

# 可視光用 超伝導転移端センサーの開発

産総研 量子光計測研究グループ  
服部香里

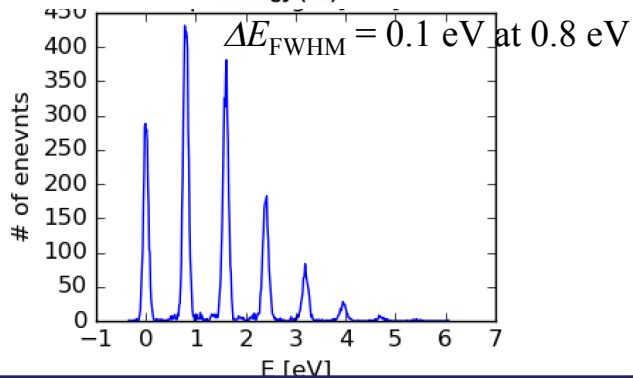
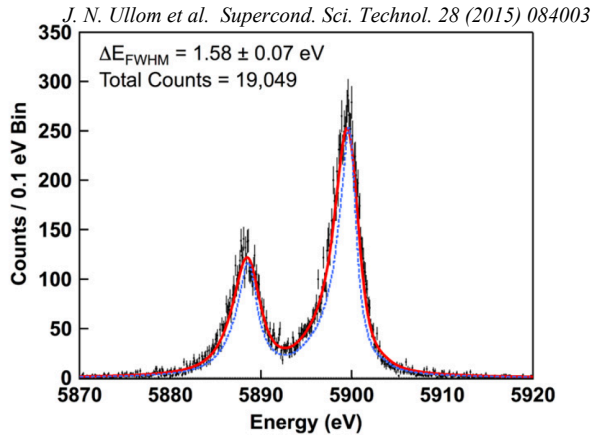
# Outline

- 超伝導検出器overview
- Transition edge sensor (TES)の動作原理
- 可視光用TESの研究
  - ✓ TES+走査型顕微鏡によるカラーイメージング
  - ✓ エネルギー分解能・検出効率
- アレイ化に向けて
- まとめ

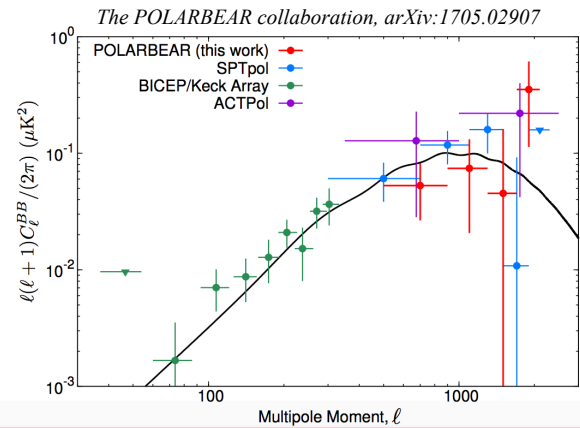
# 超伝導検出器

極低温(0.1 K – 数K)で動作  
非常に低ノイズ

カロリメータ  
X線・ガンマ線・可視光

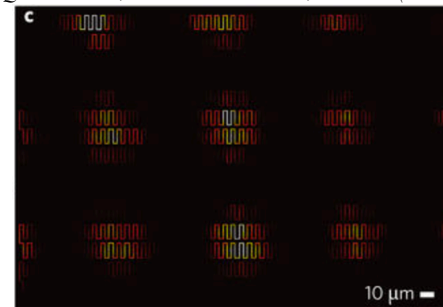


ボロメータ: ミリ波



Photon-counting: 近赤外、可視光

*Q. Zhao et al., Nature Photonics 11, 247–251 (2017)*

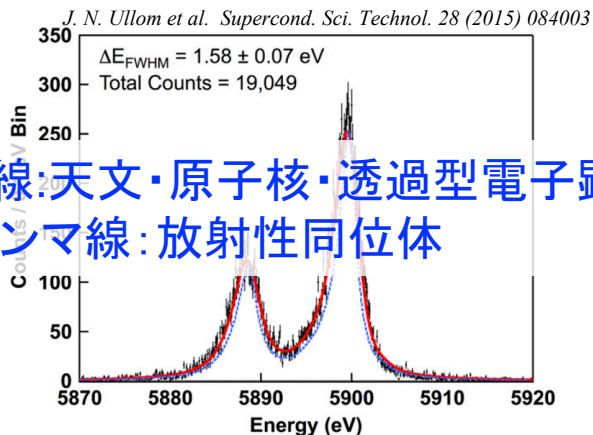


エネルギー  
分解能なし

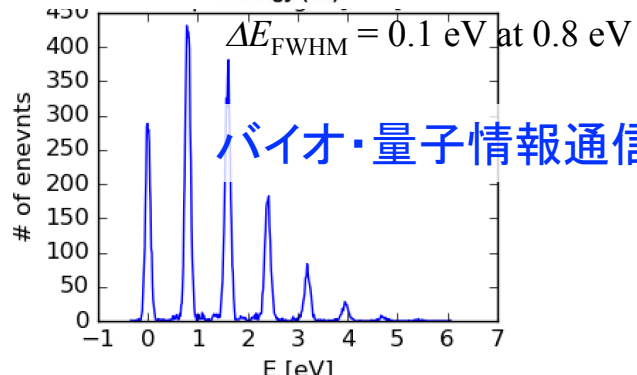
# 超伝導検出器

極低温(0.1 K – 数K)で動作  
非常に低ノイズ

カロリメータ  
X線・ガンマ線・可視光

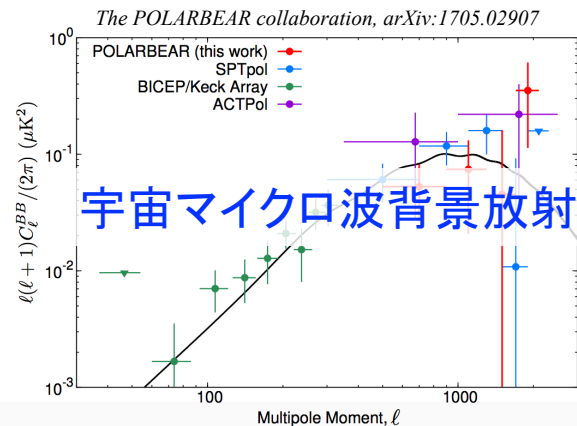


X線:天文・原子核・透過型電子顕微鏡  
ガンマ線:放射性同位体



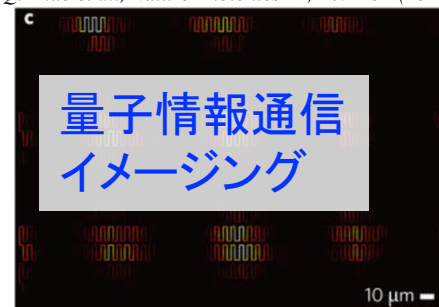
バイオ・量子情報通信

ボロメータ:ミリ波



Photon-counting: 近赤外、可視光

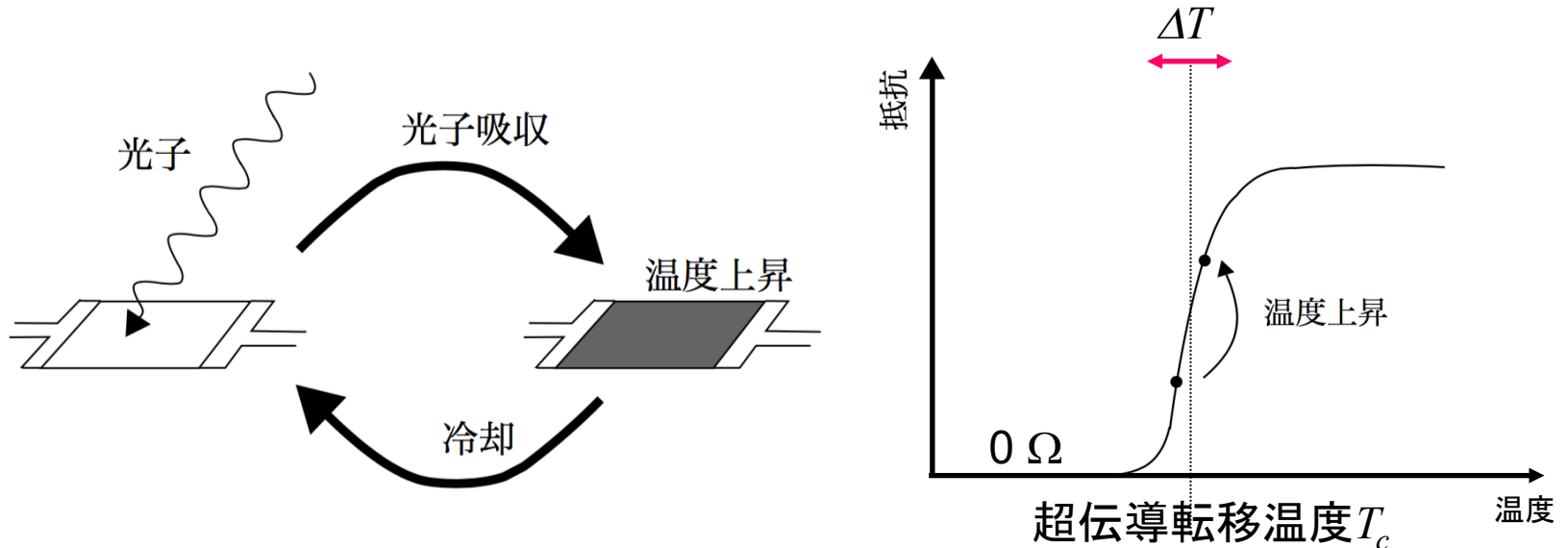
*Q. Zhao et al., Nature Photonics 11, 247–251 (2017)*



エネルギー  
分解能なし

# Transition edge sensor (TES)

photon測定：ミリ波からガンマ線まで

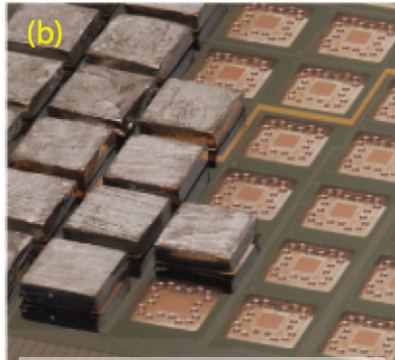


光子のエネルギー  $\propto$  温度上昇  
 $\rightarrow$  TESの抵抗変化

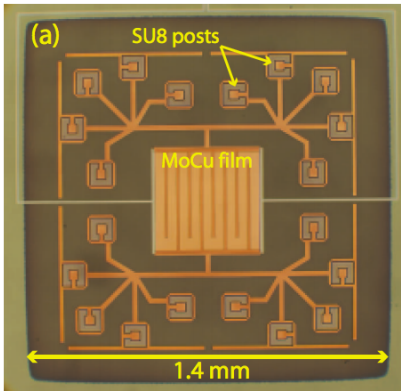
# Transition edge sensor (TES)

