タングステン・ランプのフィラメントの色温度の推定

Ver. 20201005

第2回目実験

- 前回は、タングステン・ランプの電気特性(抵抗)からその温度を推定した
- 今回は、タングス・テンランプの熱放射(電磁波)から色温度を推定する
- 最後に2つの実験結果を比較し、考察を行う

(光学)分光器とは

- 光の波長を測定する機器
  - 一般的な光は連続的に分布する
  - 分光分布図：縦軸に強度(分光密度)、横軸に波長
  - プリズム分光器や回折格子分光器等

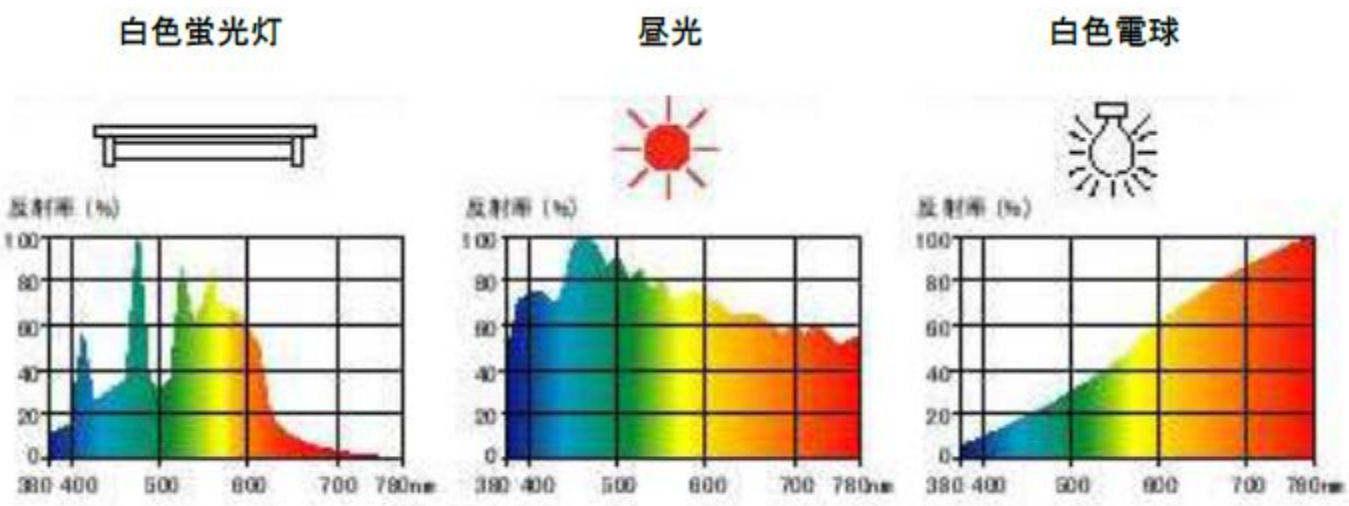
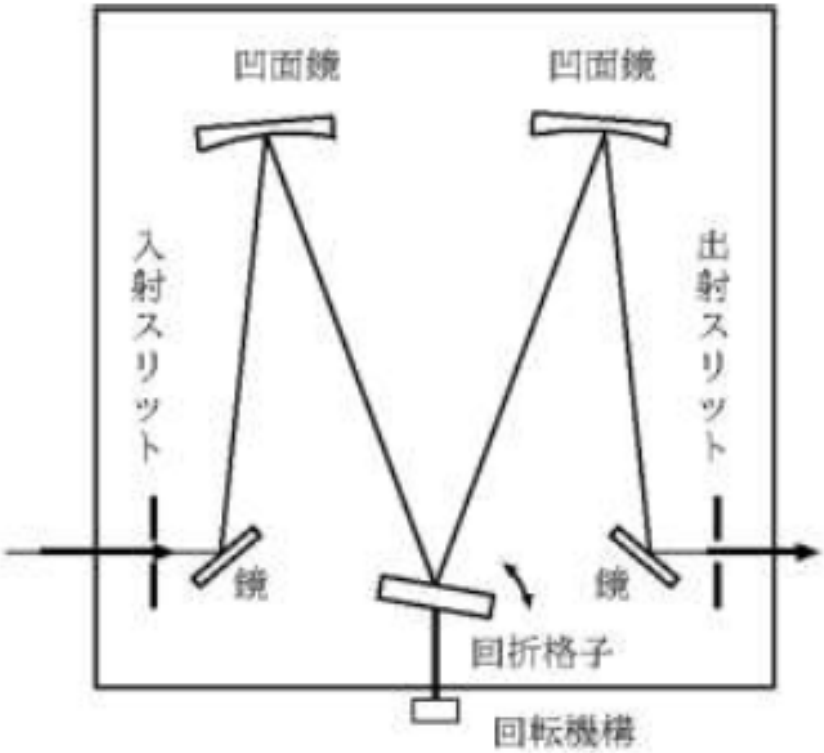


