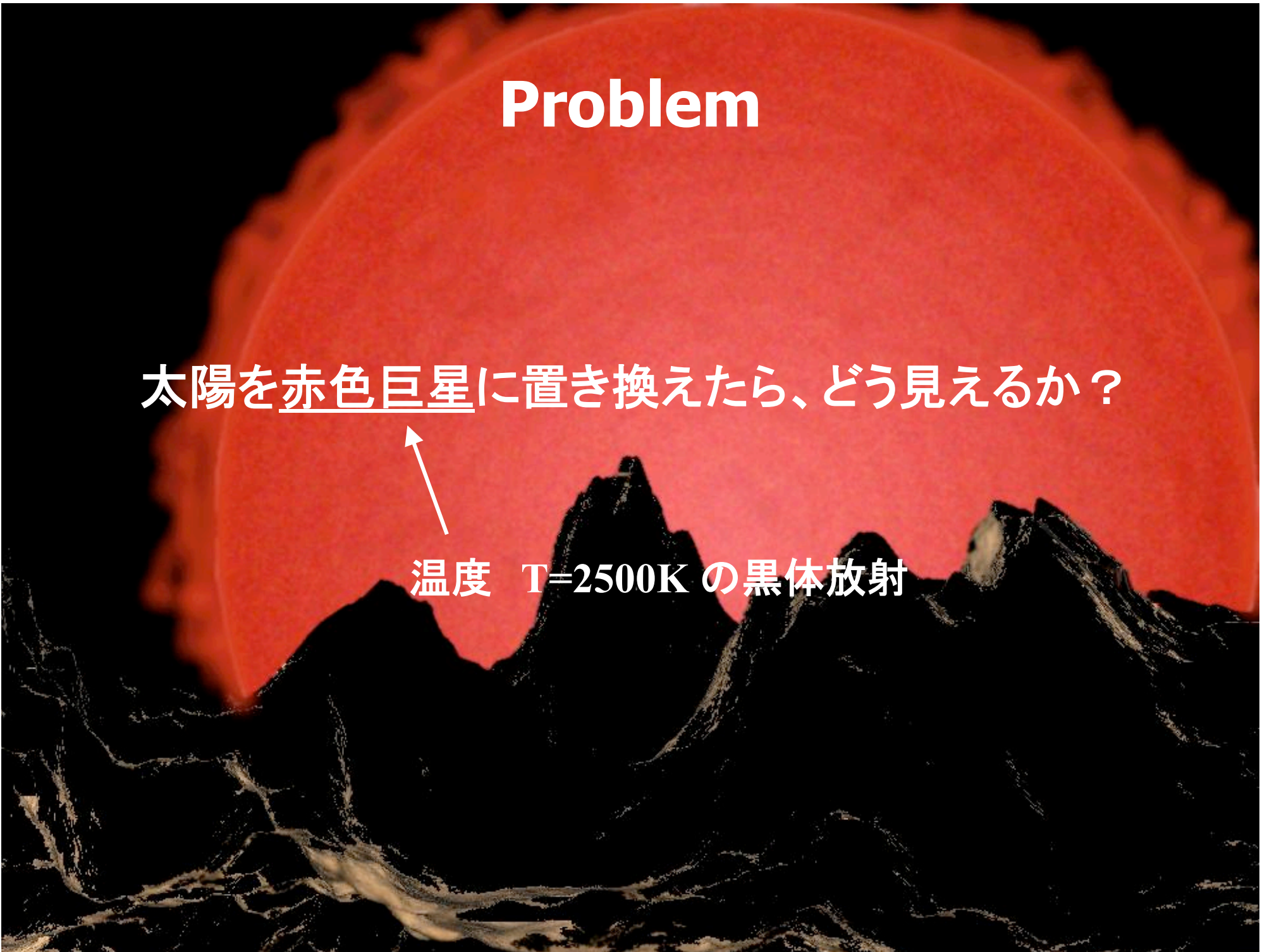


確かに、青く見える！！

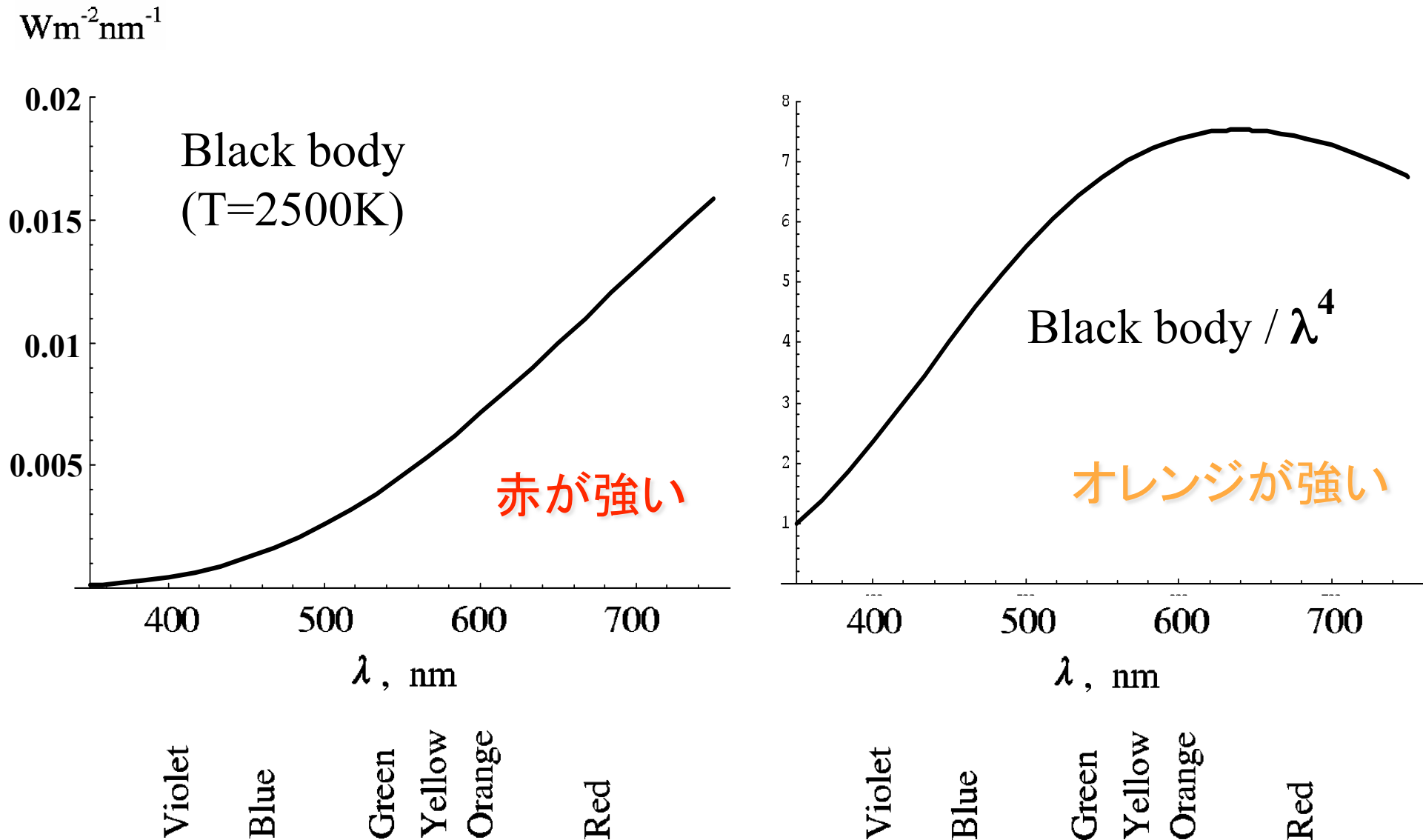
