

暗黒物質

重力相互作用をするが、電磁相互作用をしない非相対論的物質。

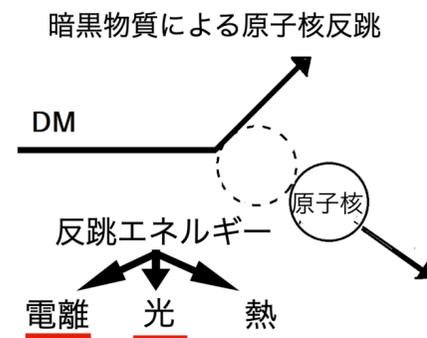
暗黒物質の存在は様々な観測から示唆されているが発見には至っていない。

有力候補:

WIMP (Weakly interacting massive particle)
相互作用が極めて弱く重たい粒子

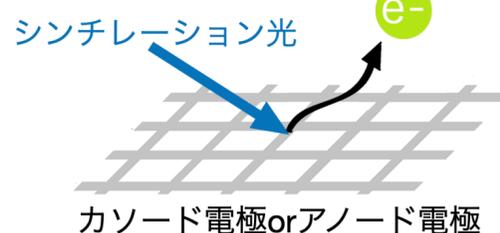
- 標準理論の弱い相互作用と同程度の相互作用を持つ
- 数 $\text{GeV}/c^2 \sim$ 数 TeV/c^2 の質量を持つと予測されている

直接探索 : 検出器標的原子核の反跳事象の探索



DARWIN実験に向けて解決したい課題

電極での光電効果



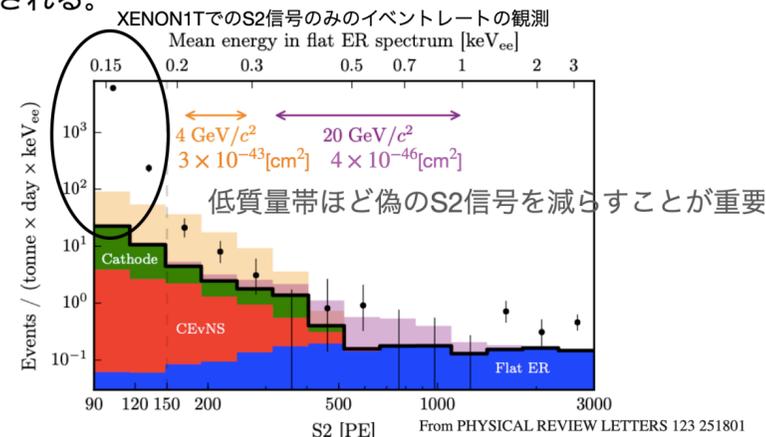
- キセノンから放出されるシンチレーション光(波長175nm)とアノード・カソード電極との光電効果
- 放出電子が偽のS2信号を放出してしまう。

光電効果による放出電子を抑えることができれば一部の未だに原因のわからない偽のS2信号を減らすことができるかもしれない。

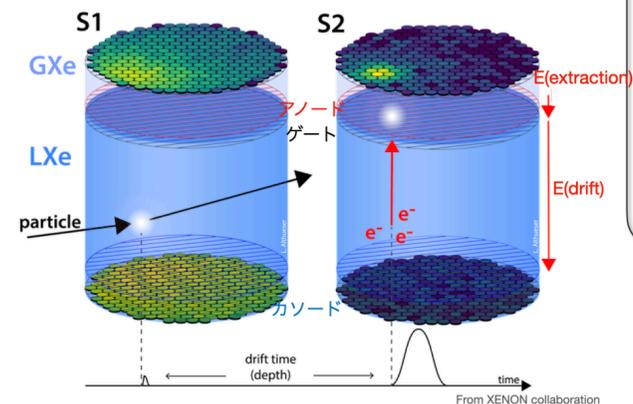
電極同士の接触・断線

- 現在の電極部材: ステンレスワイヤー

自重によるたわみ(DARWIN実験 検出器直径: 2.6m)や電極同士の引き付けにより電極の接触からのショートが懸念される。



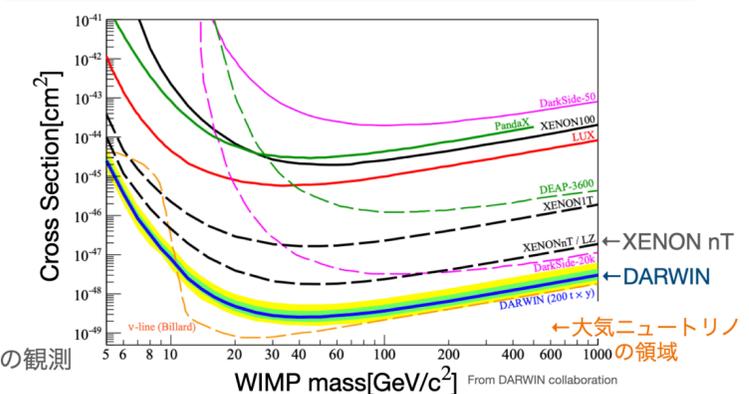
暗黒物質の直接探索



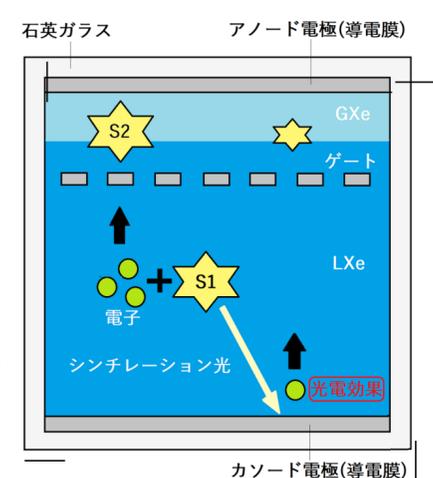
- XENON nT実験
 - 2020-2025年 直径1.5m×高さ1.4m, Total Xenon:8.6t
 - 世界最高感度の暗黒物質探索を実現
- DARWIN実験
 - 2027年- 直径2.6m×高さ2.6m, Total Xenon:50t
 - 大気ニュートリノが主要なバックグラウンドとなる領域での観測

気体-液体2相型キセノン検出器

- S1:シンチレーション光
- S2:比例蛍光
- 電離電子が検出器中に印加された電場によってドリフトし、上部のガスXe中の電子を励起させて発生
- S1とS2の信号比から原子核反跳イベントと電子反跳イベントの区別が可能



本研究の目的



DARWIN実験に向けた液体キセノン検出器のための低量子効率電極の開発

低量子効率 → 光電効果による偽のS2信号を減少させる

本研究では石英ガラス上に成膜した電極を想定
石英ガラスに成膜 → 電極のたわみや引き付け、断線を防ぐ

検出器を石英ガラスで密閉することで
検出器外部からの不純物($^{222}\text{Rn}, \text{O}_2, \dots$)の混入を減らす

より低質量の暗黒物質にまで検出範囲を広げた液体キセノン検出器

本研究の最終目標

キセノンから放出されるシンチレーション光(175nm)に対して、液体キセノン中で量子効率の低い電極部材を見つける。

量子効率の測定実験

本研究の取り組み

- 量子効率測定用の装置の作成
- 真空中、室温での217.1nm帯の光に対する量子効率の測定
測定試料:石英ガラスに成膜した金(Au)、及び白金(Pt)
- 液体Xe中での175nm帯の光に対する量子効率の測定