図 6　身の回りの光の分光分布図

プリズムによる分光

回折格子分光器

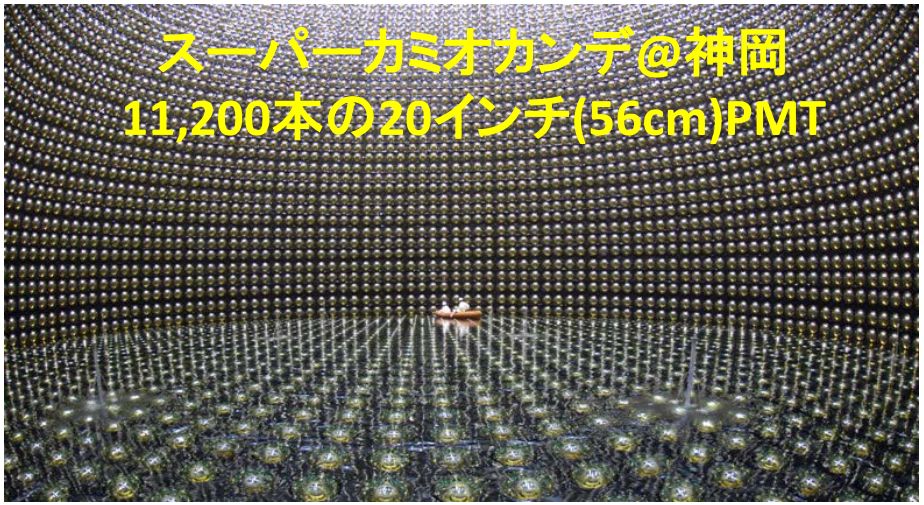
- 格子状のパターンによる回折を利用して干渉縞を作り(回折格子)、スリットで所定の波長の光を取り出す
  - 回折格子を回転させて、所定の波長の光に合わせる

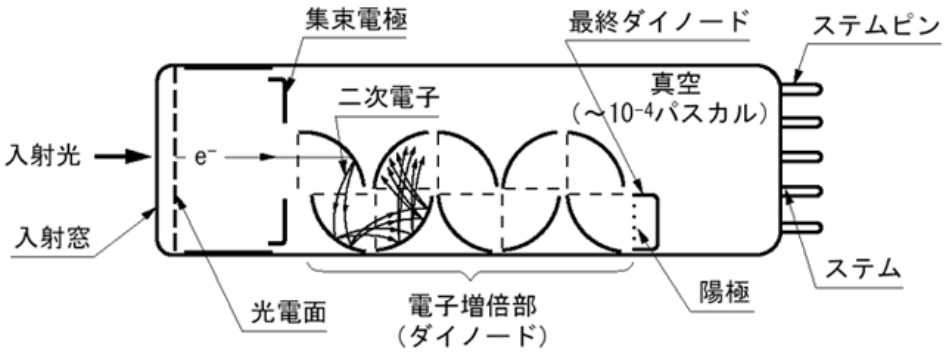


特定の波長を選び出す

光電子増倍管(PMT)

- 大きな真空管
- 光電子放出剤を塗った陰極面(カソード、光電面)に光が当たると光電子が発生し、その光電子を高電圧を印可したダイノードで加速・増幅し、陽極(アノード)でその信号を読み出す
- 微弱光の検出に優れるため、主に放射線検出に用いる





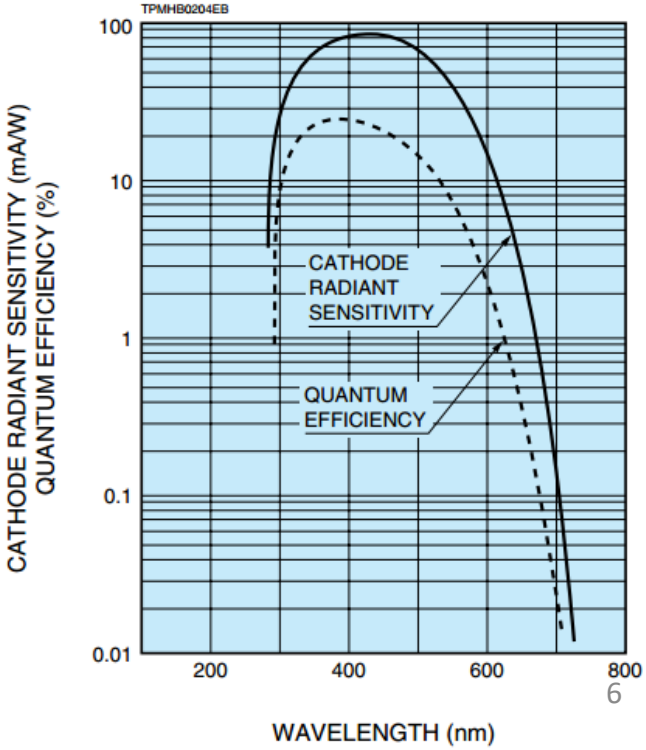
光の強さを測定

光電子増倍管(PMT)