## ガンマ線

D. A. Bennett et al., *Rev. Sci. Instrum.* 83, 093113 (2012)



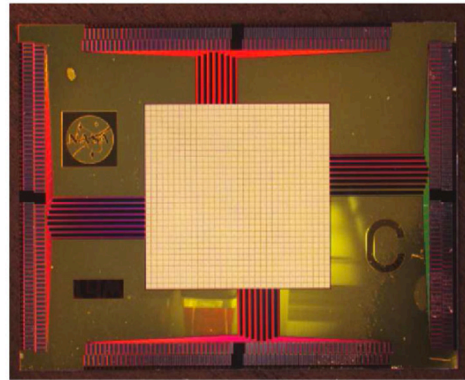
53 eV@97 keV



吸収体: 1mm角、厚さ数百 $\mu$ m  
TES: 数百 $\mu$ m角、厚さ数百nm

## X線

J. N. Ullom et al. *Supercond. Sci. Technol.* 28 (2015) 084003



2 eV@5.9 keV

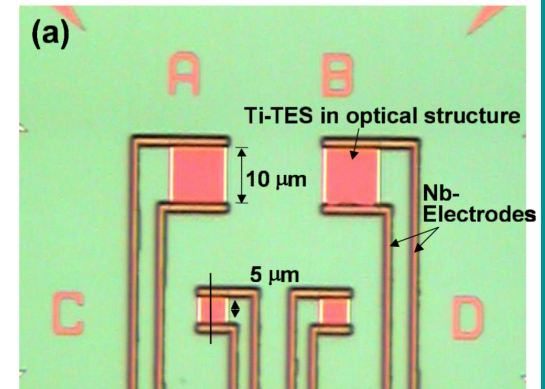


吸収体: 200 $\mu$ m角、厚さ数 $\mu$ m  
TES: 100-200 $\mu$ m角、厚さ100nm

$$\Delta T = E_{\text{photon}}/C$$

## 可視光・近赤外

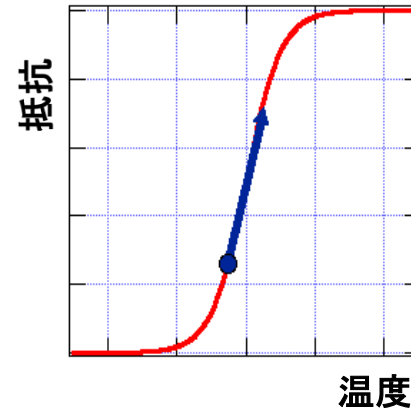
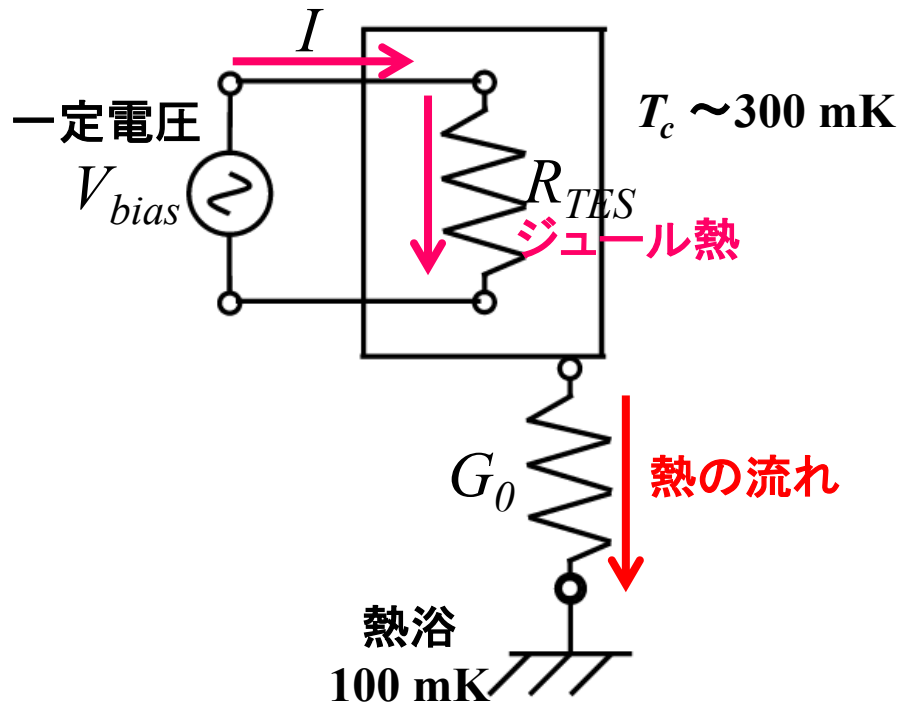
0.1 eV@0.8 keV



D. Fukuda et al., *Metrologia*, 46 (2009) S288–S292

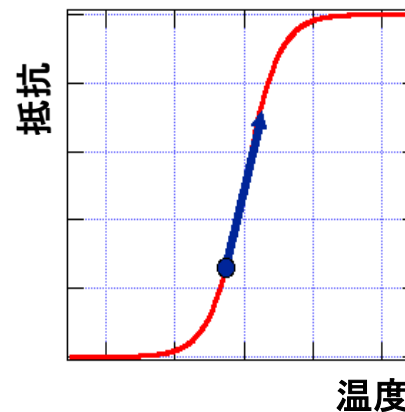
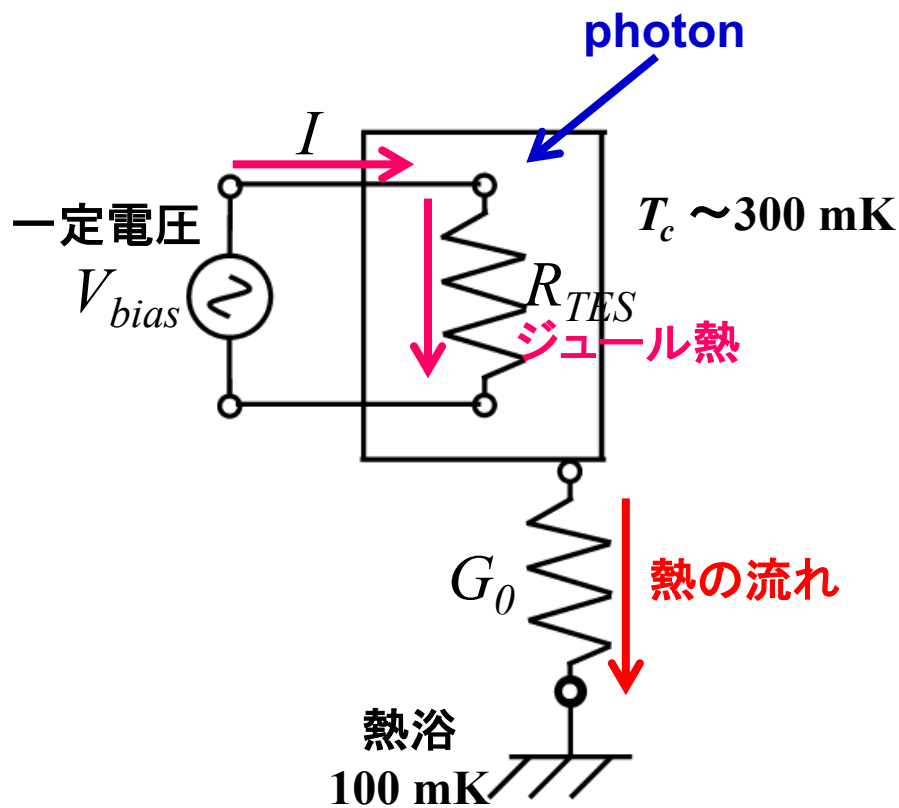
TES: 5-10 $\mu$ m角、厚さ20nm  
吸収体なし

# TESの動作原理



定常状態  
ジュール熱 = 熱浴へ逃げる熱

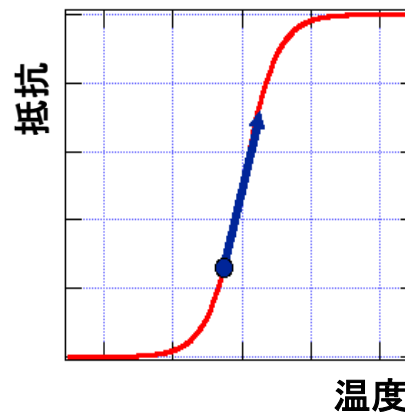
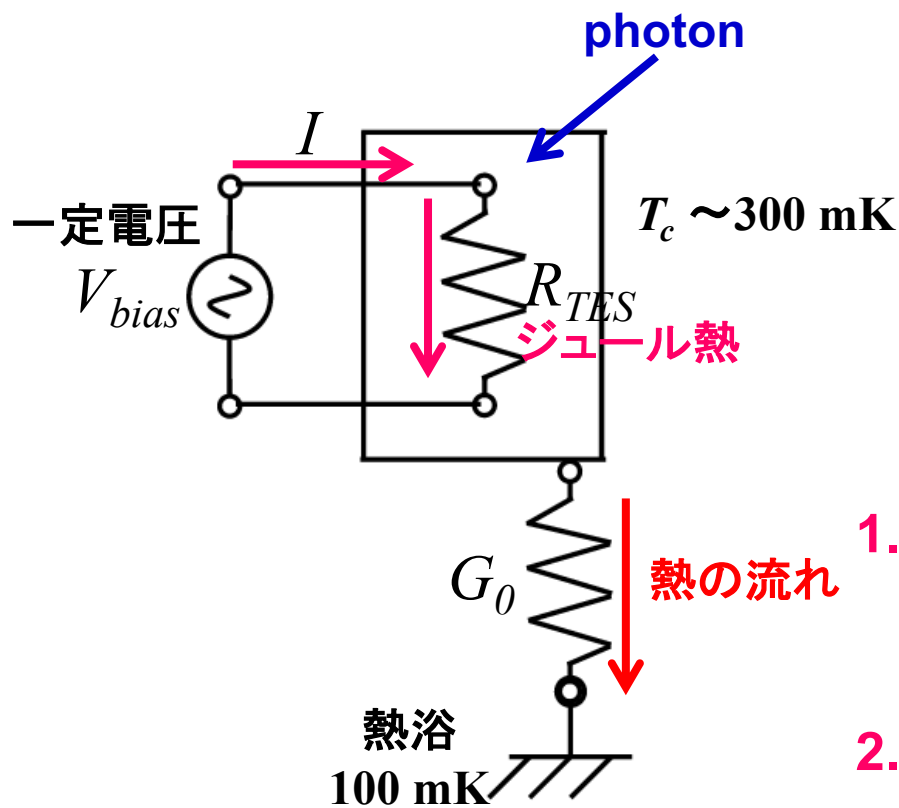
# TESの動作原理



photon吸収  $\rightarrow R_{TES}$ :大



# TESの動作原理

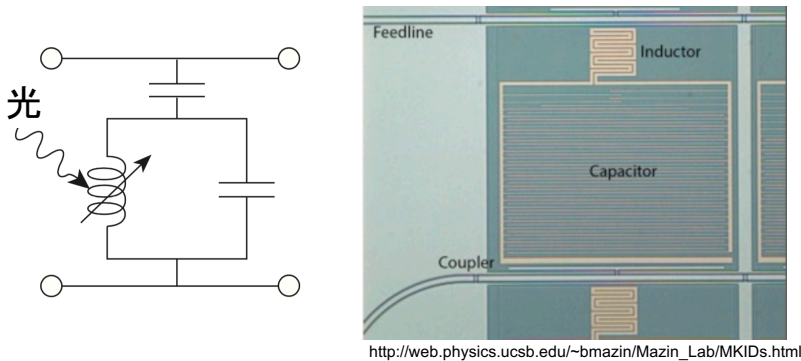


1. 一定電流バイアス ×  
 $R_{TES} : \text{大} \rightarrow \text{ジュール熱大} \rightarrow R_{TES} : \text{大}$
2. 一定電圧バイアス ○  
 $R_{TES} : \text{大} \rightarrow \text{ジュール熱少} \rightarrow R_{TES} : \text{小}$