	仕事関数[eV]	光子の波長[nm]
金(Au)	4.5	<276
白金(Pt)	5.7	<218

<https://astamuse.com/ja/patent/pdf/published/JPN/2003017331>

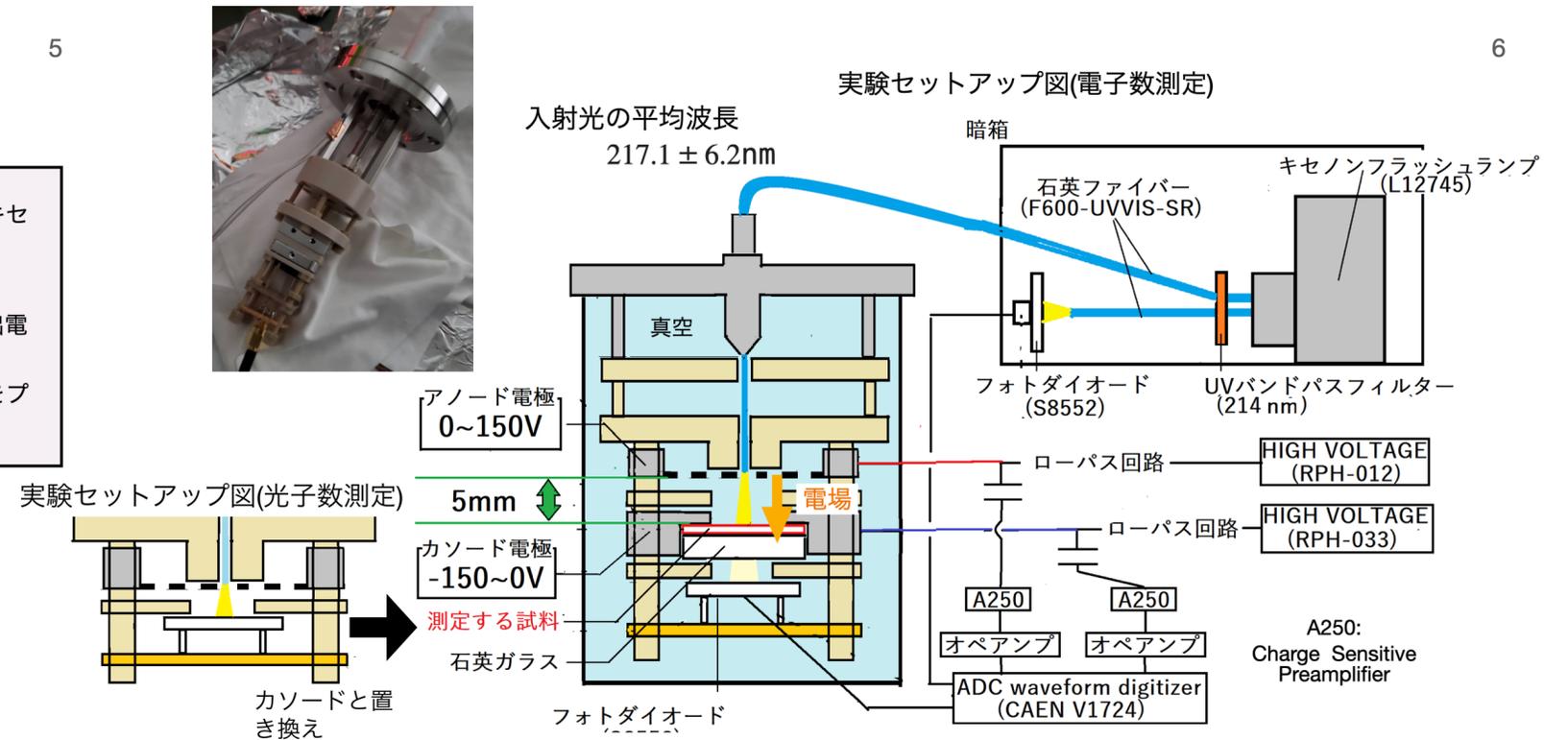
電子数の測定

- バンドパスフィルターを用いて波長に制限をかけたキセノンフラッシュランプの光を測定試料に入射させる。
- 光電効果により金属表面に電子が叩き出される。
- アノード・カソード間に形成した電場を用いて放出電子をドリフトする。
- アノード・カソードに誘起された誘導電流の信号をプリアンプを通して読み出す。

光子数の測定

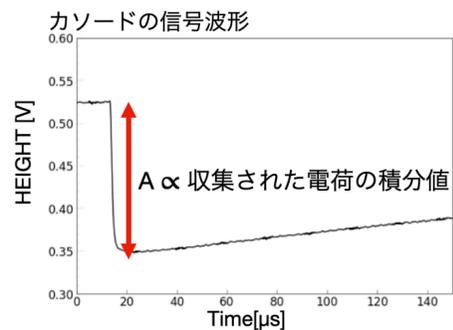
- 測定試料表面のあった位置に検出面があるようフォトダイオードを設置。
- 電子数の測定と同様に光を入射させ試料に入射していた光量を読み出す。

5



6

電子数の測定



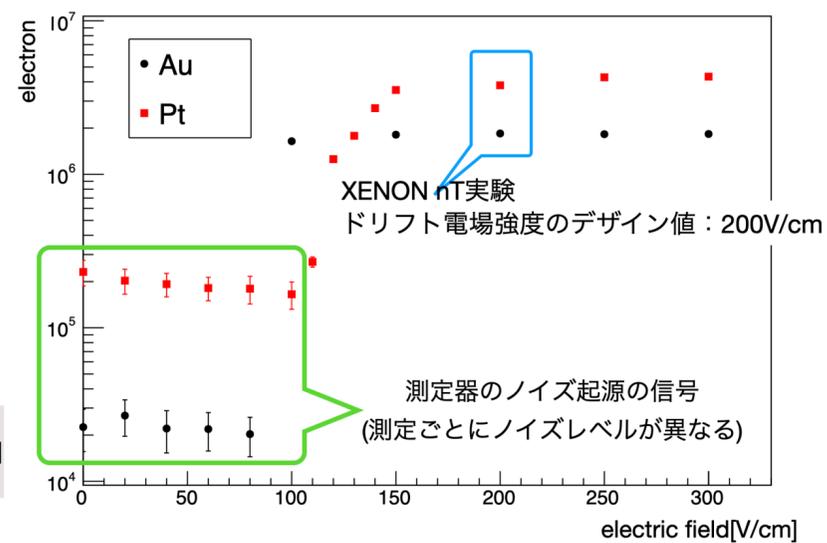
$$\frac{A [V] / G}{e} = \text{電子数}$$

G: アンプのゲイン = (662 ± 6) [mV/pC]
e: 電気素量 [C]

系統誤差

- アンプの増倍率の不定性
←テストパルスによるアンプのゲイン値の測定
- セットアップの組み直しによる誤差
←測定装置を置き直しての測定を3回行う

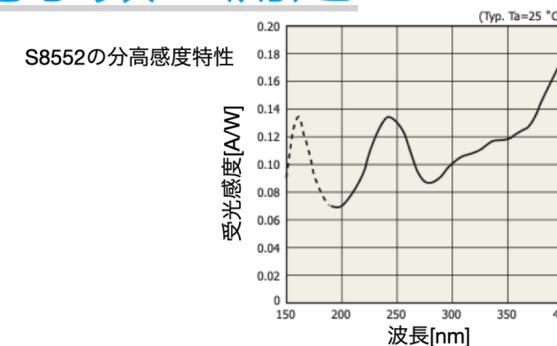
放出電子数とドリフト電場強度



	統計誤差	系統誤差		電子数
		アンプ	置き直し	
金(Au)	0.5%	0.8%	3.2%	$(1.81 \pm 0.06) \times 10^6$
白金(Pt)	0.6%	0.8%	1.3%	$(4.28 \pm 0.08) \times 10^6$

7

光子数の測定



$$\int \left(\frac{\text{波高}[V] / 50\Omega}{P} \right) dt = \text{入射光量}[J]$$

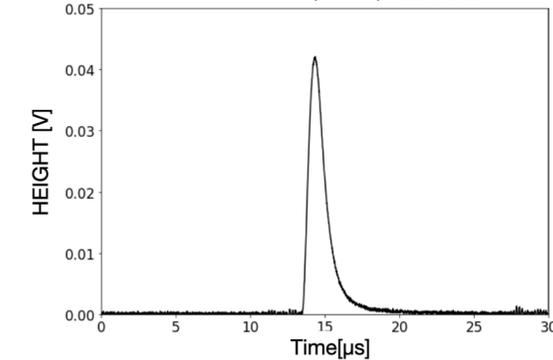
入射光量 [J] / E = 入射光子数

電子数の測定と同様に置き直しによる系統誤差を含めて測定

	統計誤差	系統誤差			光子数
		受光感度	光子エネルギー	置き直し	
金(Au)測定直後	0.9%	9.5%	2.9%	3.8%	$(1.33 \pm 0.14) \times 10^{10}$
白金(Pt)測定直後	1.0%			3.1%	$(1.55 \pm 0.16) \times 10^{10}$