- PMTの感度は波長依存がある
  - PMTを用いて分光分布図を作るためには、この波長特性を知っておく必要がある

例：良く使用される、浜松ホトニクス(株)の2インチPMT H6410(R329)の波長特性

主に陰極(カソード)で光電子変換を行う際の量子効率で決まる

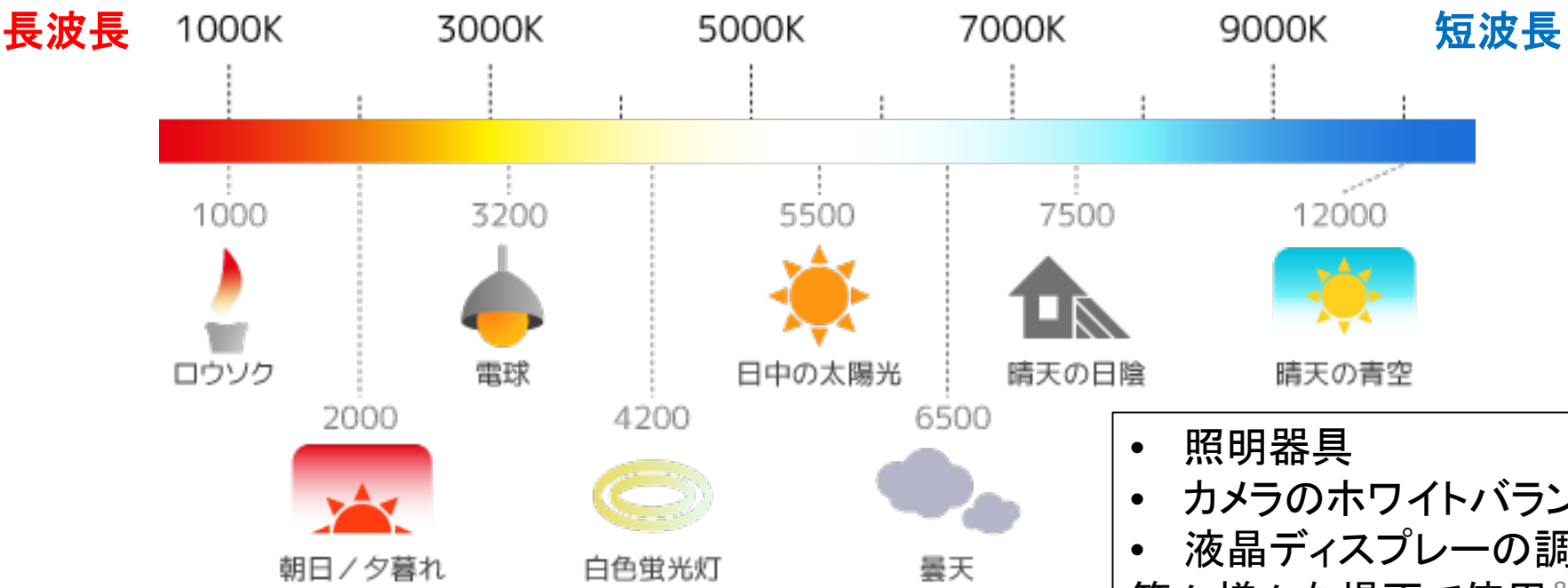


先週の復習

色温度

すべての振動数の放射を完全に吸収する理想的な物体

- 高温の黒体から放射される光の色(波長)と対応させ、その時の黒体の絶対温度(K、ケルビン)をもって**色温度**とする



- 照明器具
- カメラのホワイトバランス
- 液晶ディスプレーの調整

等々様々な場面で使用

シュテファン・ボルツマンの法則

- 熱放射のエネルギーRと物体の温度Tとの間の関係：

$$R = \sigma T^4 \left[W/m^2\right]$$

  – 太陽表面の温度を約6000Kと初めて推定

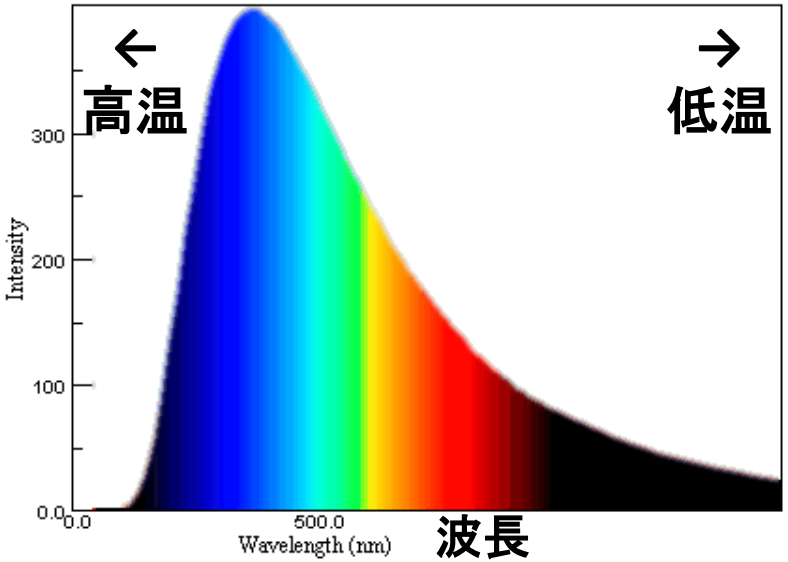
R：放射発散度 = 単位面積あたりに放射される放射エネルギー[W/m^2]

プランクの法則

- 黒体から放出される電磁波のスペクトルを与える:

$$W(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

  - 全ての波長領域にわたって実験結果を再現
  - **量子力学の幕開けとなる法則**

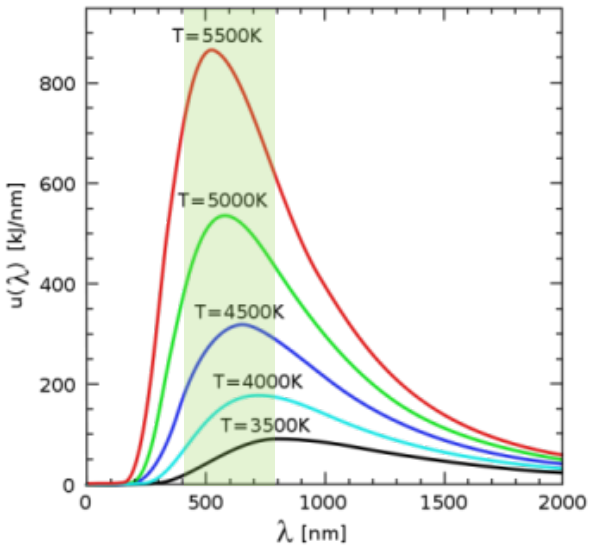


ウィーンの放射法則

- プランクの法則の近似式
  - 短波長(高周波数)での近似式

$$\mathbf{W}(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{T}) = \frac{\boldsymbol{8\pi hc}}{\boldsymbol{\lambda^5}} \boldsymbol{e^{-hc/\lambda kT}}$$