Problem

太陽を赤色巨星に置き換えたら、どう見えるか？

温度 $T=2500\text{K}$ の黒体放射

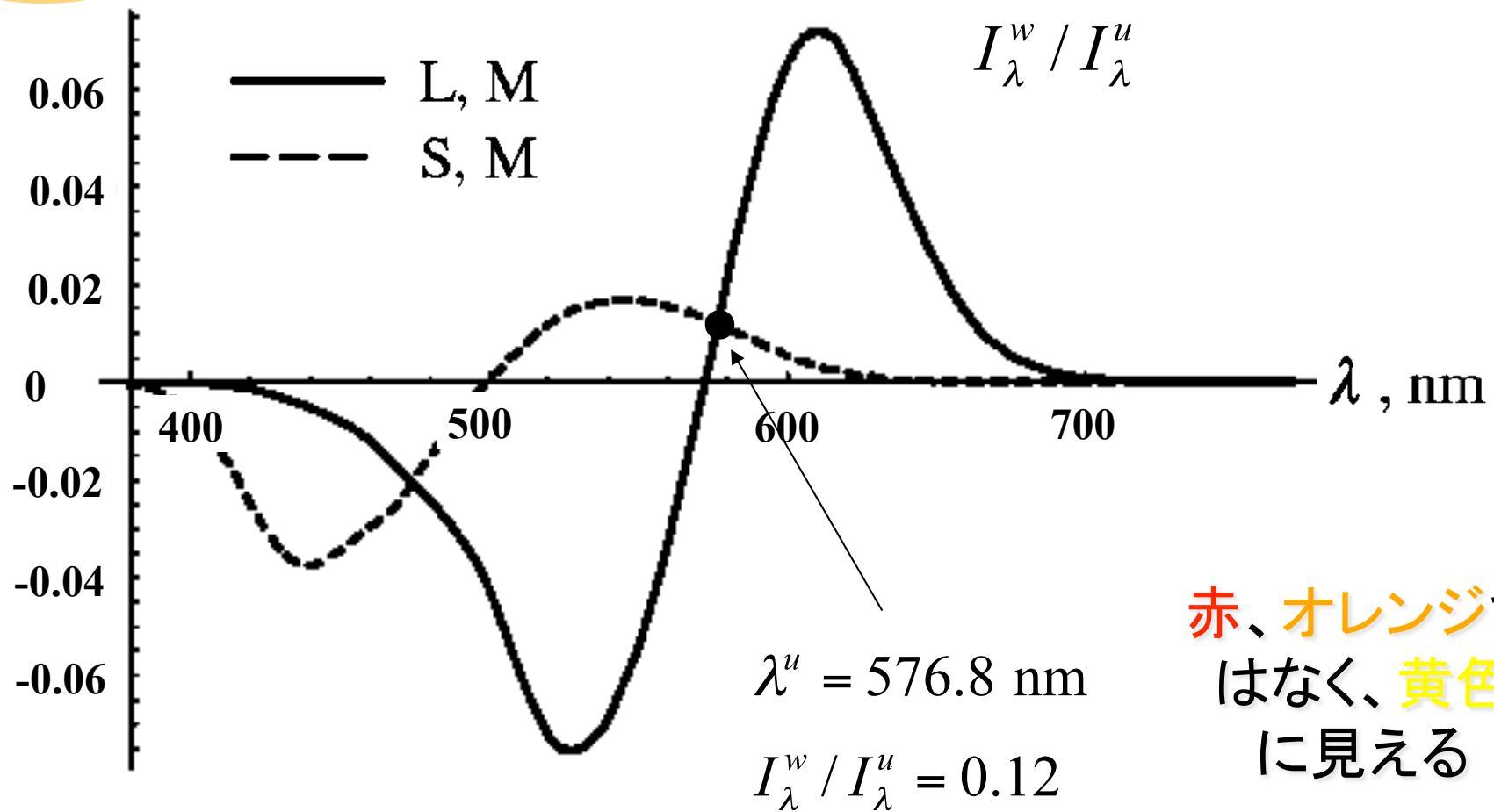


Spectral irradiance of light coming from red giant