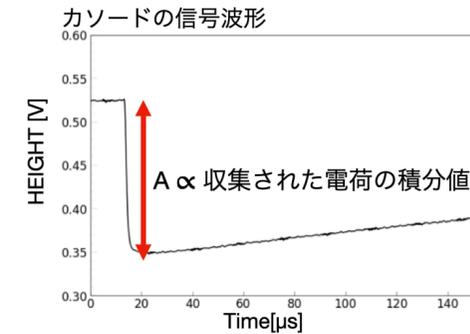
8

フォトダイオード(S8552)の信号波形



FADCの入カインピータンス = 50Ω
P: フォトダイオード(S8552)感度 = $(9.45 \pm 0.90) \times 10^{-2}$ [A/W]
E: 光子1個[217.1 ± 6.7nm]あたりの持つエネルギー = $(9.15 \pm 0.26) \times 10^{-20}$ [J]

電子数の測定

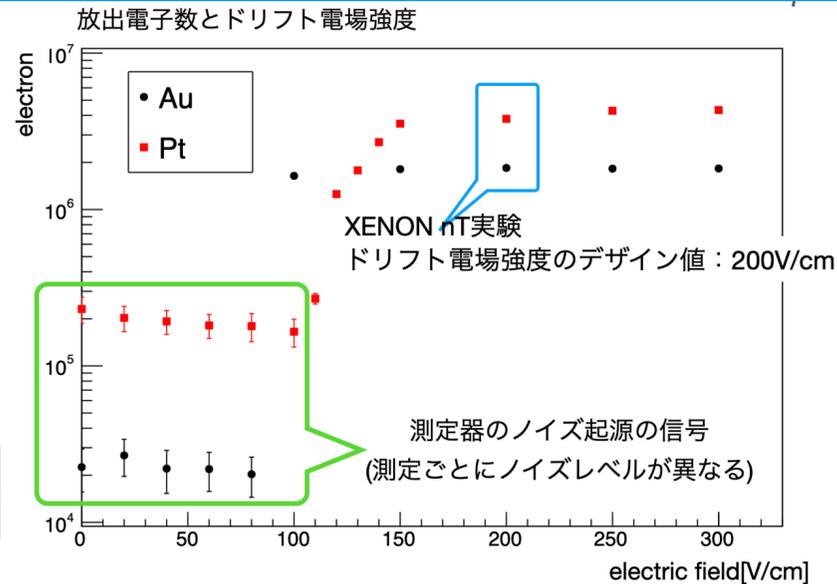


$$\frac{A [V] / G}{e} = \text{電子数}$$

G: アンプのゲイン = $(662 \pm 6) [mV/pC]$
e: 電気素量 [C]

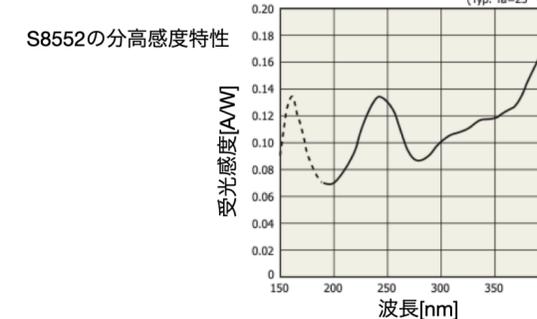
系統誤差

- アンプの増倍率の不定性
←テストパルスによるアンプのゲイン値の測定
- セットアップの組み直しによる誤差
←測定装置を置き直しての測定を3回行う



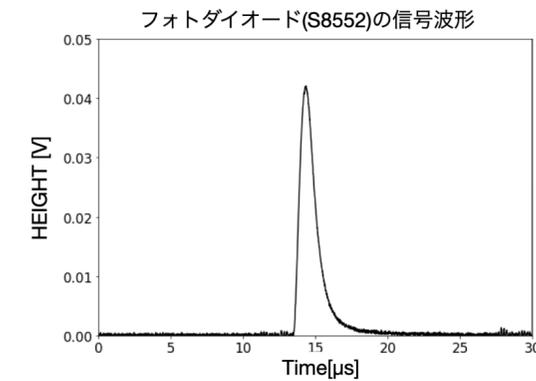
	統計誤差	系統誤差		電子数
		アンプ	置き直し	
金(Au)	0.5 %	0.8 %	3.2 %	$(1.81 \pm 0.06) \times 10^6$
白金(Pt)	0.6 %	0.8 %	1.3 %	$(4.28 \pm 0.08) \times 10^6$

光子数の測定



$$\int \left(\frac{\text{波高}[V]/50\Omega}{P} \right) dt = \text{入射光量}[J]$$

入射光量 [J] / E = 入射光子数



FADCの入カインピータンス = 50Ω
P: フォトダイオード(S8552)感度 = $(9.45 \pm 0.90) \times 10^{-2} [A/W]$
E: 光子1個[217.1 ± 6.7nm]あたりの持つエネルギー = $(9.15 \pm 0.26) \times 10^{-20} [J]$

電子数の測定と同様に置き直しによる系統誤差を含めて測定

	統計誤差	系統誤差			光子数
		受光感度	光子エネルギー	置き直し	
金(Au)測定直後	0.9 %	9.5 %	2.9 %	3.8 %	$(1.33 \pm 0.14) \times 10^{10}$
白金(Pt)測定直後	1.0 %			3.1 %	$(1.55 \pm 0.16) \times 10^{10}$

結果[量子効率]

▶217.1nmの波長帯に対する真空中での量子効率

$$\text{量子効率} = \frac{\text{電子数}}{\text{光子数}}$$

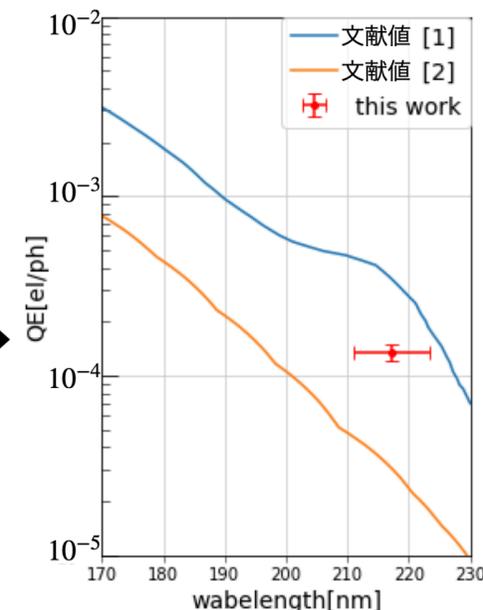
$$\text{金(Au)} (1.35 \pm 0.15) \times 10^{-4} < \text{白金(Pt)} (2.79 \pm 0.29) \times 10^{-4}$$

金(Au)の量子効率は文献値と同程度のオーダー

仕事関数からの予測と結果は違ったが、217.1nmの光に対する真空中での測定から、金(Au)の方がより低量子効率で電極素材に向いていると考えられる。

キセノンのシンチレーション光[175nm]の波長帯、かつ液体キセノン中での測定を行う。

金(Au)の量子効率 測定値(this work)と文献値の比較



[1]From AIP Conference Proceedings 165:
[2]From PHYSICAL REVIEW B 1, 478

まとめと今後の展望

- ▶暗黒物質の直接探索に用いられる液体キセノン検出器では、電極が光電効果により生み出す偽のS2信号と電極同士の接触・断線が問題となる。
- ▶将来の暗黒物質探索に向けて、ノイズとなる放出電子が小さく、たわむことのない新たな低量子効率の電極の開発を目指す。

本研究

検出器を作成し、217nmの光に対する真空中での金(Au)、及び白金(Pt)の量子効率の測定
金(Au) $(1.35 \pm 0.11) \times 10^{-4} < \text{白金(Pt)} (2.79 \pm 0.20) \times 10^{-4}$
金の量子効率は文献値と同程度のオーダーで観測できた。