  - 低温(T<3,000K)＆可視波長域(λ:380～780nm)では良い精度で成り立つ
    - *今回の実習ではこの式を利用して色温度を推定する*



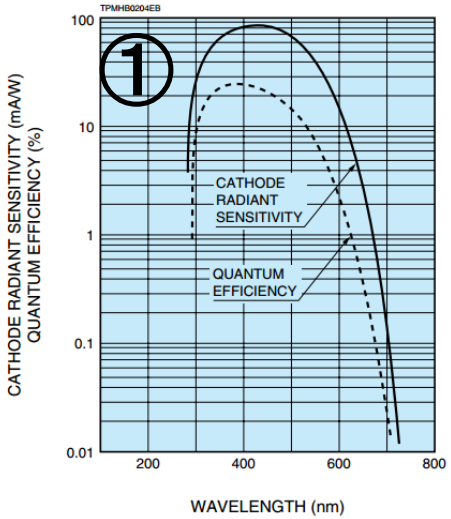
W(λ,T)：分光エネルギー密度 = 単位体積、単位波長あたりに放射されるエネルギー[W/m^4]

タングステン・ランプのフィラメントの色温度の推定

--- 実験の進め方 ---

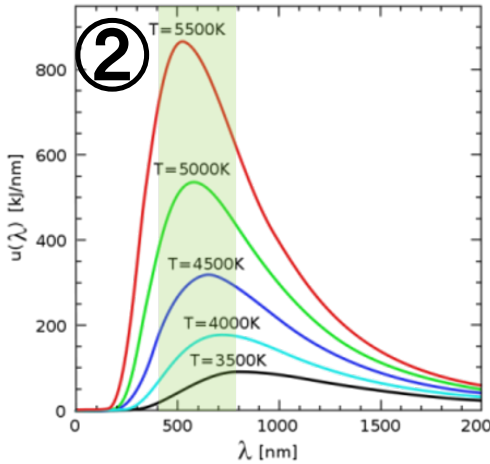
実験の目的・流れ

- 回折格子でタングステン・ランプから出てくる光を分光し、光電子増倍管を用いてその強度を測定する



① 光電子増倍管の分光感度(波長依存)を初めに求める

② 各電圧(温度)/各波長での発光強度を測定し、色温度を推定する



- 先週の実験結果との比較を行う

目的と使用機器

- 目的
  - タングステン・ランプの熱放射の分光測定を行い、色温度を推定する
- 使用器具
  - 標準タングステン・ランプ、ランプハウス
  - スライダック(5A)
  - デジタル・マルチメーター
  - 集光レンズ、ラボジャッキ
  - **小型回折格子分光器**
  - **光電子増倍管(PMT)**

    } 一体型
  - PMT電源(コントロールアンプ内蔵型)

実験の注意

1. 図5を参考にして、回路を配置
   - **前回と同じ標準ランプを使用**
2. ランプのフィラメントの高さにレンズ、分光器入り口の高さと光軸を揃える
3. 配線をつなぐ際、**スライダック/電源のコンセントはすべての回路の結線後にさすこと。感電の恐れ有り。**

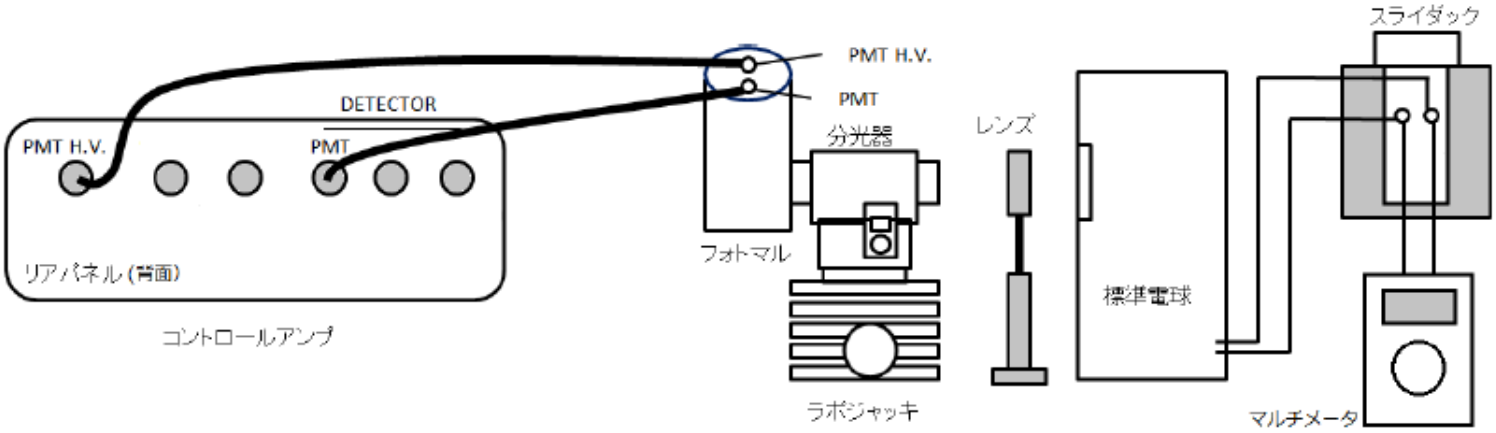


図 5　装置の配置 (模式図)

PMTを扱う上での注意事項

- 強い光が光電面にあたり、過大な高電流が流れるとPMTが損傷する
  - **PMTにじかに強い光を当てない(電圧OFFのときも)**
  - PMTの光電圧(コントロールアンプのsignalの電圧値)は8V程度で使用する
  - **光電圧が10Vに達すると安全装置が働いて電源が落ちる**
  - **測定が終了したら必ず電圧を0Vにする**

データ取得時の注意事項

- スライダックの電圧を変えたら5分待つ
- PMTの負電圧(~200-300V)は手順8の後は変えない
- 出力電圧を”3桁”まで読むようゲインを調整する
  - 出力電圧:1.225V → ゲイン1
  - 出力電圧:0.122V → ゲイン1
  - 出力電圧:0.012V → ゲイン10へ
  - 出力電圧:0.001V → ゲイン100へ

有効数字の取り扱いに気を付けること

注意!