# その他の超伝導検出器

## 動的インダクタンス変化

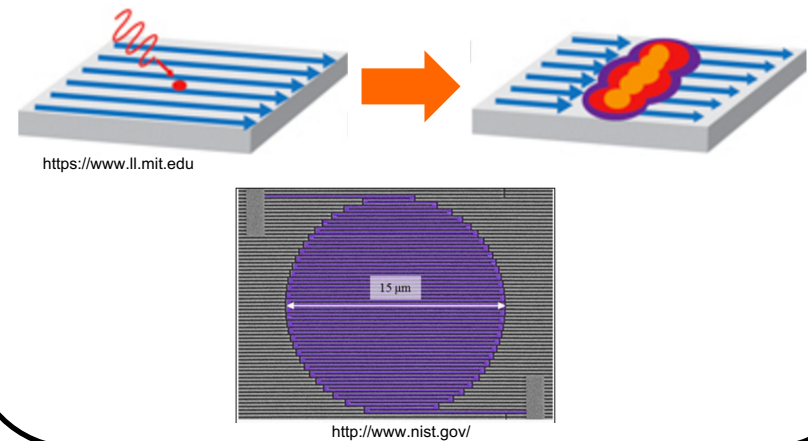
Microwave kinetic inductance detector (MKID)



エネルギー分解能あり  
1,000個まとめて読み出せる  
可視光～X線

## 超伝導/常伝導

ナノワイヤー



エネルギー分解能なし・高速  
デジタル的  
近赤外・可視光

# 超伝導検出器：現状

	動作温度	エネルギー分解能	量子効率 [%]	読み出し方式	ピクセル数	計数率
超伝導転移端センサー(TES)	0.1 – 0.3 K	0.1 eV (1,550 nm)	98	10個同時読み出し	< 10	> 10 MHz
ナノワイヤー (SNSPD)	数K	なし	> 90	二次元読み出し	> 100	1 GHz
マイクロ波動的インダクタンス検出器 (MKID)	0.1 K	0.3 eV (294 nm)	50 (500 nm, 予想値)	1,000個同時読み出し	~ 10 <sup>3</sup>	> 2 kHz

# Optical TES

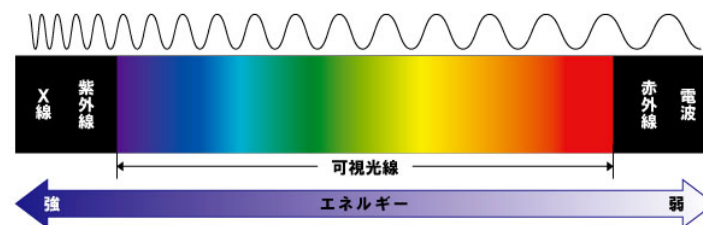
# 微弱光を見る

## 日常生活における光

大量の光子が到来  
 光子を一個ずつとらえるのは不可能  
 パワーを測定  
 Cd、ルクス、W

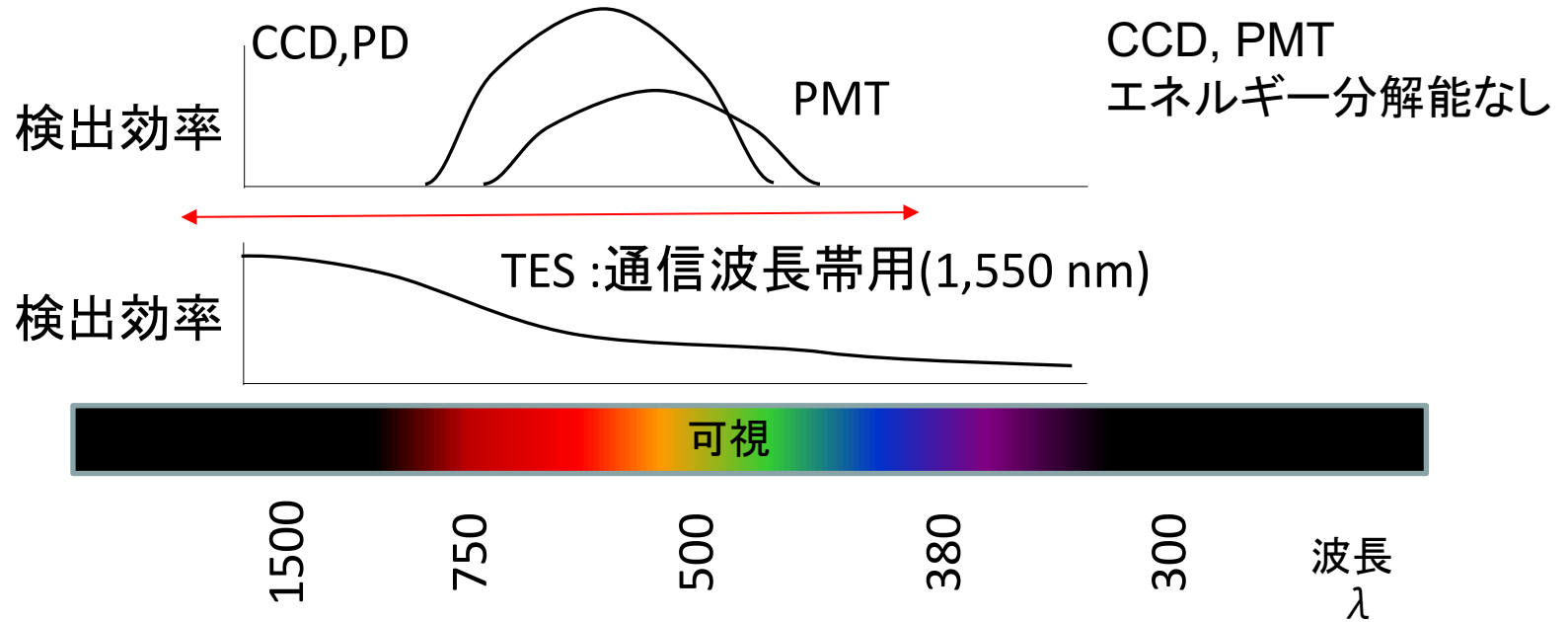
### 微弱光

光子が一個ずつ到来  
 光子を数えることが可能  
 一個の光子のエネルギーを測定  
 可視光: 3.3(紫) – 1.6(赤) eV



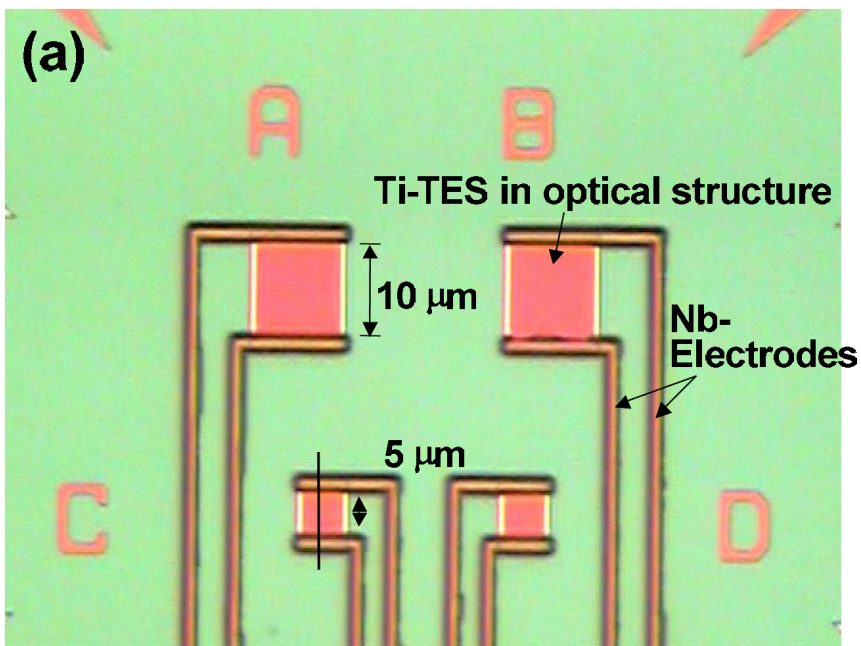
Single photon source(量子情報通信)、生物発光、蛍光色素など