真空中、217nmの波長の条件下では白金に比べ金がより電極素材に適する。

キセノンのシンチレーション光の波長帯[175nm]を入射可能にした、液体キセノン中での量子効率測定を行う。

BACK UP

今後の測定について

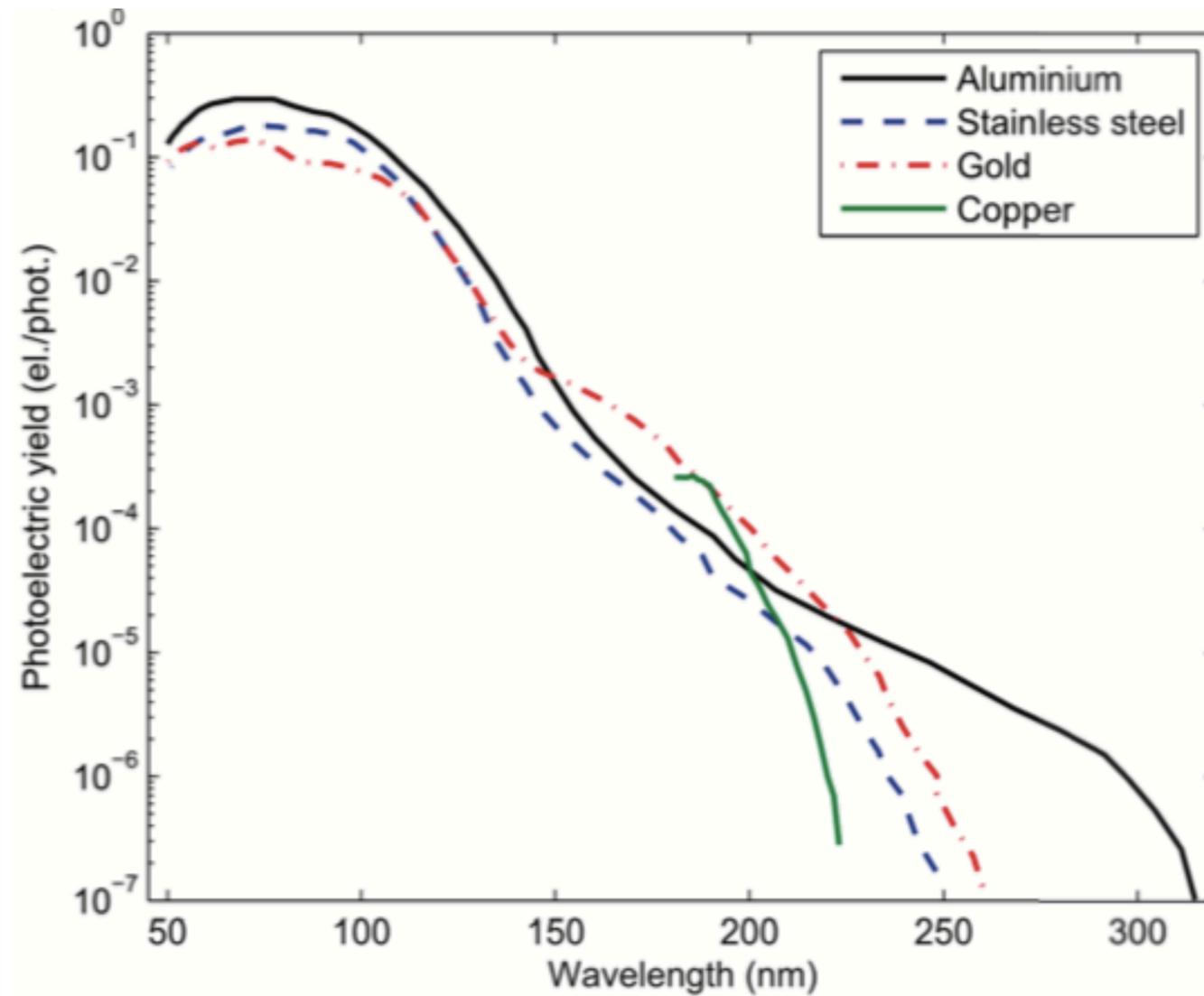
	仕事関数[eV]	光子の波長[nm]
金(Au)	4.5	<276
白金(Pt)	5.7	<218
ステンレス(SUS)	4.7	<268

現状は仕事関数から予測する以外の判断ができない
導電性を持ち高い仕事関数部材を試していく

物質の仕事関数

材料	仕事関数(eV)	材料	仕事関数(eV)
Al	4.2	Cd	4.2
Ni	4.5	Ta	4.3
Cu	4.9	Pd	5.1
Au	4.5	W	4.6
SUS	4.7	Re	5.0
Si	4.9	Pb	4.3
Ti	4.3	Bi	4.2
Be	5.0	C	5.0
Cr	4.5	Be	5.0
Mn	4.1	Pt	5.7
Fe	4.5	Ir	5.3
Co	5.0	PE	5.2
Zn	4.3	Nylon	4.1
Ga	4.2	PMMA	4.3
Ge	5.0	PTFE	6.7
Mo	4.6	PP	5.4
Ru	4.7	Glass	4.9
Ag	4.3	PFC	6.7

量子効率(文献値)

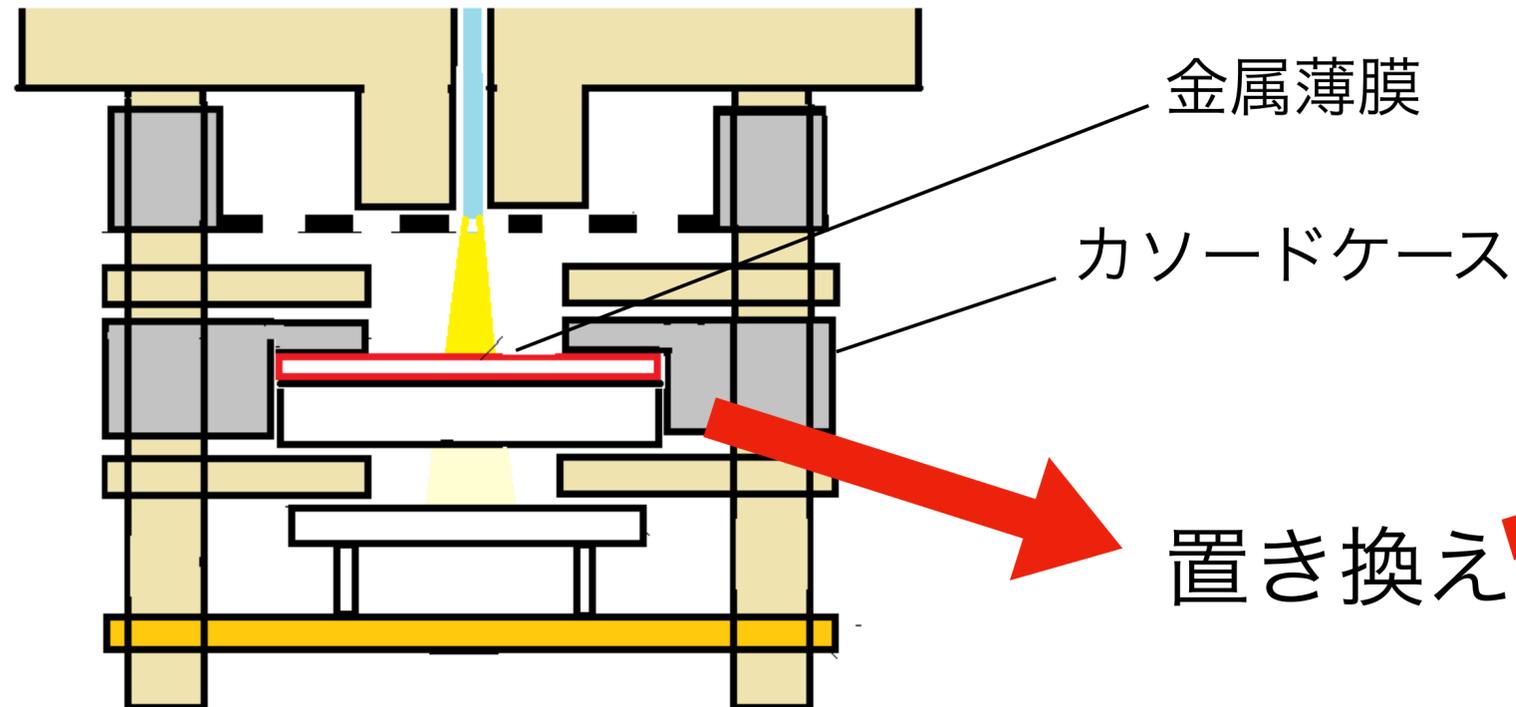


[1]J. Laulainen, T. Kalvas, H. Koivisto, J. Komppula, and O. Tarvainen 2015 "Photoelectron emission from metal surfaces induced by VUV-emission of filament driven hydrogen arc discharge plasma,"