- 初めに回路を繋ぐ際、**スライダックのコンセントはささないこと。**
  - 先生たちが確認後、コンセントをさしてください。

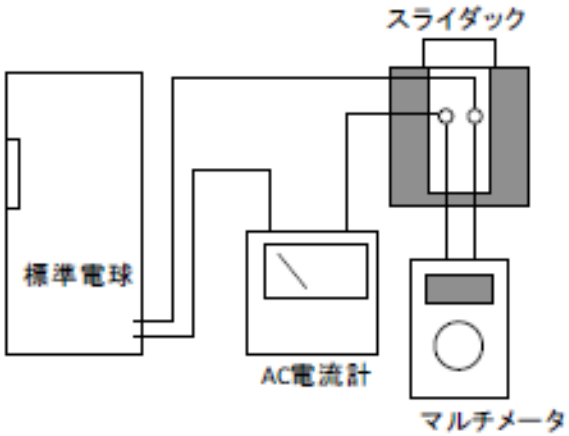


図 1　装置の配置 (模式図)

- 髪の毛が端子に触れると感電の恐れあり。
  - 髪の毛は結びましょう

参考資料

はじめの手順1

1. 標準光源を基準の色温度2,856K に点灯する。
   - 電圧を電球の箱に書いてある値(~100V)に設定する
2. **電球のフィラメントの明るい像が、はっきりと分光器の入射スリットの上に結像するように集光レンズ位置を調節する。**
3. 波長ダイヤル目盛が600nmのところで、出力電圧(光電圧)が**8V位**になるように負電圧を調整する
   - 目安として200~300V程度。
   - **ただし、光電圧が10V を超えると高圧が落ちてしまうので、光電圧が10V を超えないように負電圧を調整する。**

はじめの手順2

1. 場所が決まったら機器をテープで固定して動かないようにする
2. 波長ダイヤルのネジの遊びを避けるために、**波長を合わせるときは必ず同一方向から動かす。**
   - **出力電圧が小さい波長領域ではゲインを上げ、出力電圧は3桁まで読み取っておく。**

     光電圧v = 出力値 ÷ ゲイン

     となる

例：
出力値が0.123のとき、ゲイン1
出力値が0.012のとき、ゲイン10
出力値が0.001のとき、ゲイン100

3. **フィラメントの電圧を変更した場合、5分程度待ってから測定を行うこと。**その間データをまとめる。

PMTの分光感度校正1

- **まずは分光感度の波長依存を調べる**
- 使用する標準ランプの色温度は検定済みで、ランプが入っている箱に記入されている
  - ここではT=2,856Kをとる

    = 国際照明委員で標準光源Aと規定。白熱電球の代表的な光
- T=2,856Kの分光放射照度I_0(光源の強さ)は付録Dにある

付録 D　色温度 $T = 2856$K の標準光源の分光放射強度

波　長 (nm)	分光放射強度 (μW · cm^{-2} · nm^{-1})	波　長 (nm)	分光放射強度 (μW · cm^{-2} · nm^{-1})	波　長 (nm)	分光放射強度 (μW · cm^{-2} · nm^{-1})
380	0.133	510	0.897	640	2.14
390	0.164	520	0.984	650	2.24
400	0.200	530	1.107	660	2.33
410	0.240	540	1.166	670	2.43
420	0.285	550	1.261	680	2.52
430	0.355	560	1.357	690	2.61
440	0.390	570	1.454	700	2.69
450	0.449	580	1.553	710	2.77
460	0.513	590	1.652	720	2.86
470	0.582	600	1.751	730	2.93
480	0.655	610	1.850	740	3.01
490	0.732	620	1.949	750	3.08
500	0.812	630	2.05	760	3.15

この表の分光放射強度は、実際には相対値として扱って良い。つまり単位は考えなくて良い。

分光放射照度 = 物体へ照射される、単位面積、単位波長あたりの放射エネルギー [W/m^3]

PMTの分光感度校正2

- **実際には分光器の透過効率もあるので、PMTの感度と合わせた分光系の校正値S(λ)を求める**

v(λ) : 測定によって得られた高電圧
$I_0(\lambda)$: 標準ランプの分光放射照度(付録D)
T(λ) : 分光系の透過効率
s(λ) : PMTの分光感度

$$\underbrace{v(\lambda)d\lambda}_{\text{測定値}} = \underbrace{\{I_0 d\lambda\}}_{\text{レファレンス値}} \cdot \underbrace{\{T(\lambda)\cdot s(\lambda)\}}_{\text{分光感度S(λ)とおく}}$$

色温度の推定には光強度の絶対値は必要ないので(傾きだけ分かれば良い)、I_0は相対値で良い。すなわちSも相対値である。

① v(λ)にT=2,856Kで測定した光電圧を取り、$I_0(\lambda)$に付録Dの値を入れると分光感度S(λ)が求められる
  - 校正に用いる → $S(\lambda) = v(\lambda) / I_0(\lambda)$

② このS(λ)を用いると、任意の温度Tで測定した光電圧V(λ)に対応する相対的な発光強度I(λ)が求まる
  - 次の分光測定に用いる → $I(\lambda) = V(\lambda)/S(\lambda)$

データの記録

- ノートに下記のような表を作り、**その都度**測定値を記入していく

V = 100 V (色温度2,856K)