# 帯域

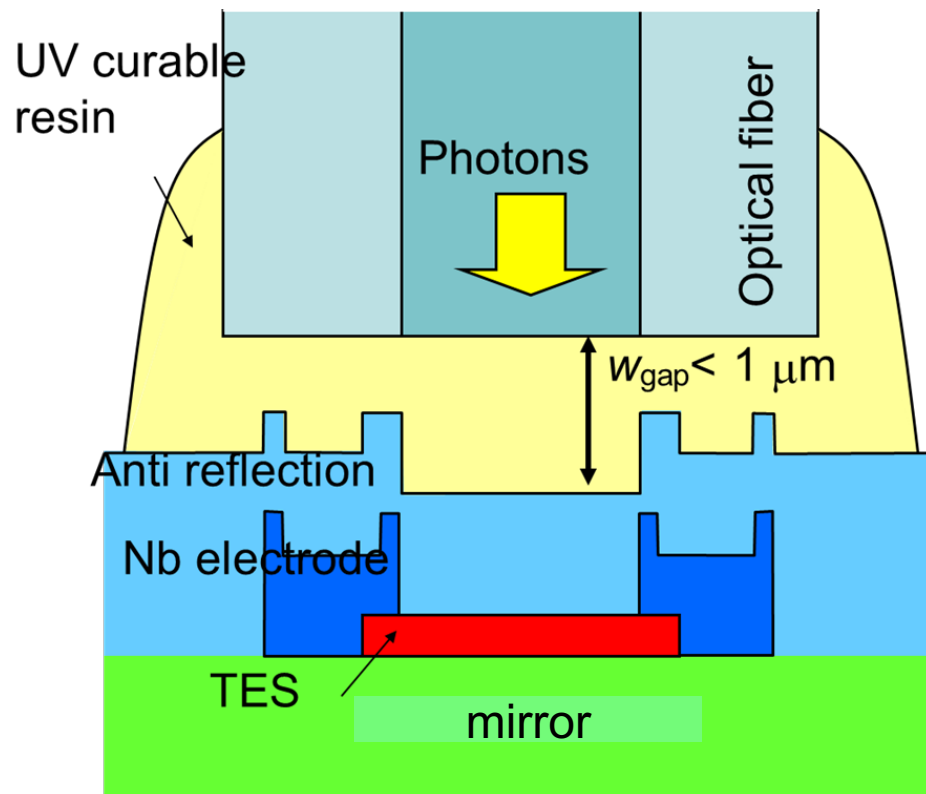


# Optical TES

現在はAu/Ti TES(20/10 nm)に変更

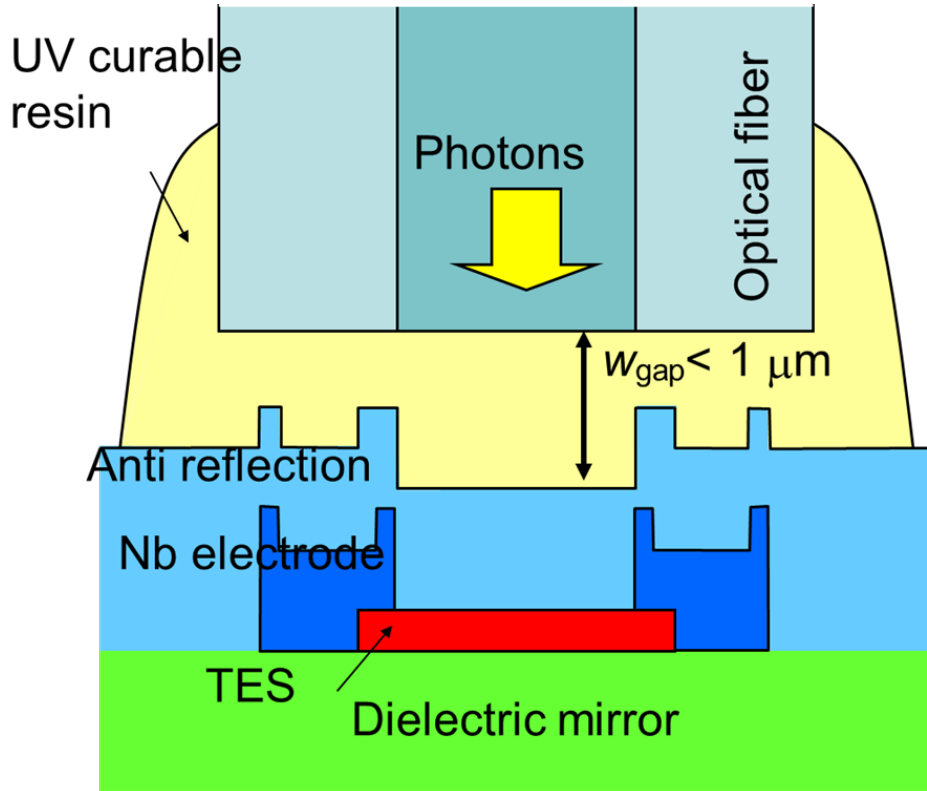


超伝導転移温度 300 mK  
断熱消磁冷凍機冷凍機 100 mK

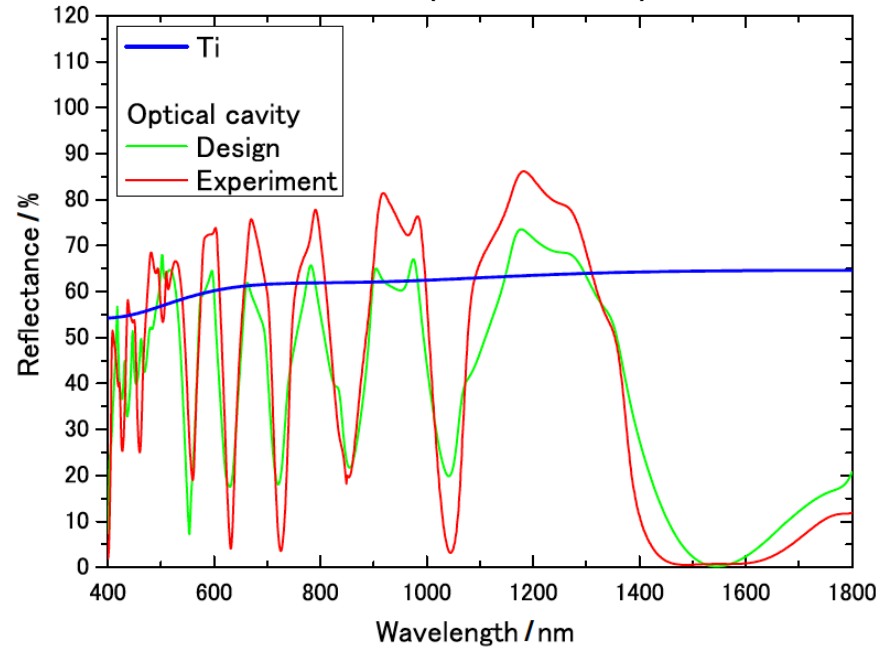


反射防止膜(AR coating)  
見たい波長にあわせてチューニング

# 反射率

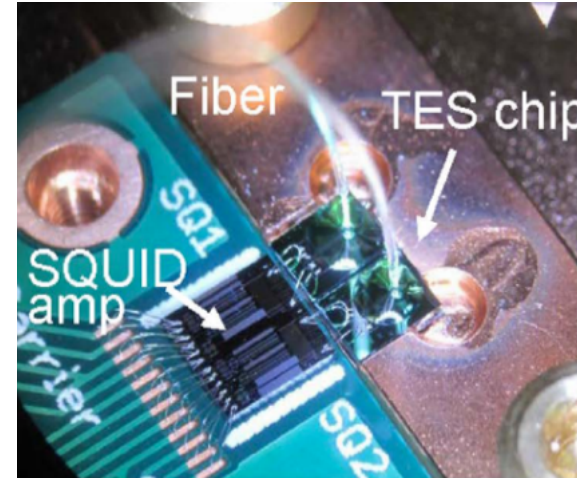
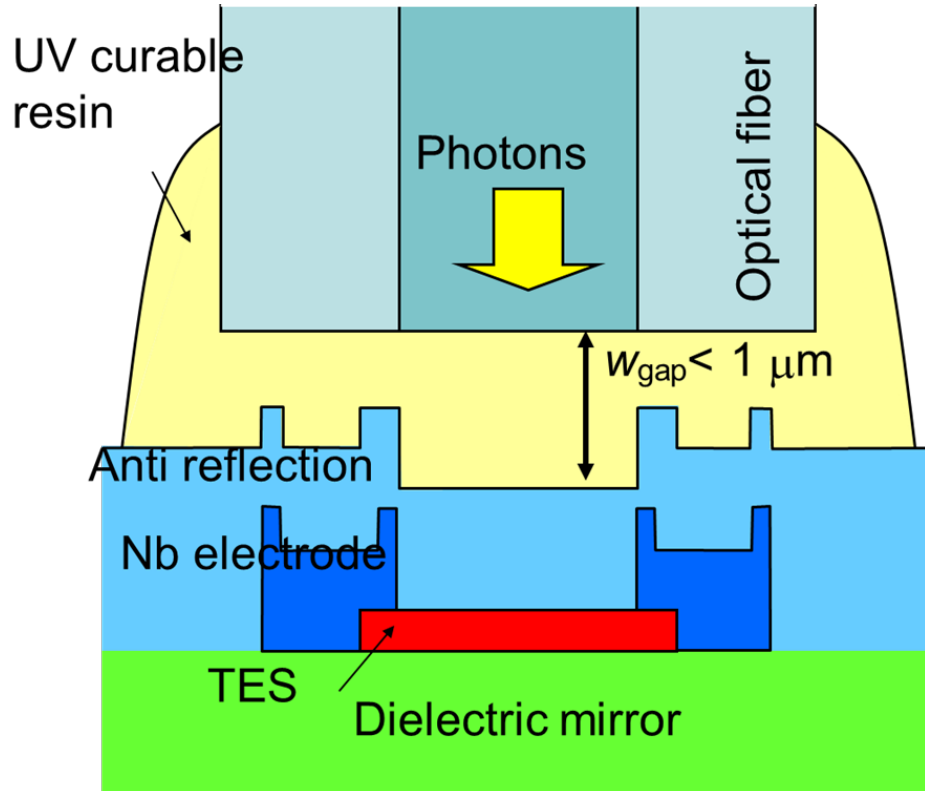


通信波長帯(1,550 nm)用TES





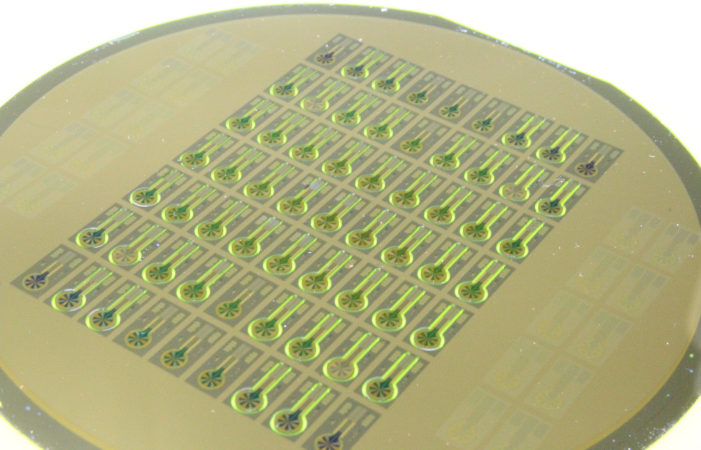
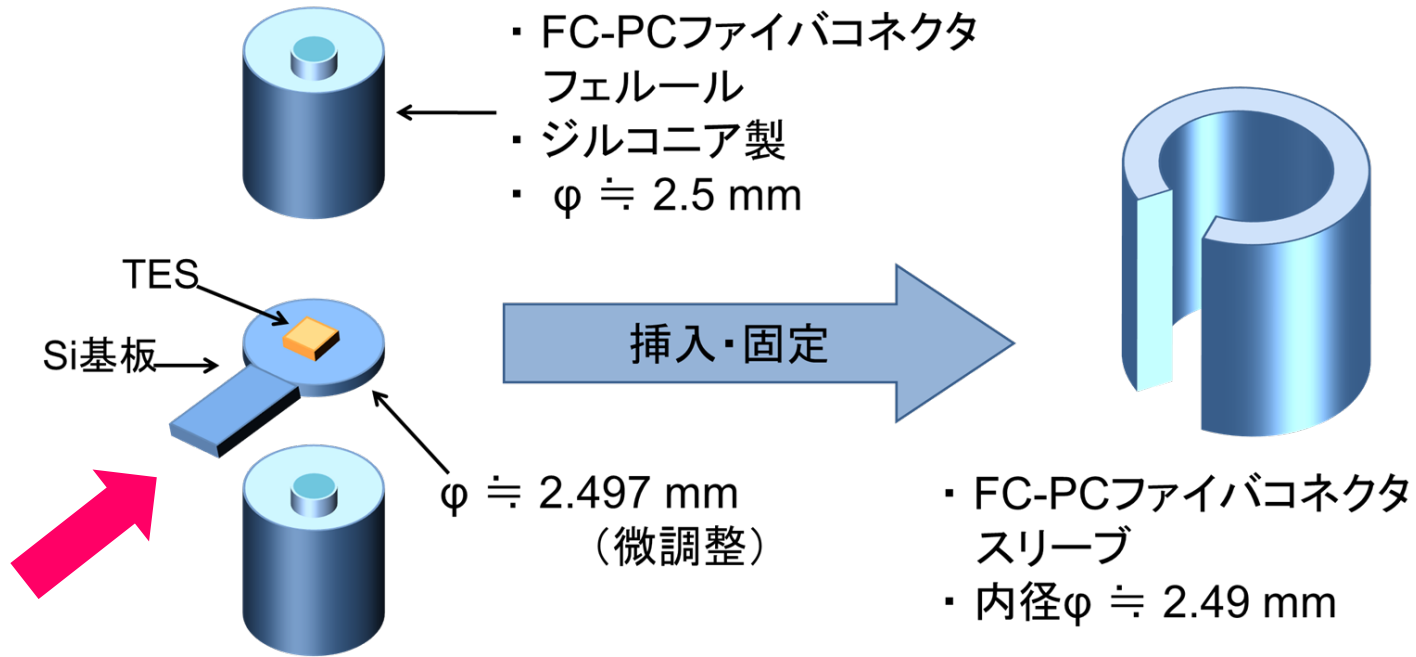
# TES + fiber



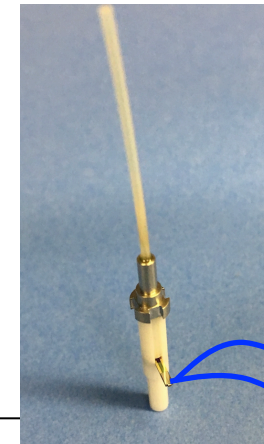
時間と手間がかかる  
 顕微鏡で位置合わせ  
 光ファイバーと検出器の間は  
 紫外線硬化樹脂で充填  
 わずかな力でファイバーがはずれる  
 Thermal cycleに弱い