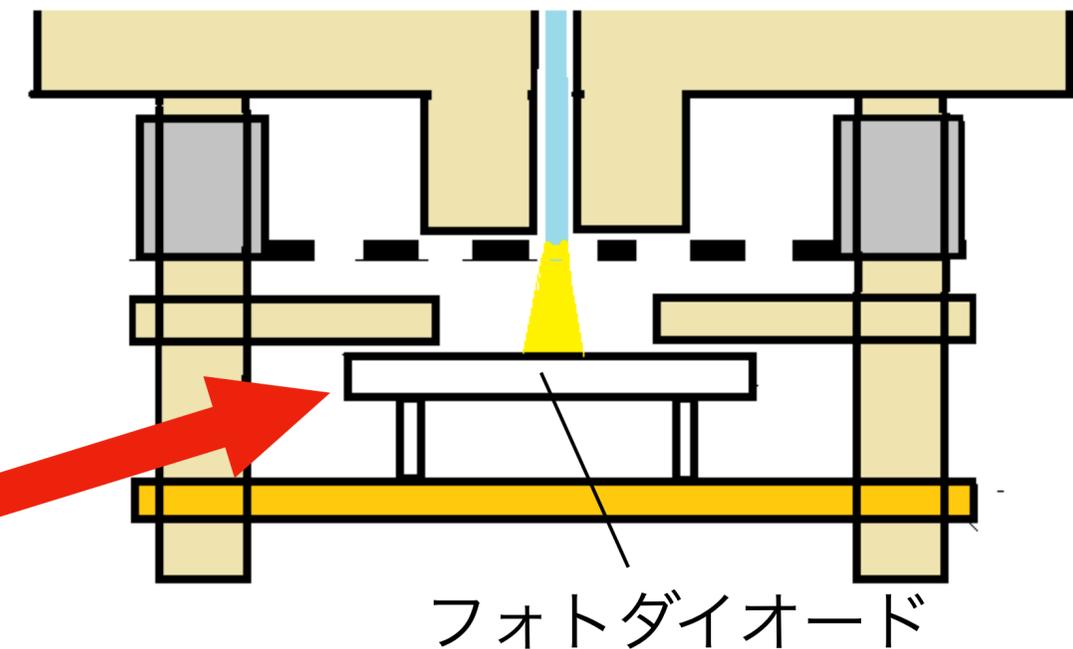
波長によって量子効率の大小が入れ替わるところがある

測定方法

電子数測定の設定アップ



光子数測定の設定アップ



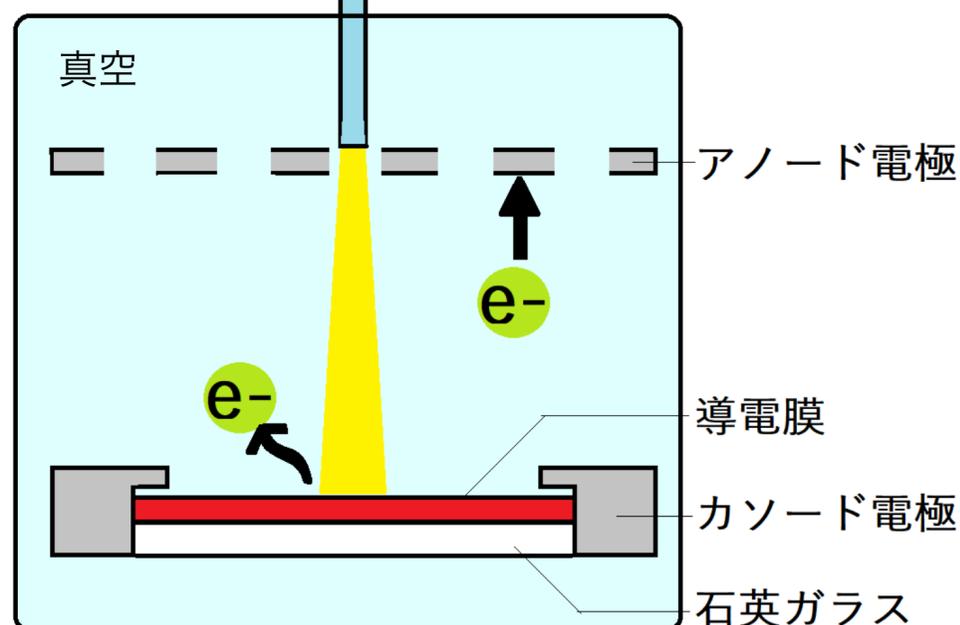
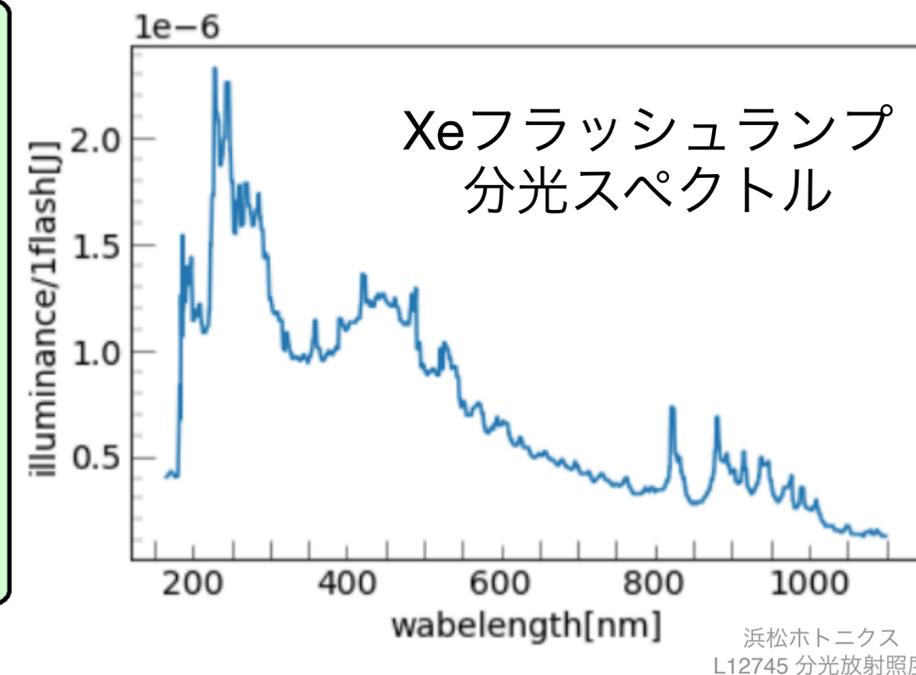
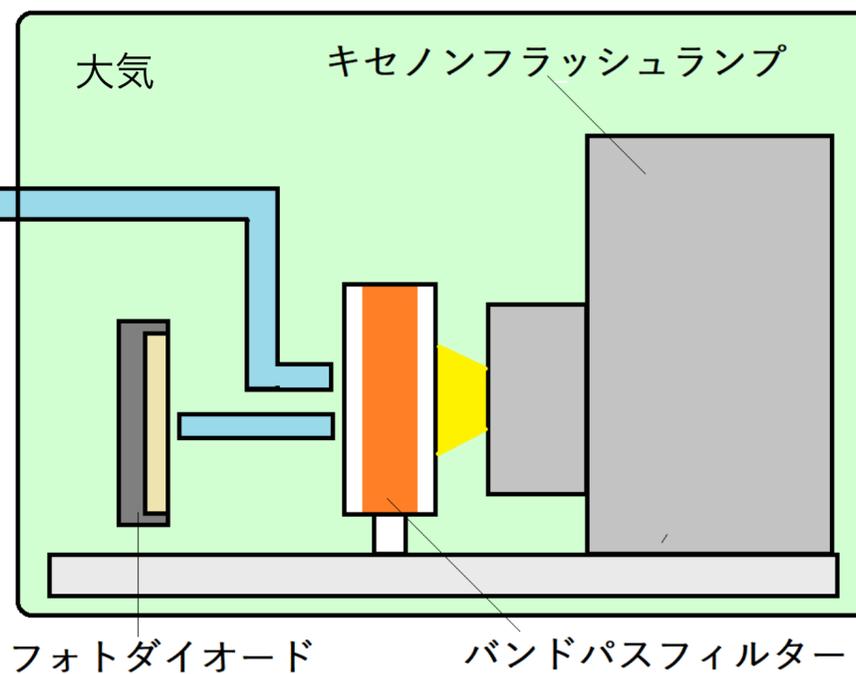
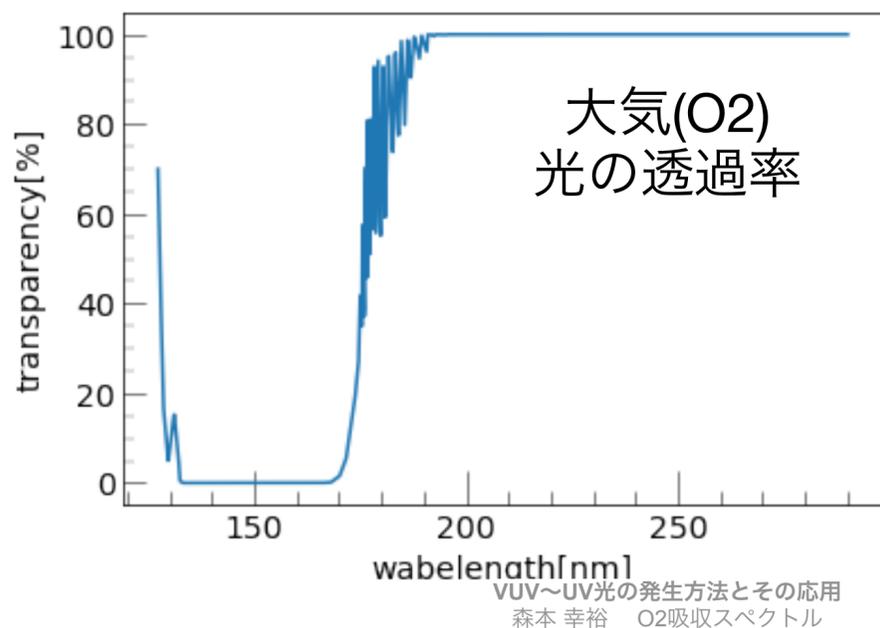