波長 λ (nm)	出力値 (V)	ゲイン
380	1.209	1
400	2.036	1
…	…	…
…	…	…

データのまとめ1

1. 測定が終わったら測定値をエクセルにまとめる
2. 光電圧vを計算し(=出力値÷ゲイン), 発光強度I_0を付録Dより入力し、分光感度S(=v/I_0)を求める

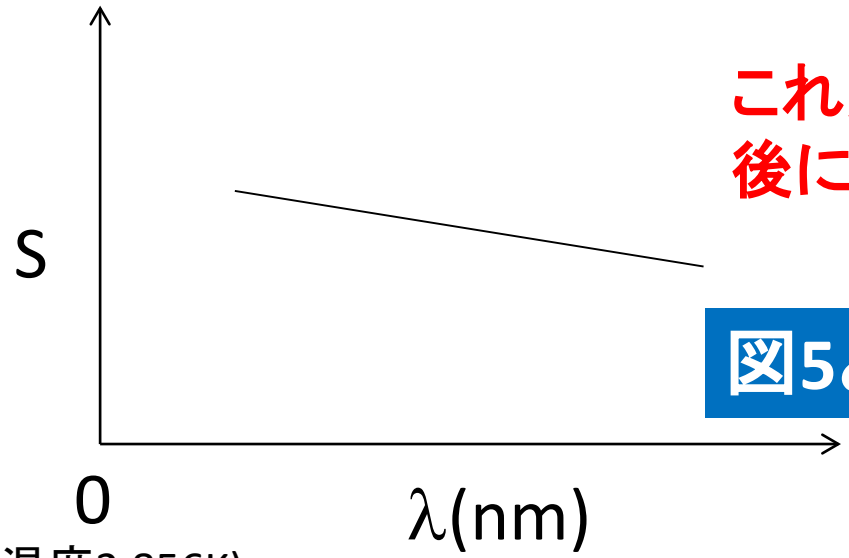
V = 100 V (色温度2,856K)

付録Dより
↓

波長 λ (nm)	出力値 (V)	ゲイン	光電圧 v (V)	発光強度 I_0	分光感度 S = v/I_0
380	1.209	1	1.209	0.133	9.09
400	2.036	1	2.036	0.200	10.18
…	…	…	…	…	…
…	…	…	…	…	…

データのまとめ2

- 横軸λ(nm)、縦軸Sのグラフを作る



これが分光感度S
後に補正のために使用

図5としてレポート

V = 100 V (色温度2,856K)

波長 λ (nm)	出力値 (V)	ゲイン	光電圧 v (V)	発光強度 I_0	分光感度 $S = v/I_0$
380	1.209	1	1.209	0.133	9.09
400	2.036	1	2.036	0.200	10.18
…	…	…	…	…	…

タングステン・ランプの熱放射の分光測定1

- **先程求めた分光感度を用いて、タングステン・ランプの熱放射の分光測定を行う**

- 黒体放射のスペクトラムを求めるとプランクの曲線になるはずで、温度も求めることが出来る
  - 出来るだけ広い波長領域での発光スペクトラム測定が望ましい
  - しかし、ウィーンの変位則よりλ_{max}=2.89x10^3/T [μm/K]なので、3,000Kでもピークは約1μmの赤外領域になってしまう
    - *付録DのT=2,856Kのスペクトルを見ても、まだλ_{max}には達していない*

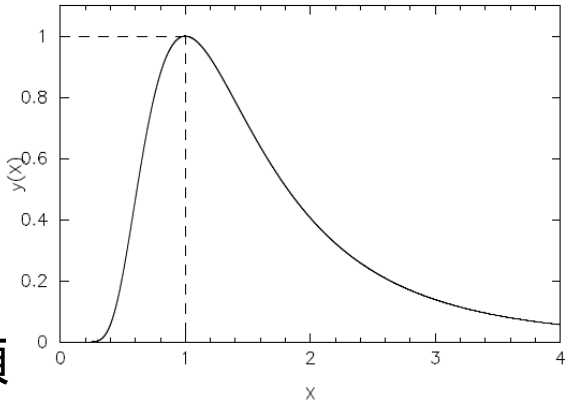
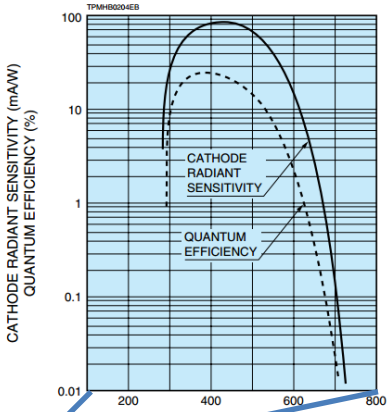
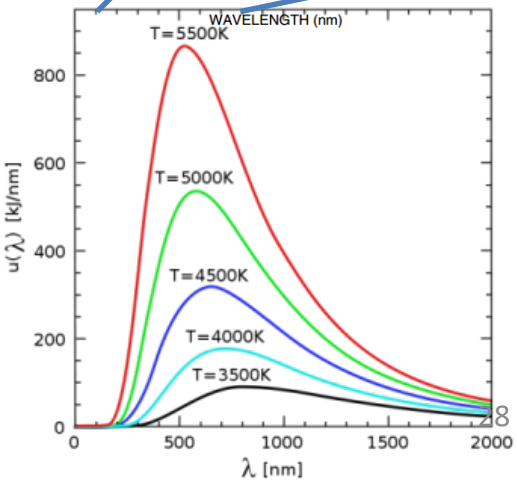


図 7　プランク (Planck) 曲線

タングステン・ランプの熱放射の分光測定2

- 通常のPMTを用いた測定では、赤外波長領域で感度が急激に減少するので、そのような長波長領域は測定できない
  - **そこで、今回はプランクの曲線の”すそ”である、可視波長域380~640nmに限ってPMTで分光測定を行い、曲線の傾きからその色温度を求める**
  - **温度が比較的低温である点灯電圧40~90Vで各々の色温度を求める**