# Self-aligning fiber-to-detector coupling

A. Miller et al., *Opt. Exp.* 19 (2010) 9102.



深堀エッチングでシリコンウェハをラケット型にくりぬく



ワイヤーボンド

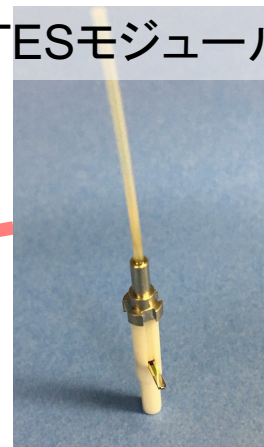
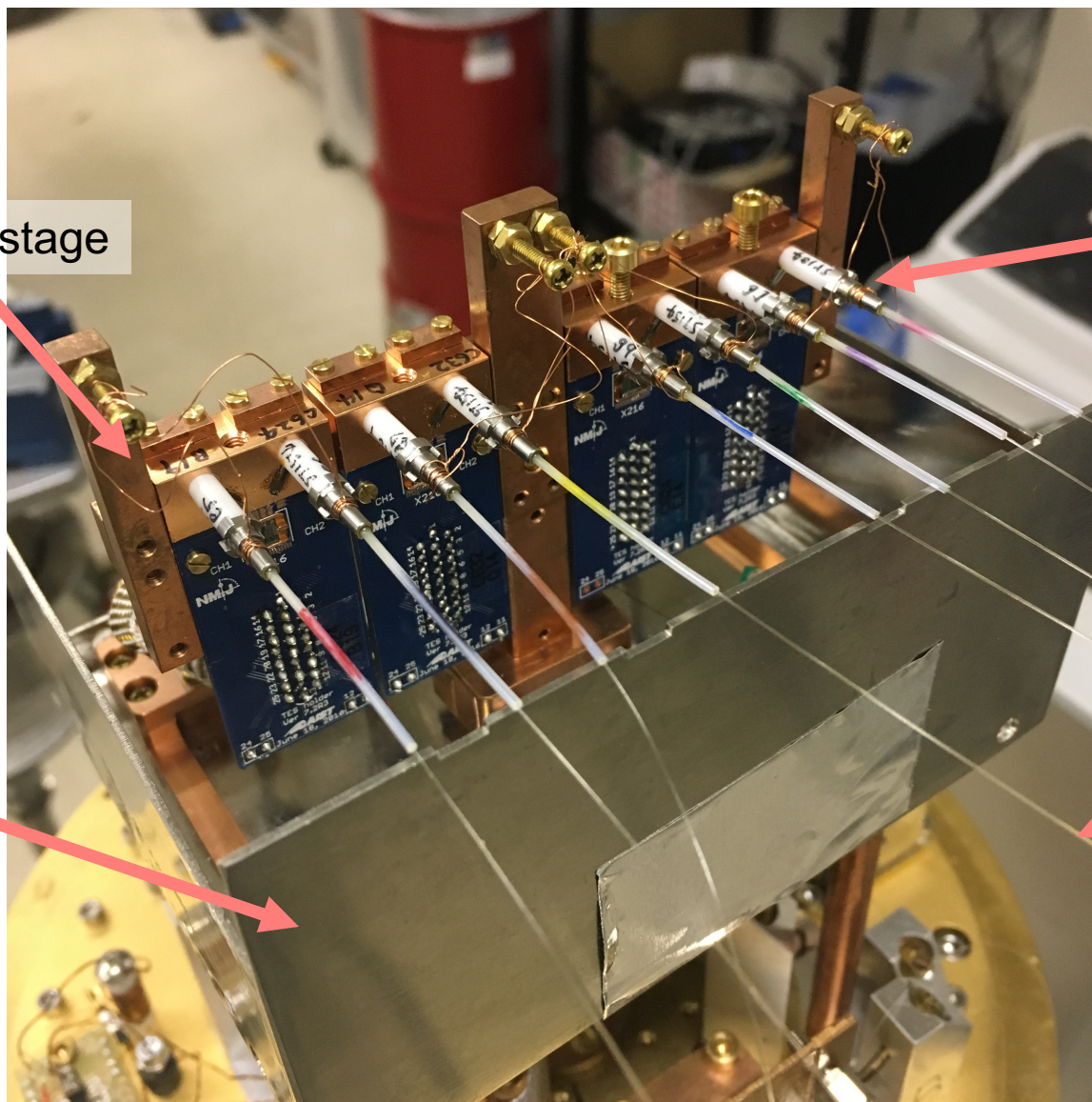
# Self-aligning fiber-to-detector coupling

100 mK stage

TESモジュール

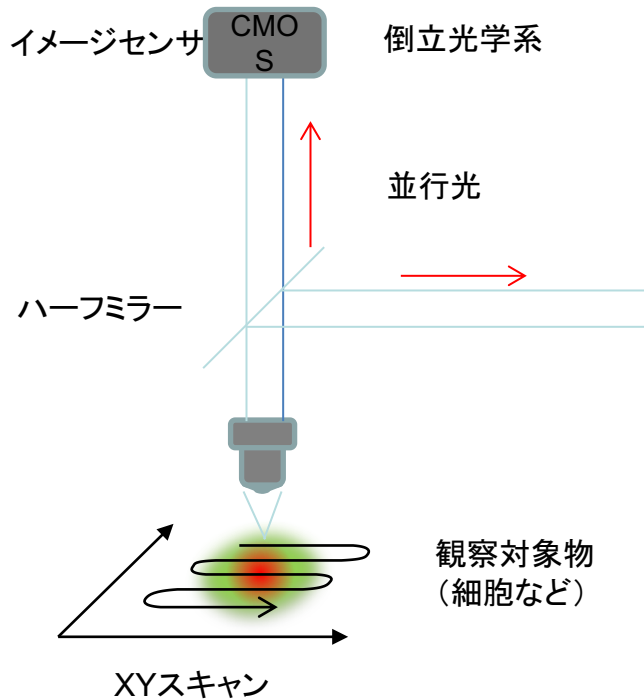
磁気シールド

光ファイバー

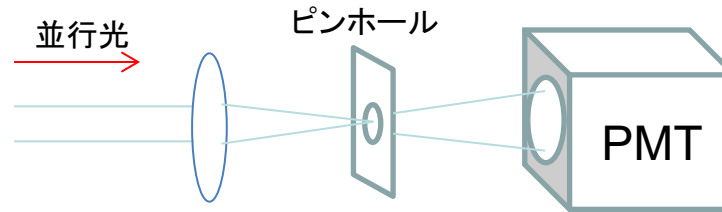


# 走査型顕微鏡への応用

バイオ分野で広く使われている

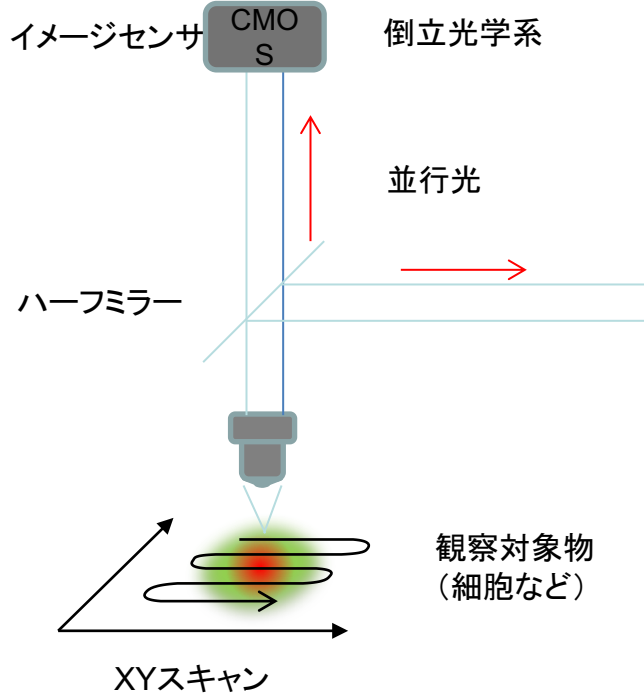
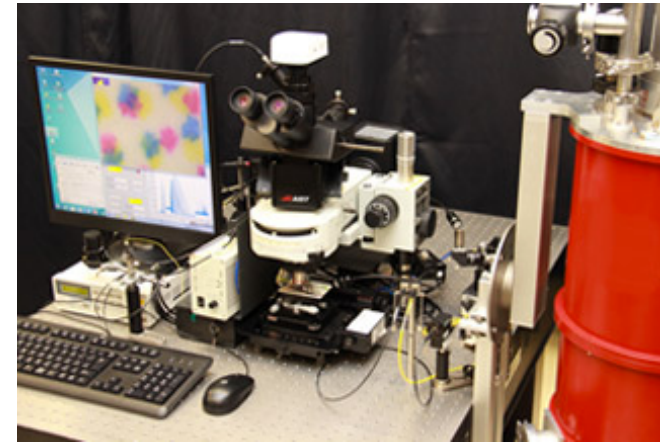


これまでの共焦点顕微鏡

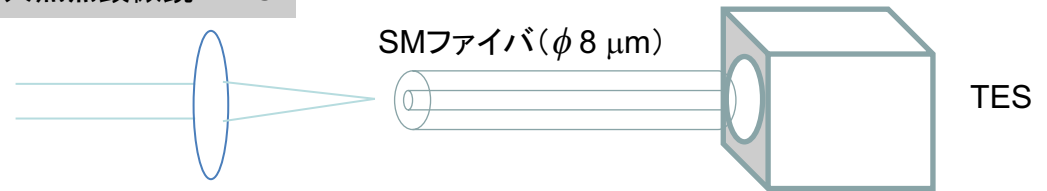


- ✓ 一点のみ見ることで高いコントラストを実現
- ✓ スキャンで二次元イメージング
- ✓ 検出器はエネルギー分解能がない
  - フィルターを使用
  - 多色のイメージングに向かない

# 走査型顕微鏡+TES



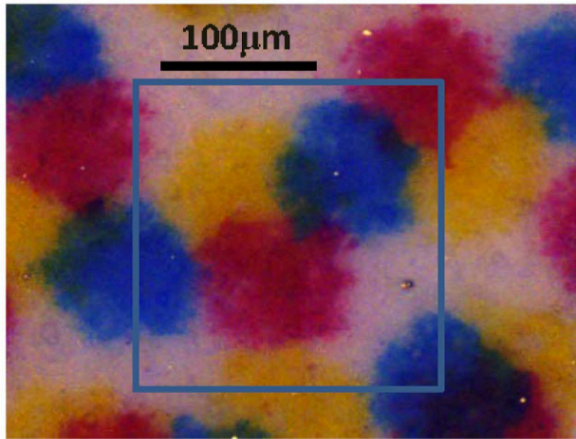
共焦点顕微鏡+TES



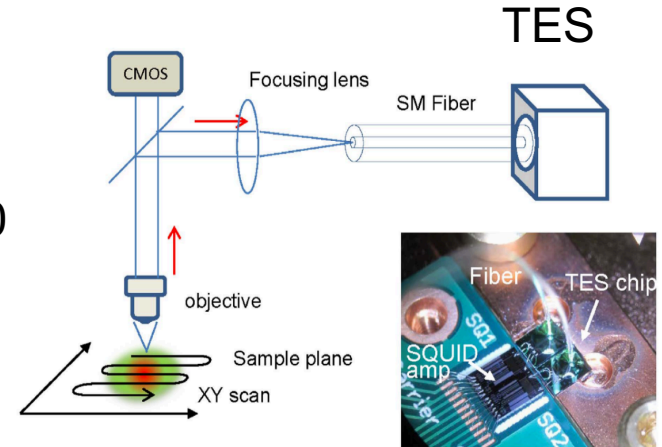
- ✓ Dark countほぼゼロ→超高感度
  - ✓ 可視光から近赤外まで一気に測定
  - ✓ フィルター必要なし
- 多色のイメージングに向いている

# Photon-counting microscopy

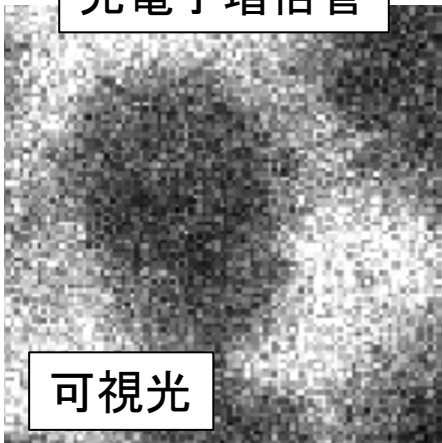
Niwa et al. *Scientific Reports* 7 (2017) 45660.