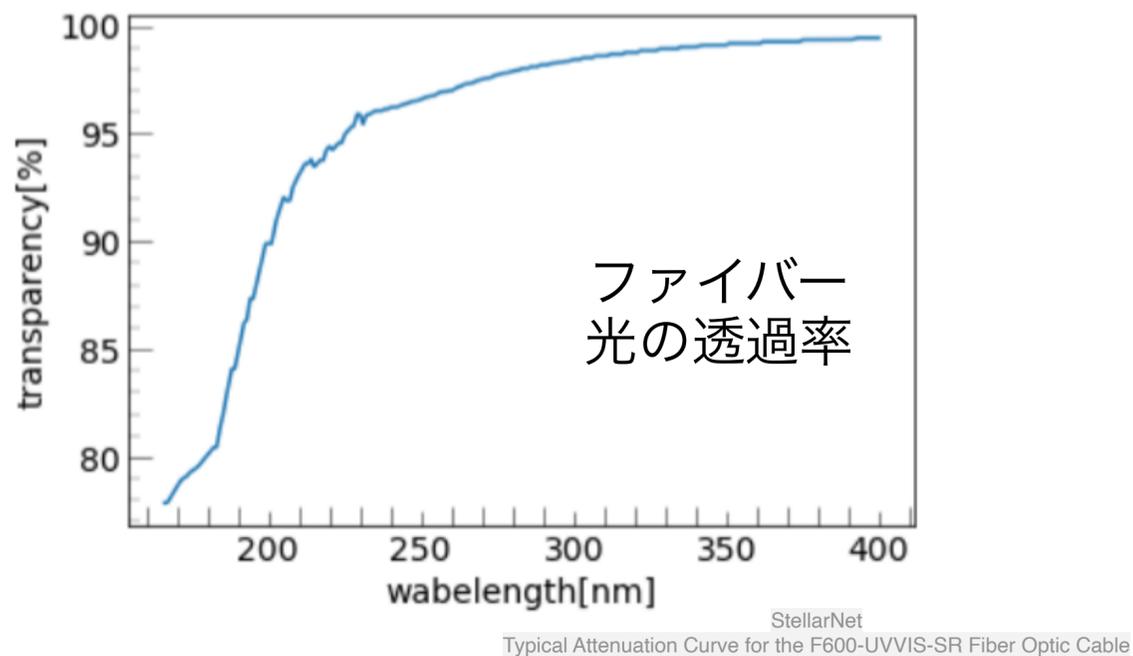
入射光量の計測

放出電子数測定の際の金属薄膜表面にフォトダイオードの検出面が来るよう、カソードとフォトダイオードを置き換えて行う。

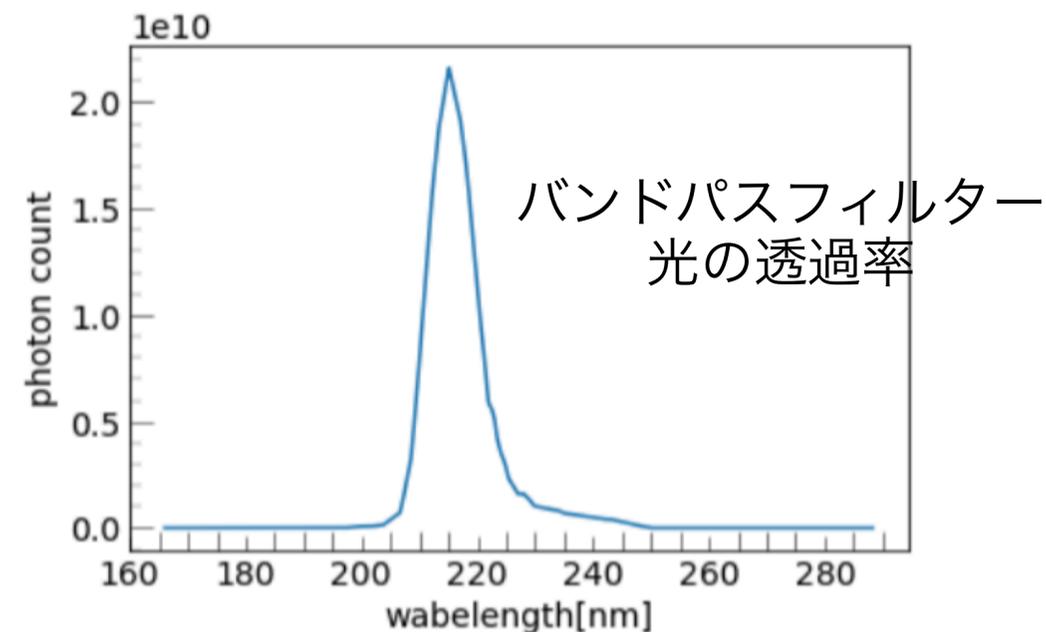
- 1: キセノンフラッシュランプの光に対して、バンドパスフィルターを用いて透過する波長帯に制限をかける。
- 2: ファイバーを通して金属薄膜位置のフォトダイオードに入射するキセノンフラッシュランプの光量を計測した。