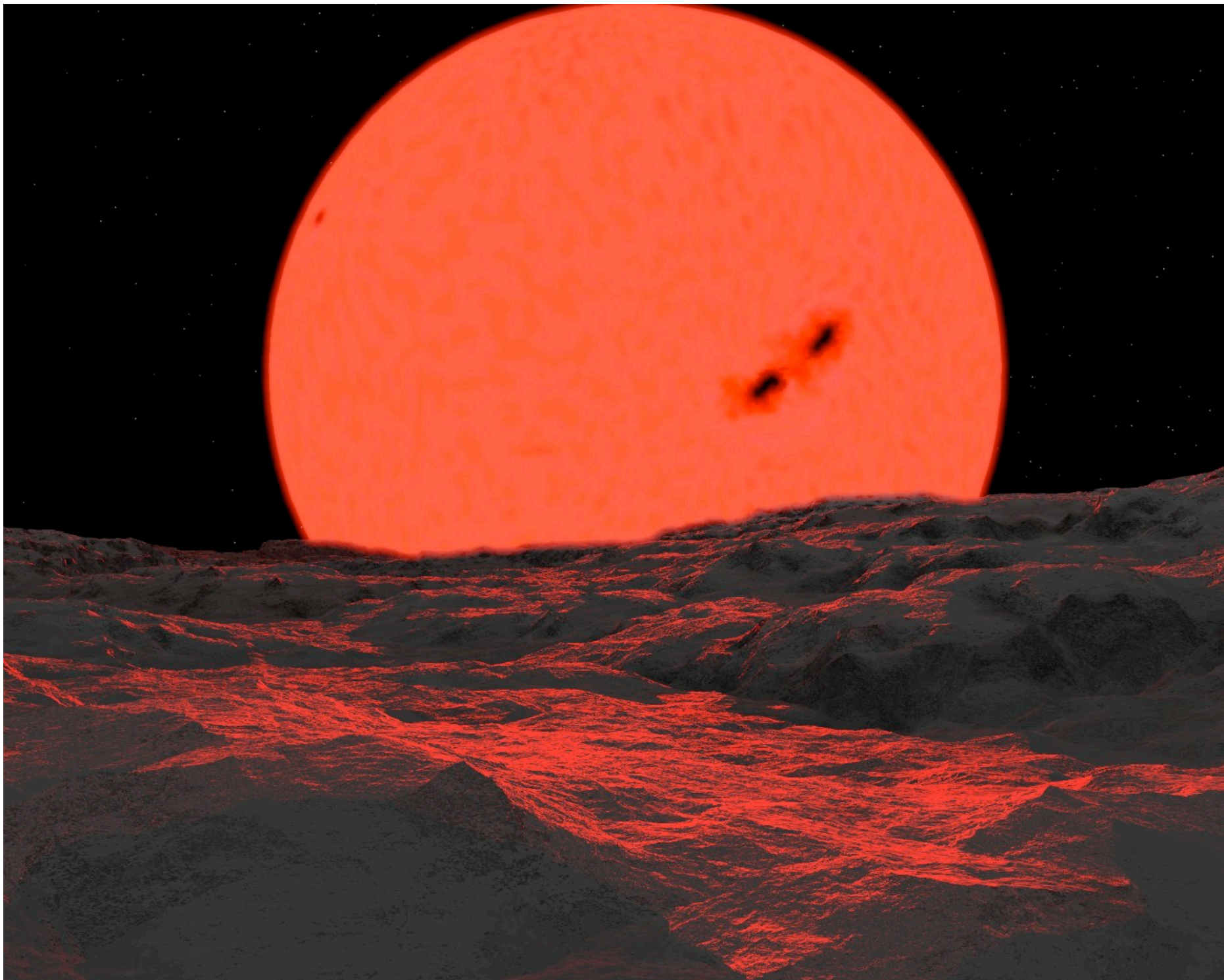
Color matching of light coming from red giant