カラーCMOS  
 光量 : ×100  
 露光時間 : ×10

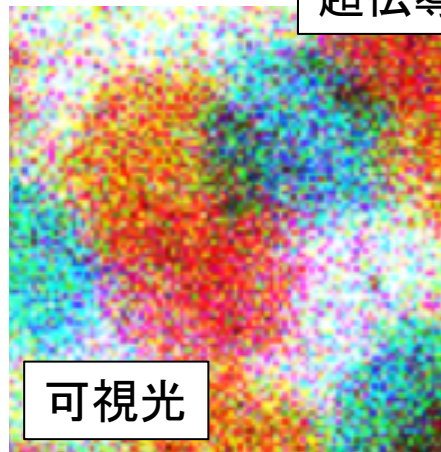


光電子増倍管



可視光

超伝導光センサー



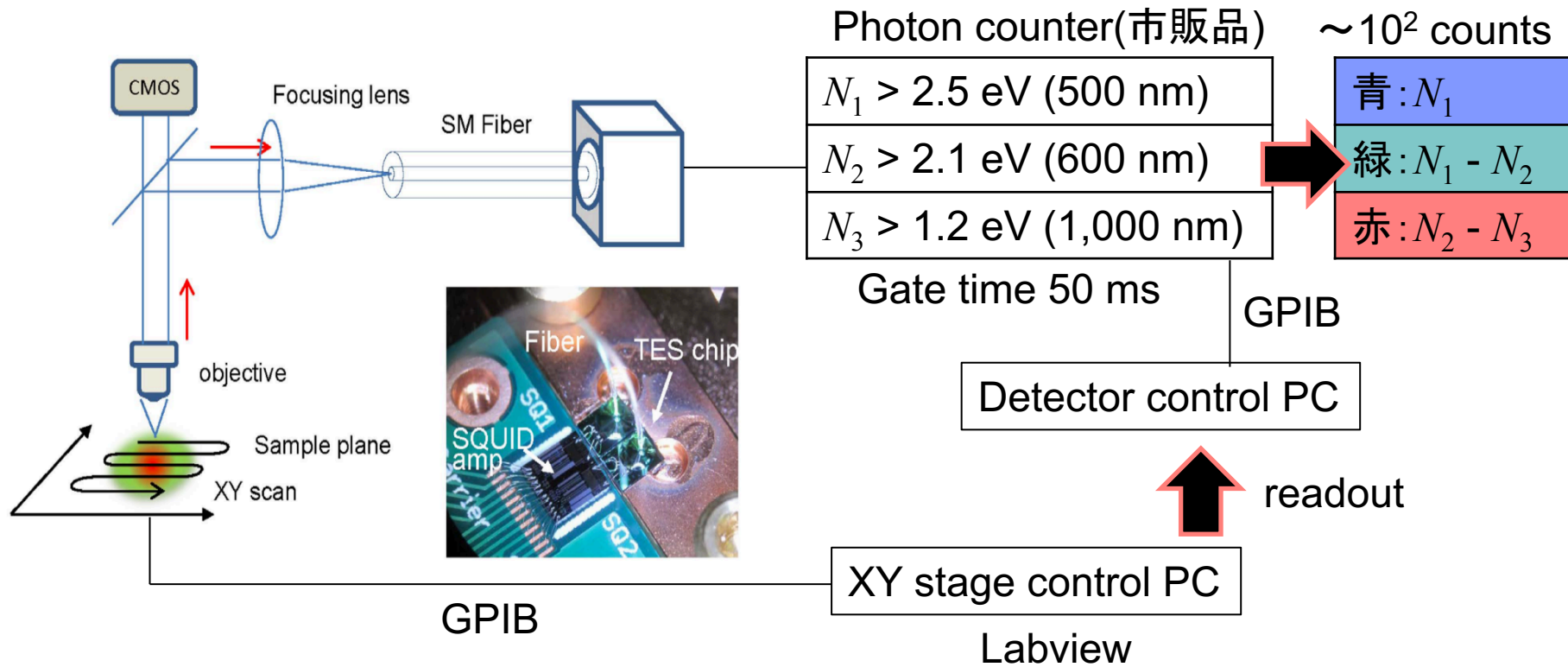
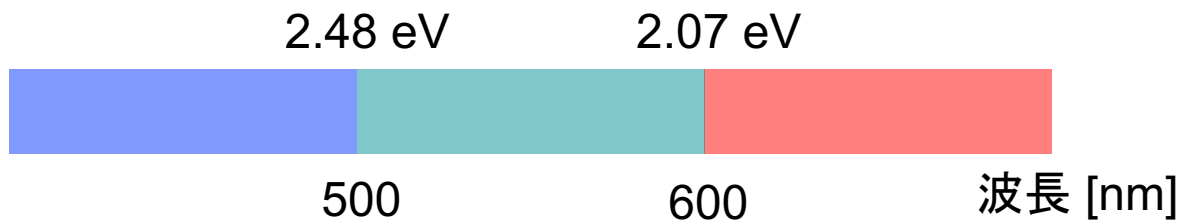
可視光



近赤外

50 ms / pixel, pixel pitch 2 μm

# DAQ



# DAQ: 課題

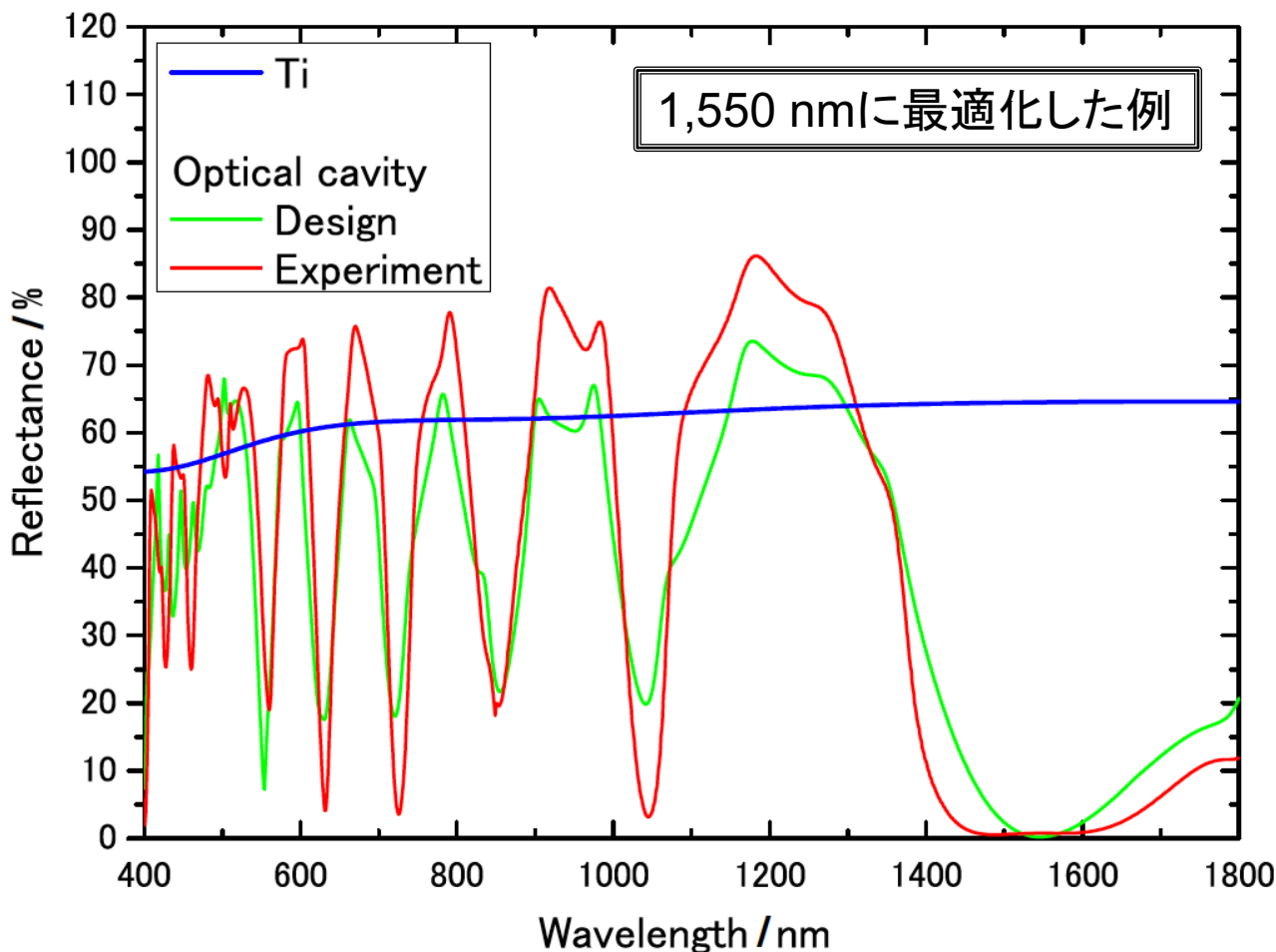
- TESをアレイ化してスキャン時間を短縮したい
  - 現在のDAQは拡張性がない  
数 channelが限界
  - TESのエネルギー分解能をフルに生かせていない  
Pulse heightを使用している  
高いエネルギー分解能を得るにはpulse shapeを使用
- ADC + FPGAでオンライン解析をしたい



# イメージングの原理実証はできた

## 次の課題 色をちゃんと見る

# 反射防止膜(anti-reflection coating)



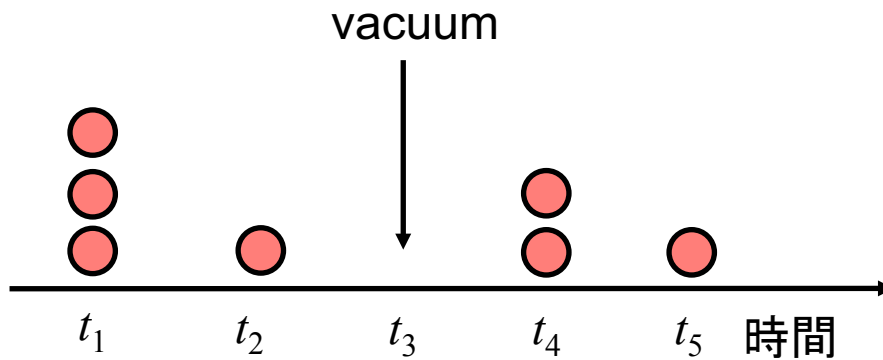
さまざまな波長での検出効率測定を行う  
可視光領域に最適化したARの設計・製作はこれから