入射光の波長分布

ランプの出力、各器材の光の透過率から金属薄膜面に入射する光子数とその波長分布を予測した。



電子数の測定セットアップ



使用したキセノンフラッシュランプについて

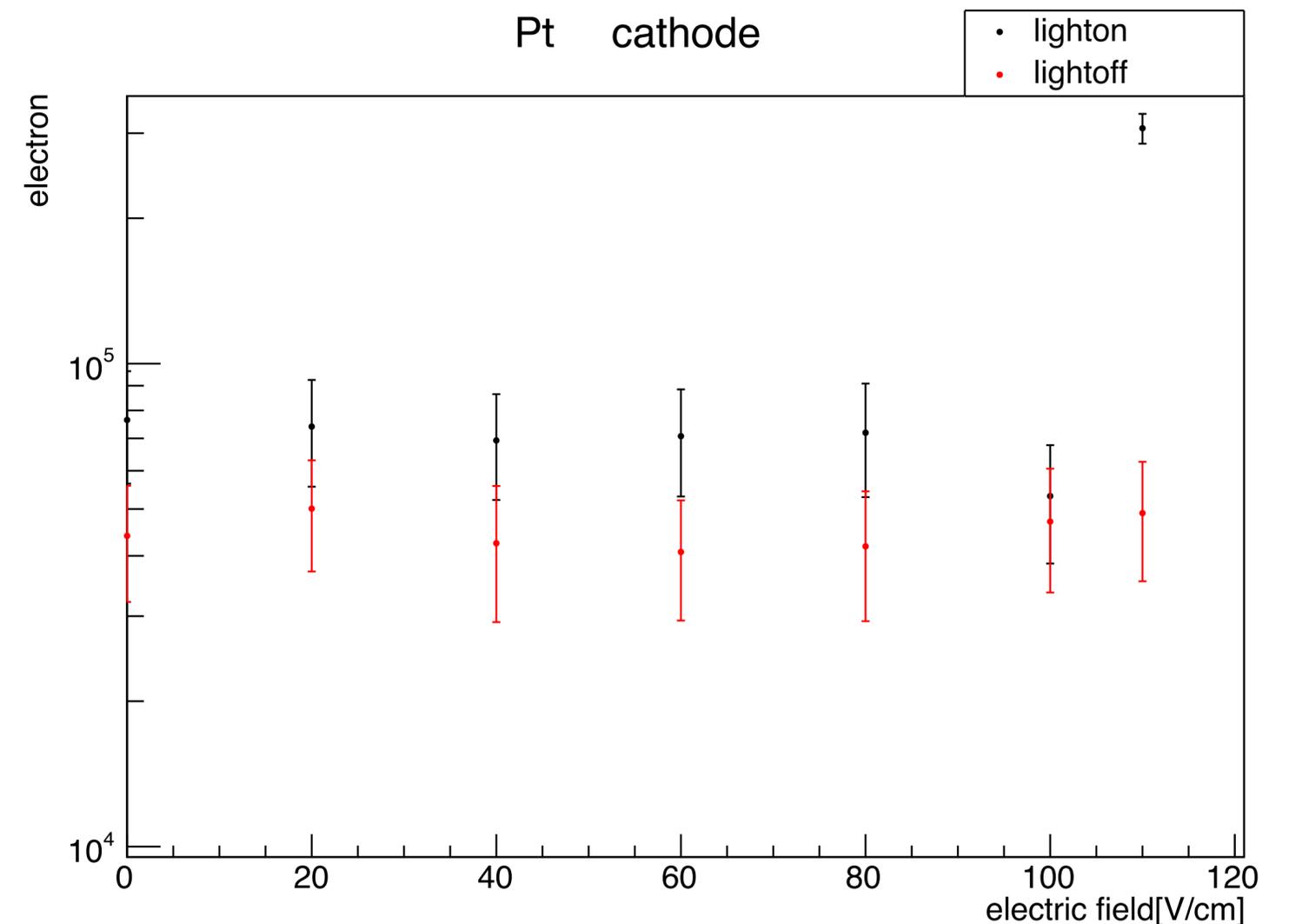
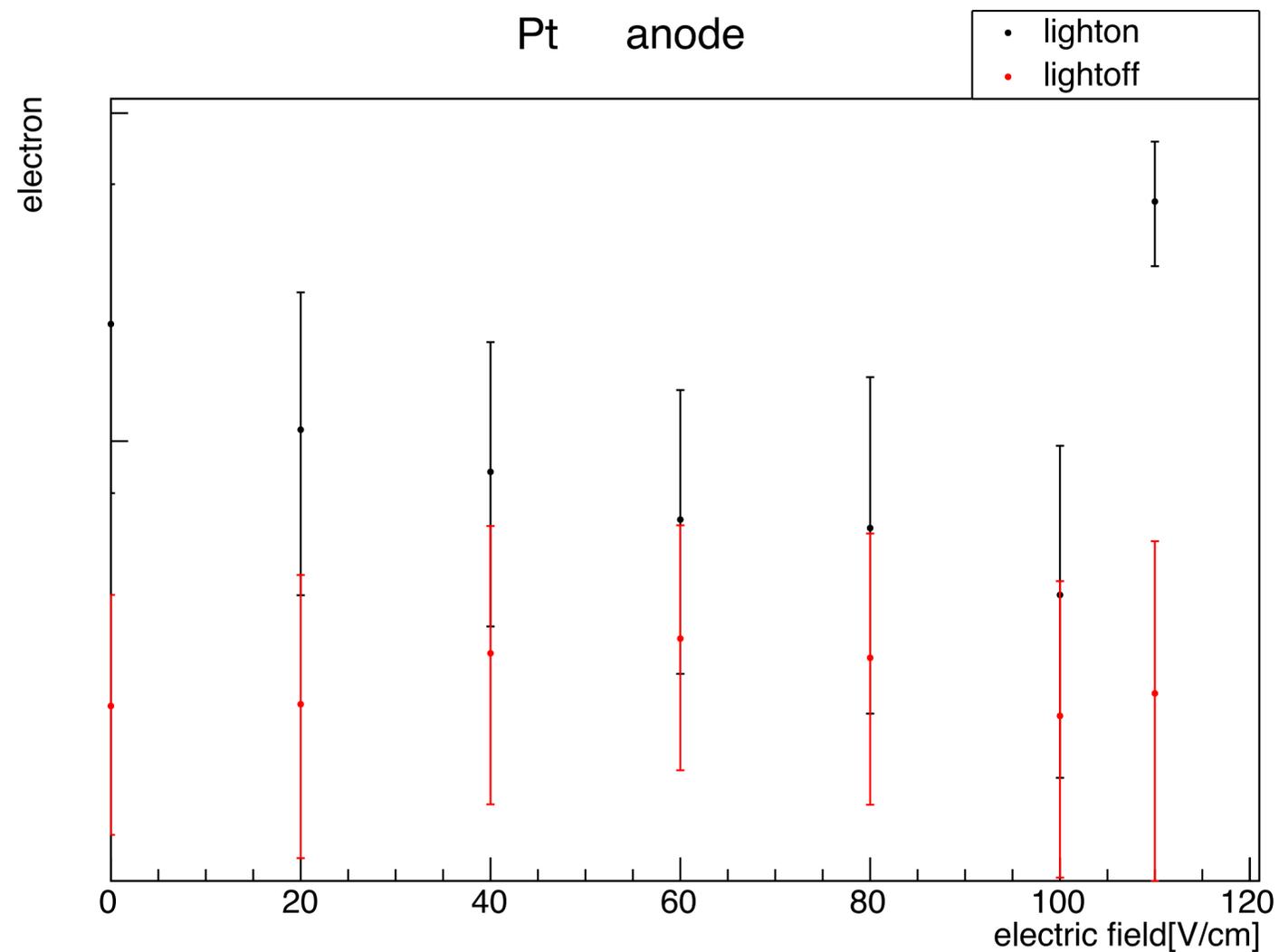


L12745 20mW(キセノンフラッシュランプ)