データの記録

- ノートに下記のような表を作り、**その都度**測定値を記入していく
  - **値を読む人、ノートに記録する人、エクセルにまとめる人、と役割分担をすると早く進む**

波長 λ (nm)	90V		80V		…	40V	
	出力値 (V)	ゲイン	出力値 (V)	ゲイン	…	出力値 (V)	ゲイン
380	0.843	1	…	…	…	…	…
400	1.455	1	…	…	…	…	…
…	…	…	…	…	…	…	…

データのまとめ

- データをエクセルにまとめ、光電圧v (=出力値÷ゲイン)を求めて、横軸λ、縦軸vのグラフを作る

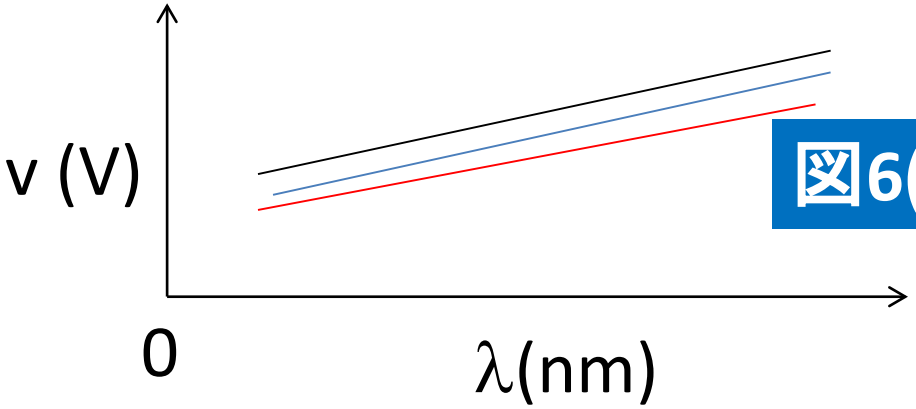


図6(a)としてレポート

波長 λ (nm)	90V		…	40V		光電圧 v(V)		
	出力値 (V)	ゲイン	…	出力値 (V)	ゲイン	90V	…	40V
380	0.843	1	…	…	…	0.843	…	…
400	1.455	1	…	…	…	1.455	…	…
…	…	…	…	…	…	…	…	…

データの解析

- 先程求めた分光感度S(λ)を用いて発光強度I(λ)をI=v/Sより求め、横軸λ、縦軸I(λ)のグラフを作る

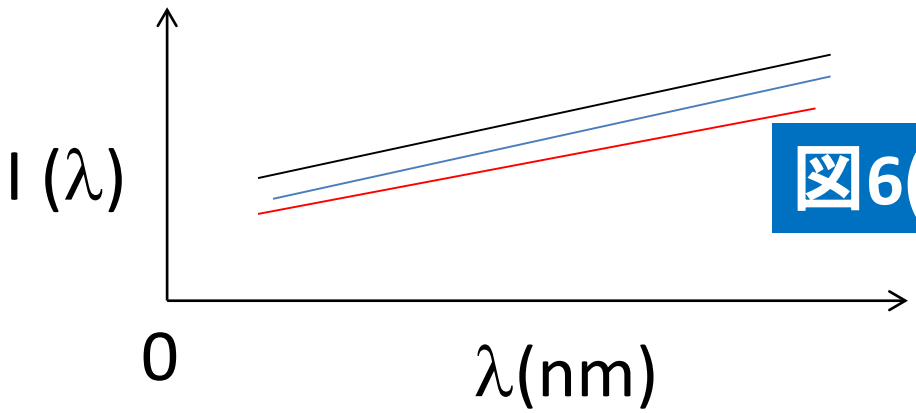


図6(b)としてレポート

波長 λ (nm)	90V		…	40V		光電圧 v(V)			感度 S	発光強度I=v/S		
	出力値 (V)	ゲイン	…	出力値 (V)	ゲイン	90V	…	40V		90V	…	40V
380	0.843	1	…	…	…	0.843	…	…	9.09	0.093	…	…
400	1.455	1	…	…	…	1.455	…	…	10.18	0.143	…	…
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…

*レポートにこの表を載せるときは、分割するなど工夫をする。(途中で変に途切れないように)

データの解釈1

- 発光強度Iが求まったので、これで色温度を決定できる
- 温度が比較的低温(T<3,000K)な可視光波長域の黒体放射スペクトルの形状は、良い精度でプランクの公式はウィーンの公式で近似出来る

プランクの公式

$$\mathrm{W}(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

近似

ウィーンの公式

$$\mathrm{W}(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} e^{-hc/\lambda kT}$$

hc/k=1.44x10^4 μm・Kであるから、T=3,000Kのときはhc/λkT=4.8/λ(μm)。
可視光領域ではλ~0.5μm程度なので、hc/λkT~10となりexp(hc/λkT)>>1。
従ってexp(hc/λkT)-1 ~ exp(hc/λkT)と近似出来る。

W(λ,T)：分光エネルギー密度 = 単位体積、単位波長あたりに放射されるエネルギー[W/m^4]

データの解釈2

- そこで、ウィーンの公式を用いて色温度を求める。ここではW(λ,T)をI(λ)と近似する
  - Wは分光エネルギー密度[W/m^4]、Iは分光放射照度[W/m^3]なので厳密には(係数が)異なるが、変数は同じ

- 得られたI(λ)よりI(λ) xλ^{5}を計算し、横軸1/λ、縦軸I(λ) xλ^{5}を片対数グラフとしてプロットし、y=a*exp(-bx)でフィットする　**← 先週の[課題1]と同じ手順**