# 検出効率/エネルギー分解能の測定

1,550 nm (0.8 eV)



冷凍機



Poisson分布

$$P(n) = \frac{\mu_p^n e^{-\mu_p}}{n!}$$

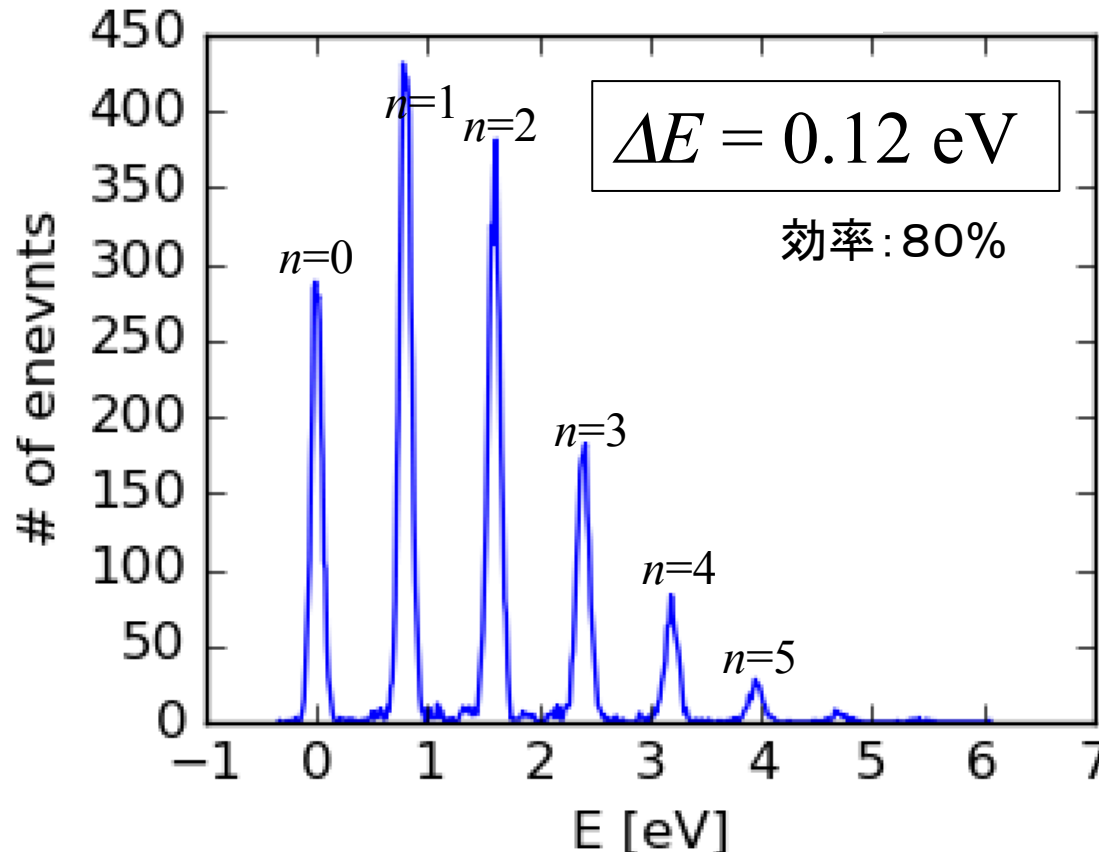
$\mu_p$ : 検出された平均photon#

検出効率  $\frac{\mu_p}{\mu}$

$\mu$ : ソースの平均photon#

# エネルギー分解能/検出効率の測定

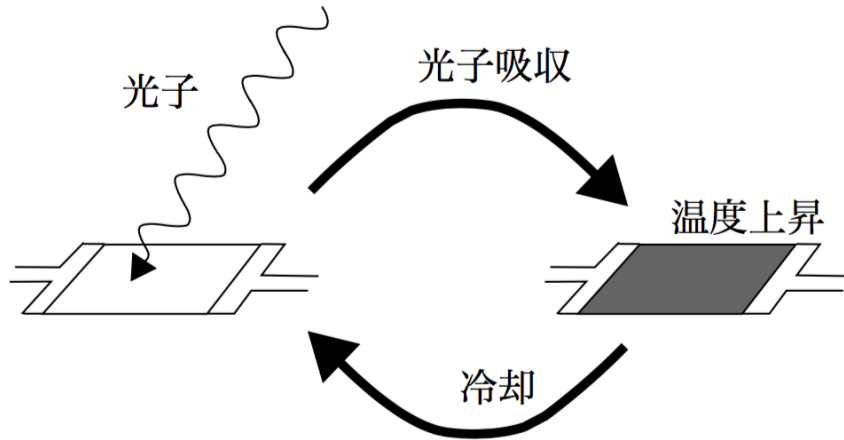
0.8 eV (1,550 nm, 通信波長帯)のパルスレーザー



検出効率の最高記録は98% at 980 nm

Photon countingには十分なエネルギー分解能

# 波長分解能



波長 $\lambda$ の光子のエネルギー  $E = \frac{hc}{\lambda}$

エネルギー分解能  $\Delta E = 0.1 \text{ eV}$   
 実際は高エネルギーほど  $\Delta E$ は大きくなる(数十%)

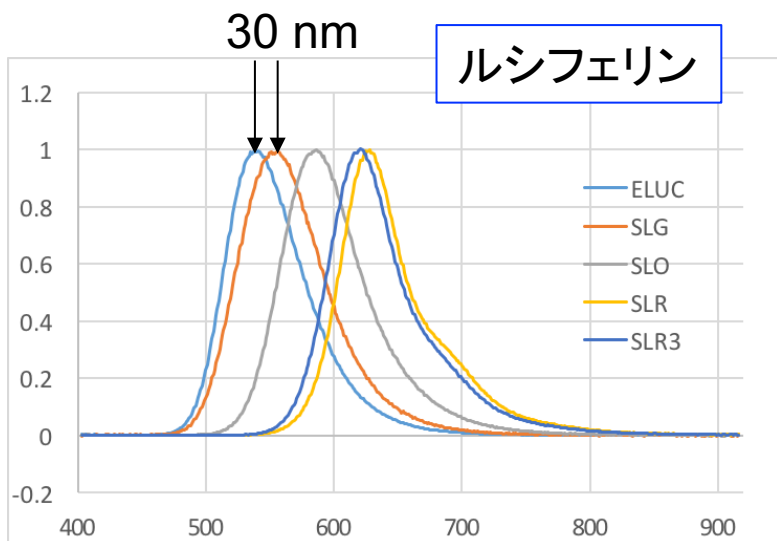
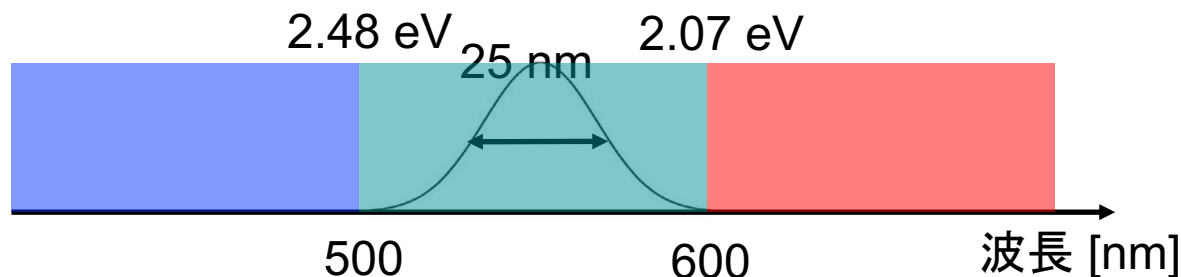
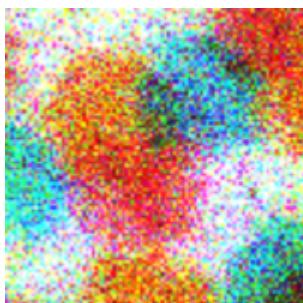
波長分解能  $\Delta\lambda = 8 \times 10^{-5} \lambda^2 \text{ [nm]}$

色	赤	緑	紫
波長 [nm]	780	550	380
エネルギー [eV]	1.6	2.3	3.3
$\Delta E$ [eV]	0.1	0.1	0.1
$\Delta\lambda$ [nm]	50	25	13

波長が短いほど波長分解能は高い

# 色をちゃんと見るには

RGBの分離はできている



複数の蛍光色素を用いたイメージング

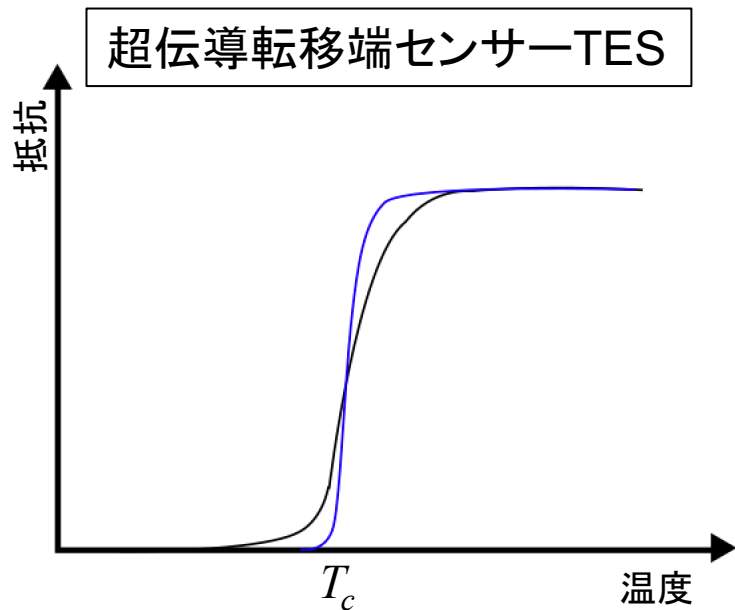
- 波長の近い( $\Delta\lambda =$ 数十nm)蛍光色素の分離
- ~10 nmの分解能が必要
- エネルギー分解能0.04 eV