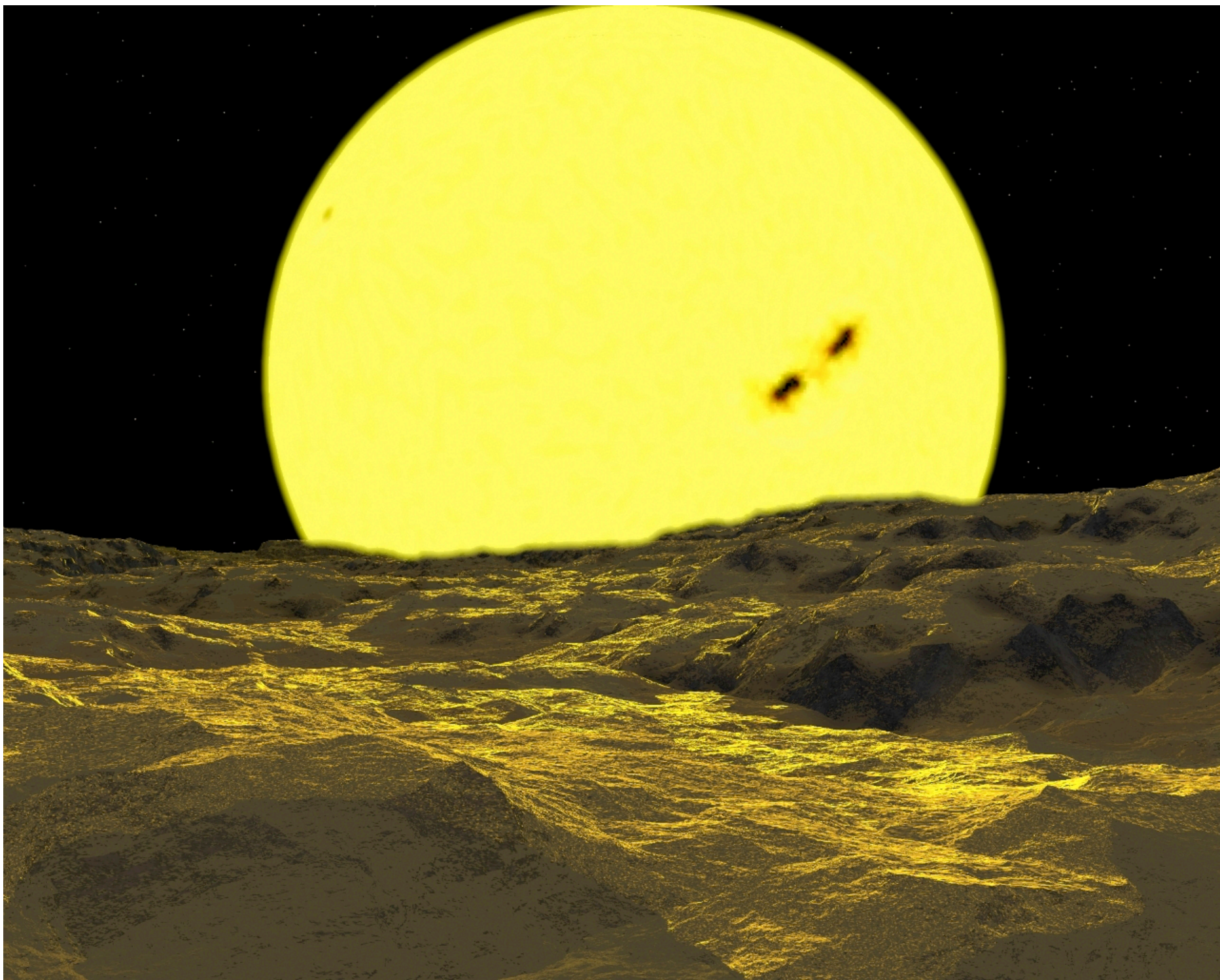
$\Delta\lambda^u = 10 \text{ nm}$
に対して