- 得られたパラメーターbとウィーンの公式を見比べて、温度Tを推定し、その値を表にまとめる
  - ただし、プランク定数は先週求めた値を使用する

データの解釈3

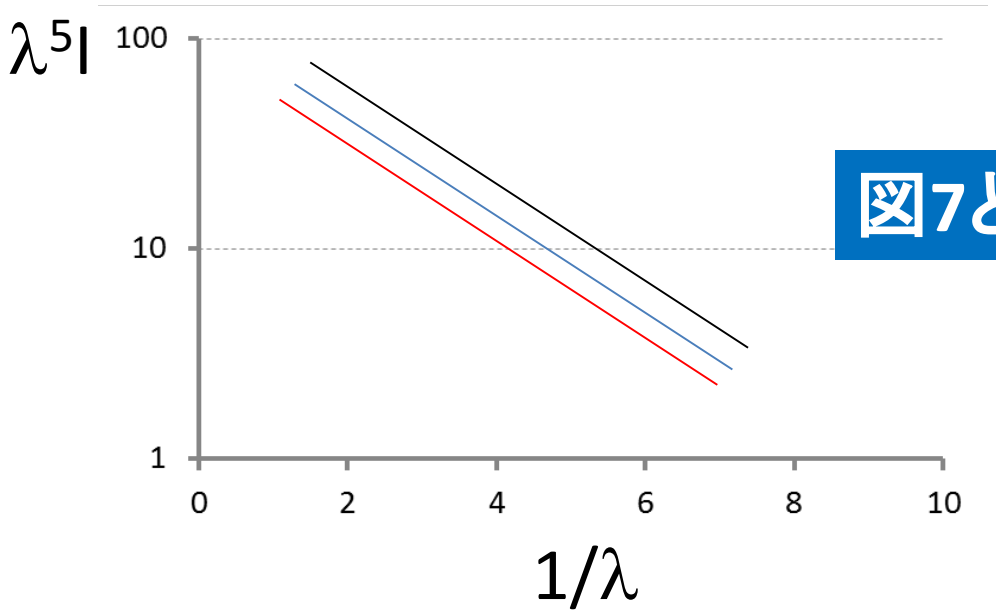


図7としてレポート

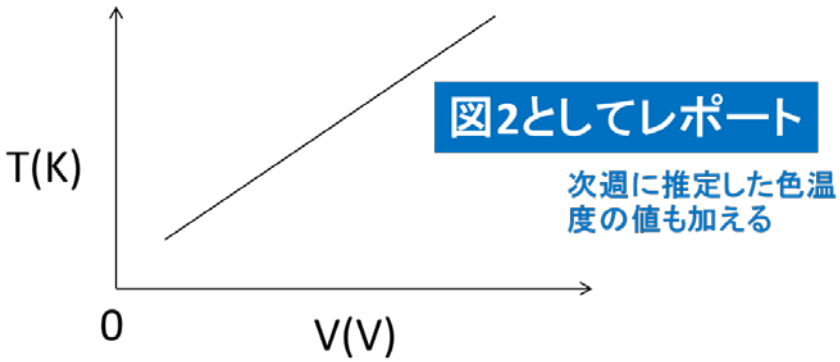
波長 λ (nm)	…	発光強度I			1/λ (m)	λ5I		
	…	90V	…	40V		90V	…	40V
380	…	0.093	…	…	2.63E+6	7.35E-34	…	…
400	…	0.143	…	…	2.50E+6	1.46E-33	…	…
…	…	…	…	…	…	…	…	…

データの解釈4

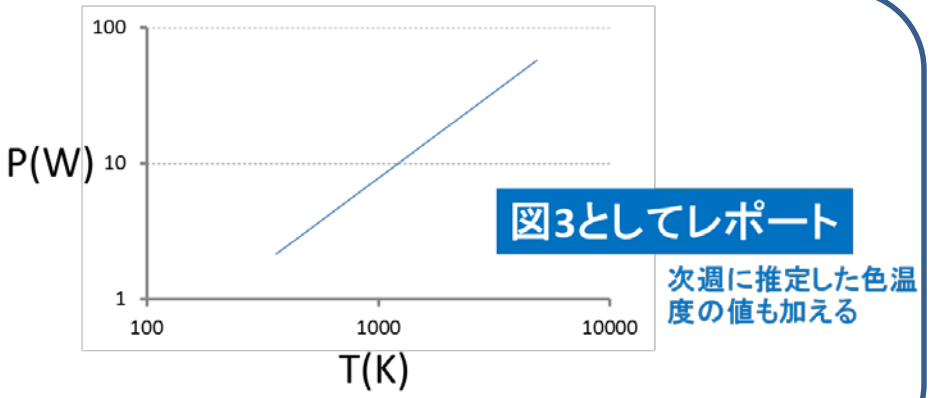
- 先週作成した図2に今回推定した温度を加える(温度-電圧)
- 先週作成した図3に今回推定した温度を加える(電力-温度)
  - 電力P=V*Iを計算する際、前回測定した電流Iを用いて良い

V, T, P をまとめておく

電圧V	温度T	電力P
90		
80		
70		



先週作成した図2



先週作成した図3

考察(と課題)

- T=2,856Kの電圧で測定した結果は、この解析の対象にはならないのは何故か?
  - 分光感度校正に用いている参考文献の温度はいくつ?
- 図3に加えた数値を前回と同様に$y=a*x^b$で近似したときのパラメーターbはどうなるか? 結果が前と(大きく)異なる場合、何が原因か?
- (課題)ウィーンの変位則を用いてT=2,856Kの時の最大波長λ_{max}も計算しておく。