# エネルギー分解能向上への道筋

今の $\Delta E$ が最良のものか？改善できるか？

- 超伝導光センサーの特性理解
    - エネルギー分解能を決定づける要因を探索
    - 光センサーの物理を理解
    - 性能評価の手法を確立
  
  - エネルギー分解能の高い素子を作成
    - 1素子での試験
    - アレイ化もやりたい
- }
- 現在進行中
- }
- 今後

# エネルギー分解能の決定要因



$$\Delta E_{FWHM} = 2.36 \sqrt{4k_B T_c^2 C / \alpha \sqrt{n/2}}$$

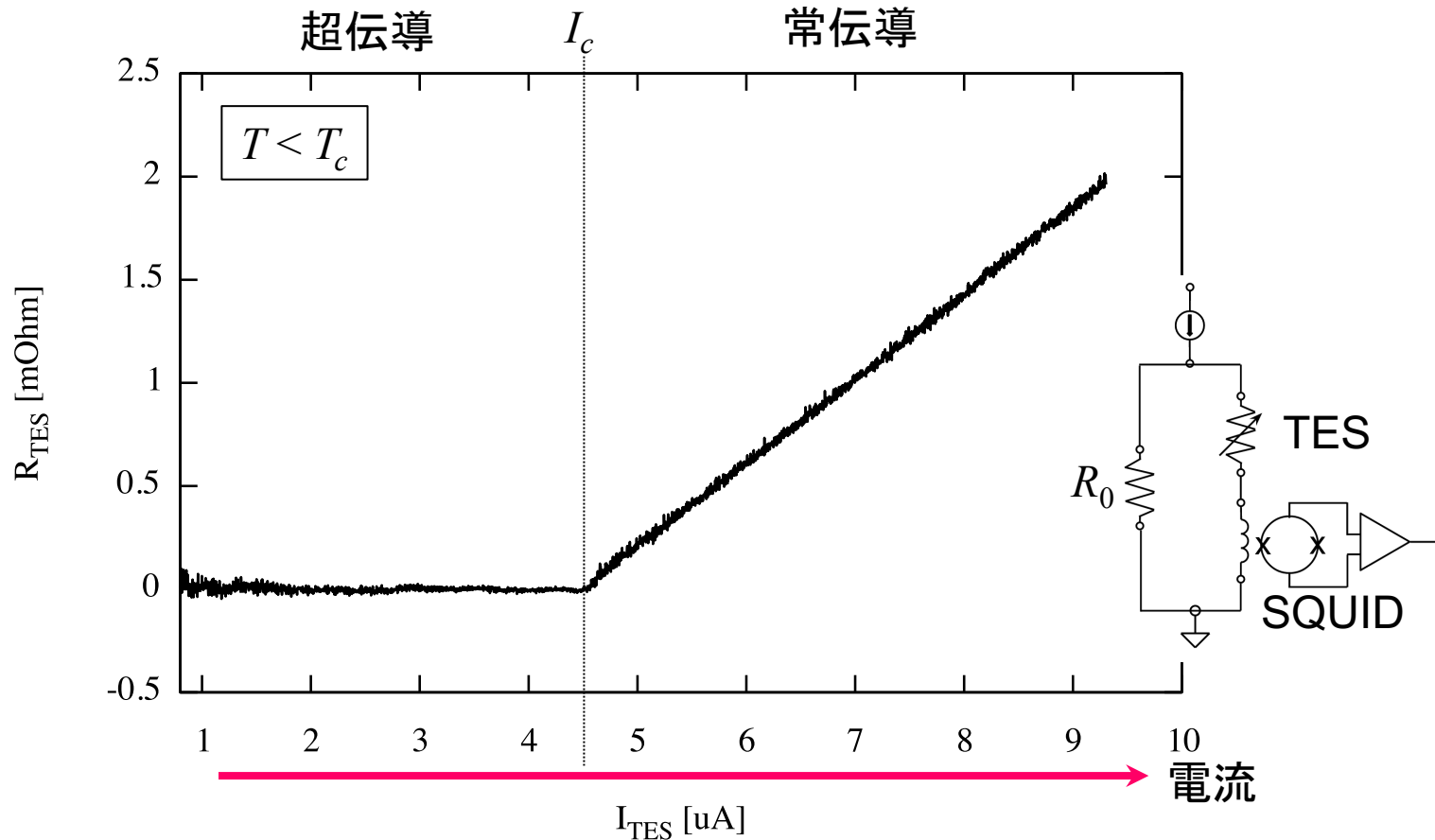
↓  
 温度感度  $\alpha = \left. \frac{T}{R} \frac{\partial R}{\partial T} \right|_I$   
 ↓  
 臨界電流  $I_c$   $\alpha = - \frac{R_n^2 I_c(T)^2}{R^2 I^2} \frac{\partial \ln I_c}{\partial \ln T}$

エネルギー分解能向上には

- 熱容量  $C$  を小さくする: 済
- $T_c$  を下げる → 計数率低下
- 温度感度  $\alpha$  のコントロール  
 → 超伝導転移の物理を解明



# 超伝導転移の物理：臨界電流

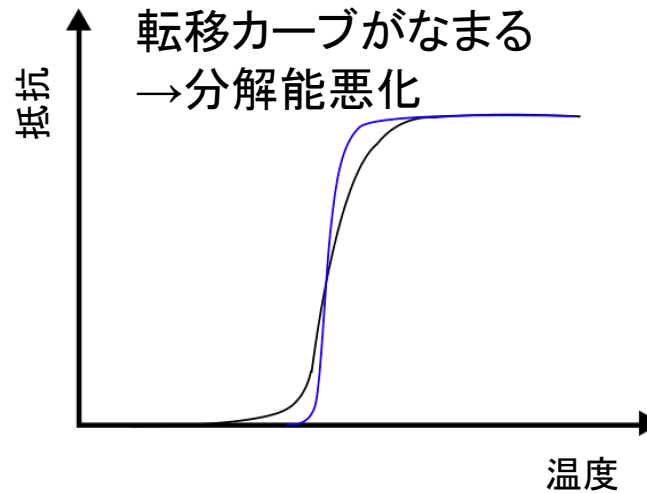
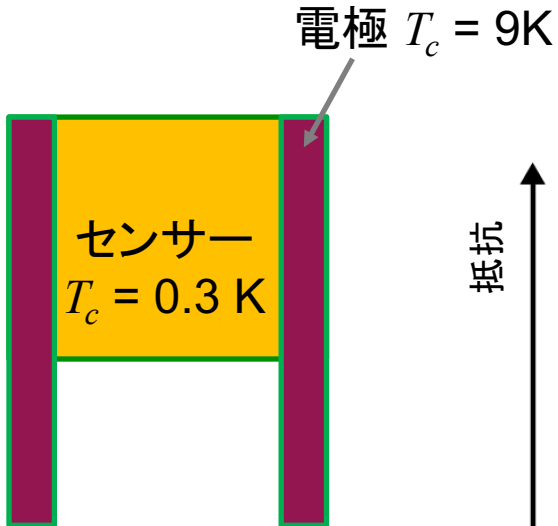


臨界電流の温度依存性・磁場依存性を測定することで、  
TESの物理モデルを決定できる

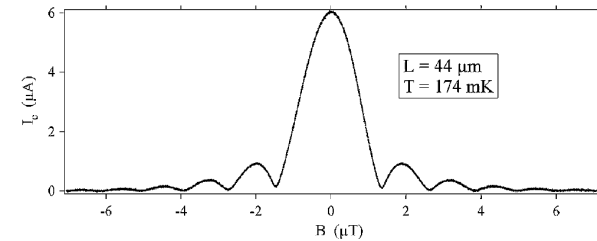
# 超伝導転移の物理

近接効果:

超伝導転移温度( $T_c$ )が高い物質が  
低い物質に影響を及ぼす



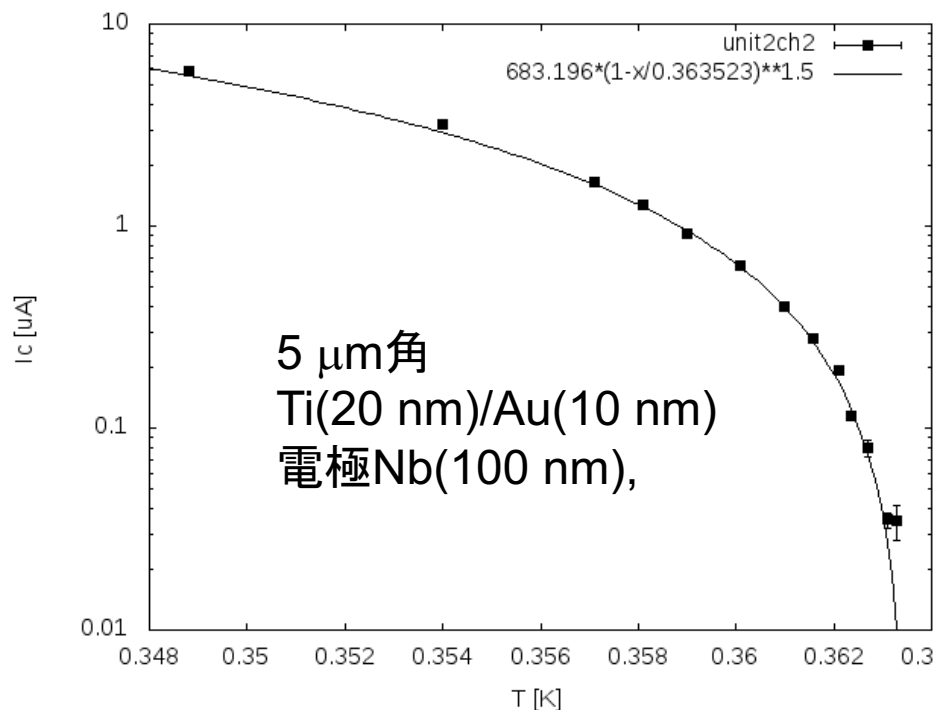
顕著な磁場依存性



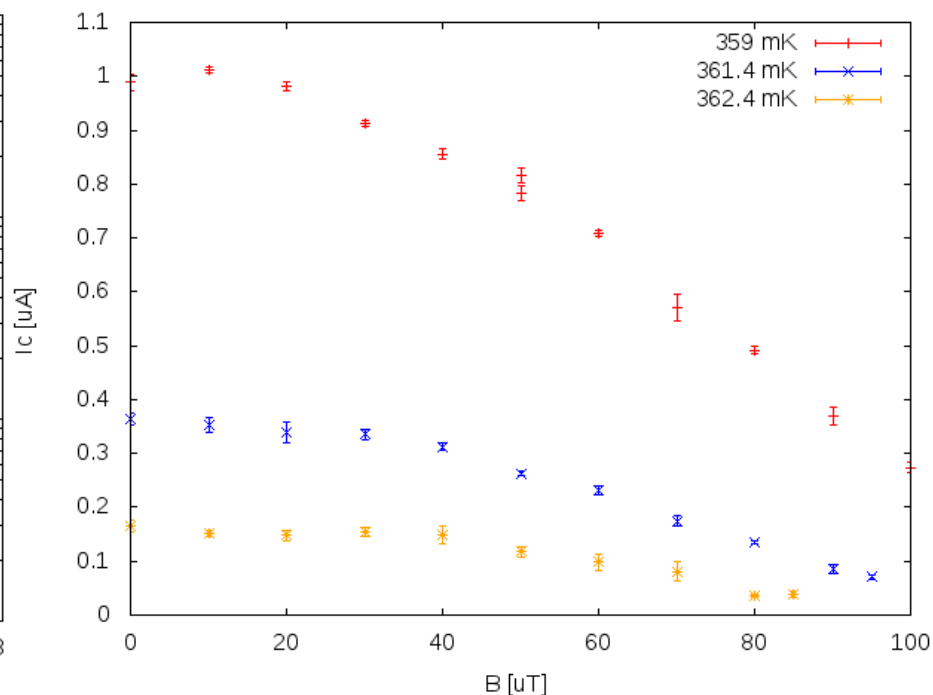
近接効果によって電極がセンサーに与える影響は  
小さいセンサーほど顕著  
我々のセンサーでは起こっているか？

# 測定結果

## 臨界電流の温度依存性



## 磁場依存性



シンプルな超伝導体と同様の特性が得られた  
我々のセンサーでは電極の影響が小さい理由を検討中  
他グループでは同程度のサイズで近接効果を確認

電極・磁場がTESに与える影響は非常に小さい  
→柔軟なアレイデザイン(電極構造・配線)が可能

# まとめ

## 可視光用TES

- 可視光でsingle photonのエネルギー測定可能
  - エネルギー分解能 0.1 eV at 0.8 eV
  - 高い検出効率 98 % at 980 nm見たい波長に合わせてARを最適化
- TES+走査型顕微鏡
  - 微弱光照射下でのカラーイメージングを実証
  - 今後は「色」をより定量的に示せるように
- エネルギー分解能向上のために
  - 超伝導光センサーの特性を研究中
- アレイ化
  - 二次元読み出しを実現したい