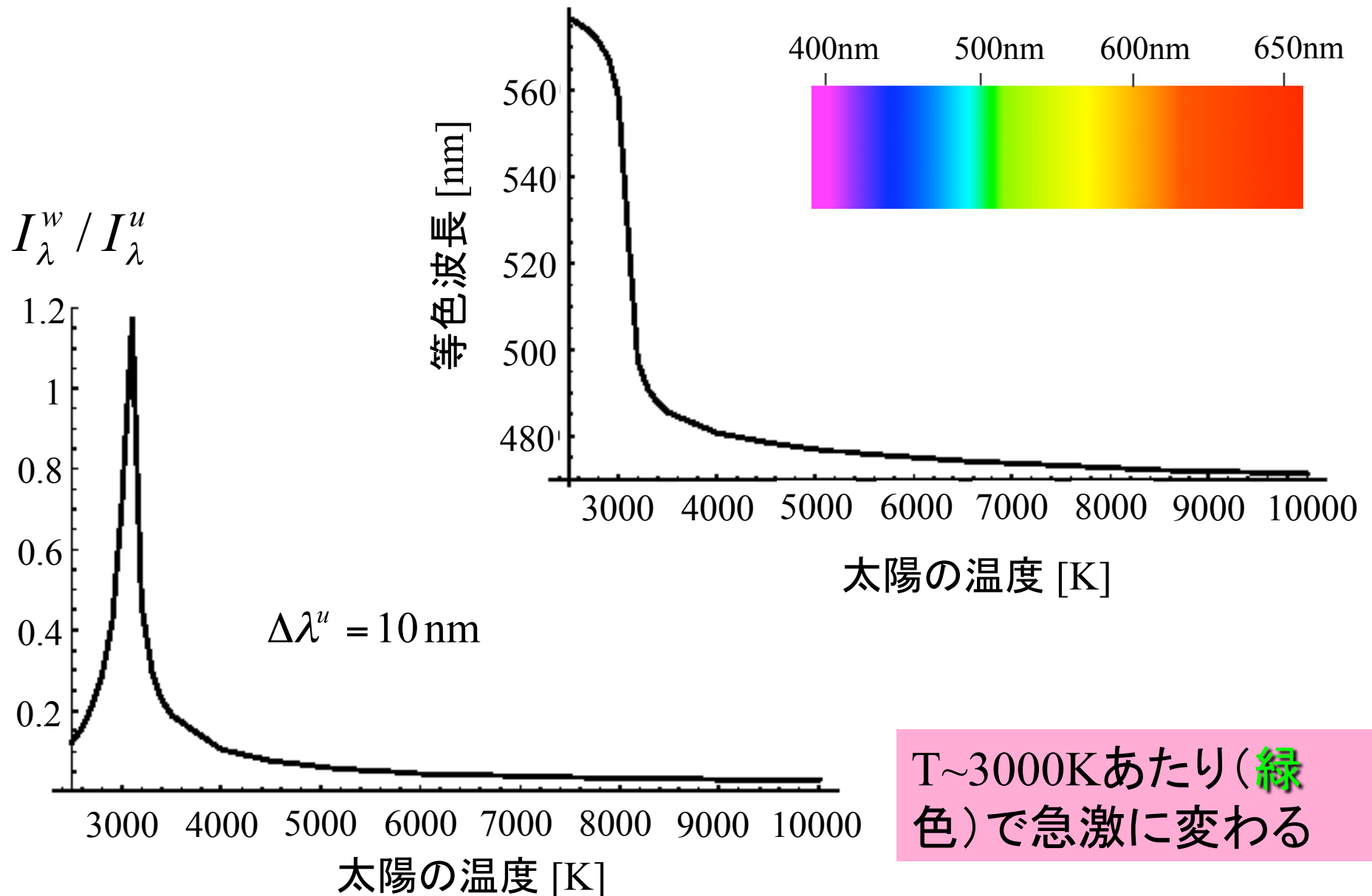
赤、オレンジで
はなく、黄色
に見える

しかも結構淡い色





太陽の温度に応じて、どんな色に見えるか？



T~3000Kあたり(緑色)で急激に変わる