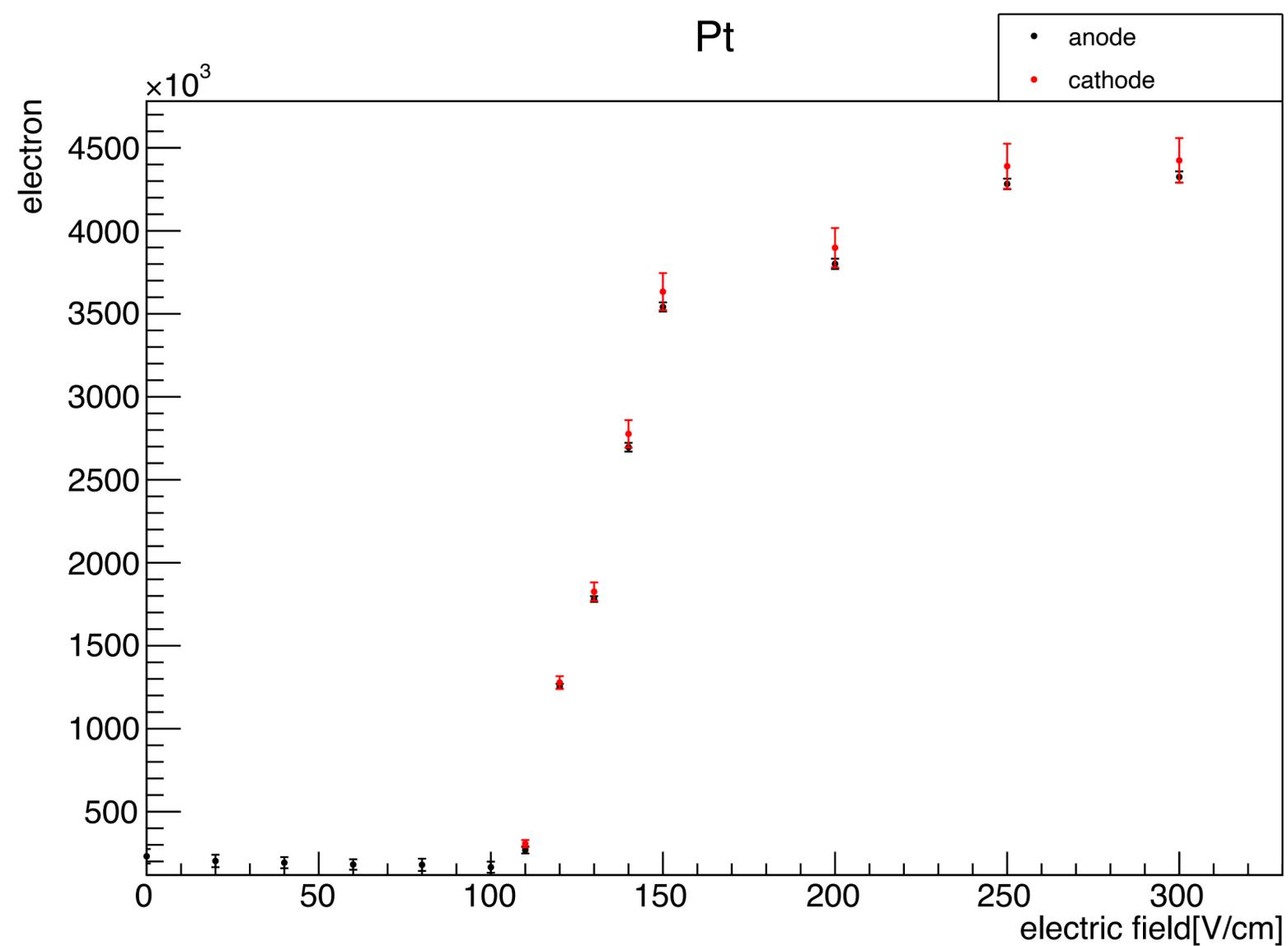
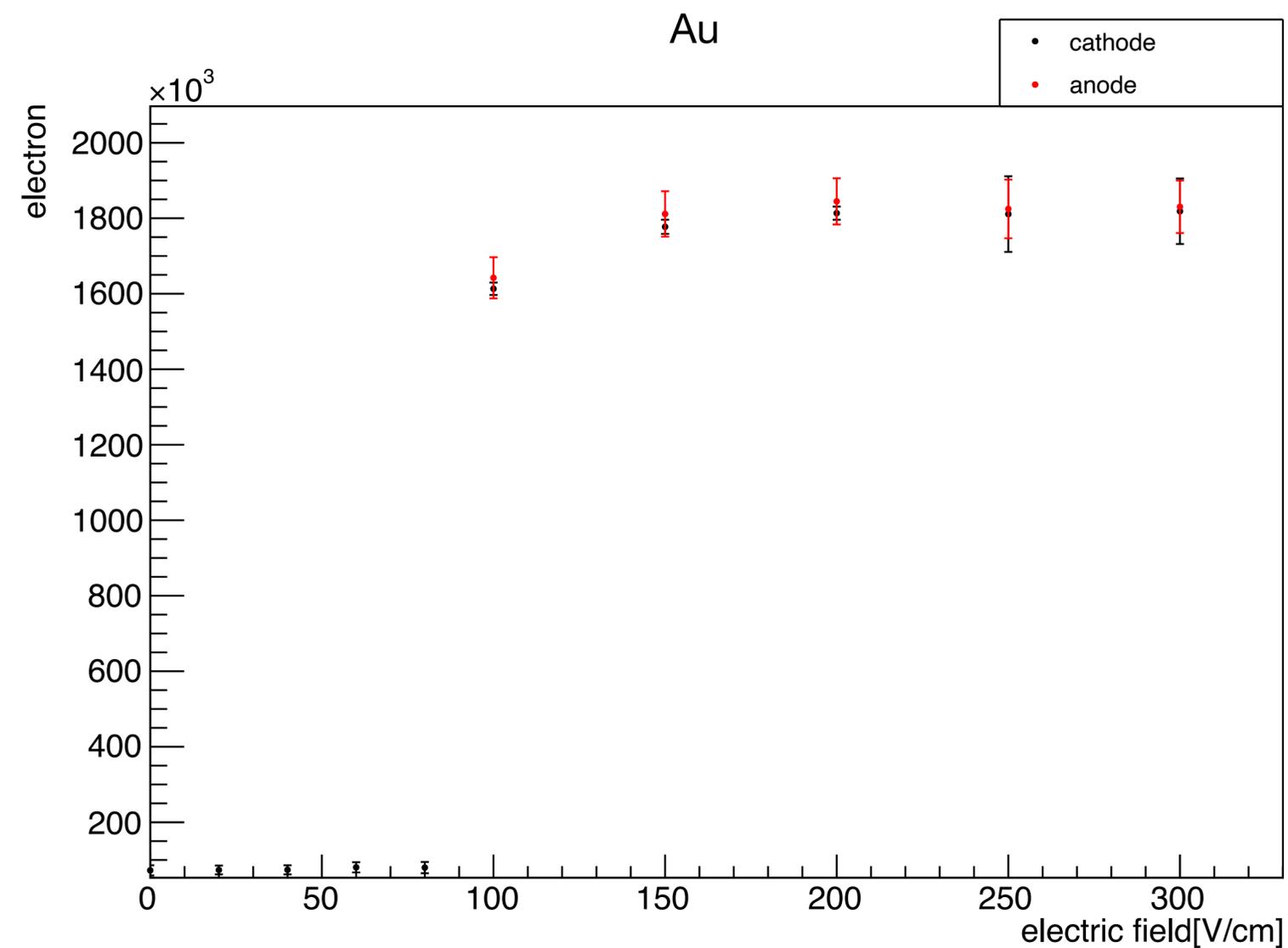
窓材がMgF₂→スペックシートより160~7500nmの波長帯の光を透過可能

低電場における電子数

50V/cm以下の電場についてはキセノンフラッシュランプを入射させなかったときの観測結果[lightoff]とそれぞれ1 σ の誤差の範囲で一致した。



アノードとカソードの検出信号の違い



薄膜への光の侵入

$$\text{表皮深さ } l \sim \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\sigma\mu}} \quad (\epsilon\omega \ll \sigma)$$

電磁波の角周波数： ω ，周波数： f ，

導体の導電率： σ ，透磁率： μ ，誘電率： ϵ

金(Au)に対する217.1nmの波長の光子数は $l \sim 2.1\text{nm}$ 進むごとに $1/e$ の割合に減少する。

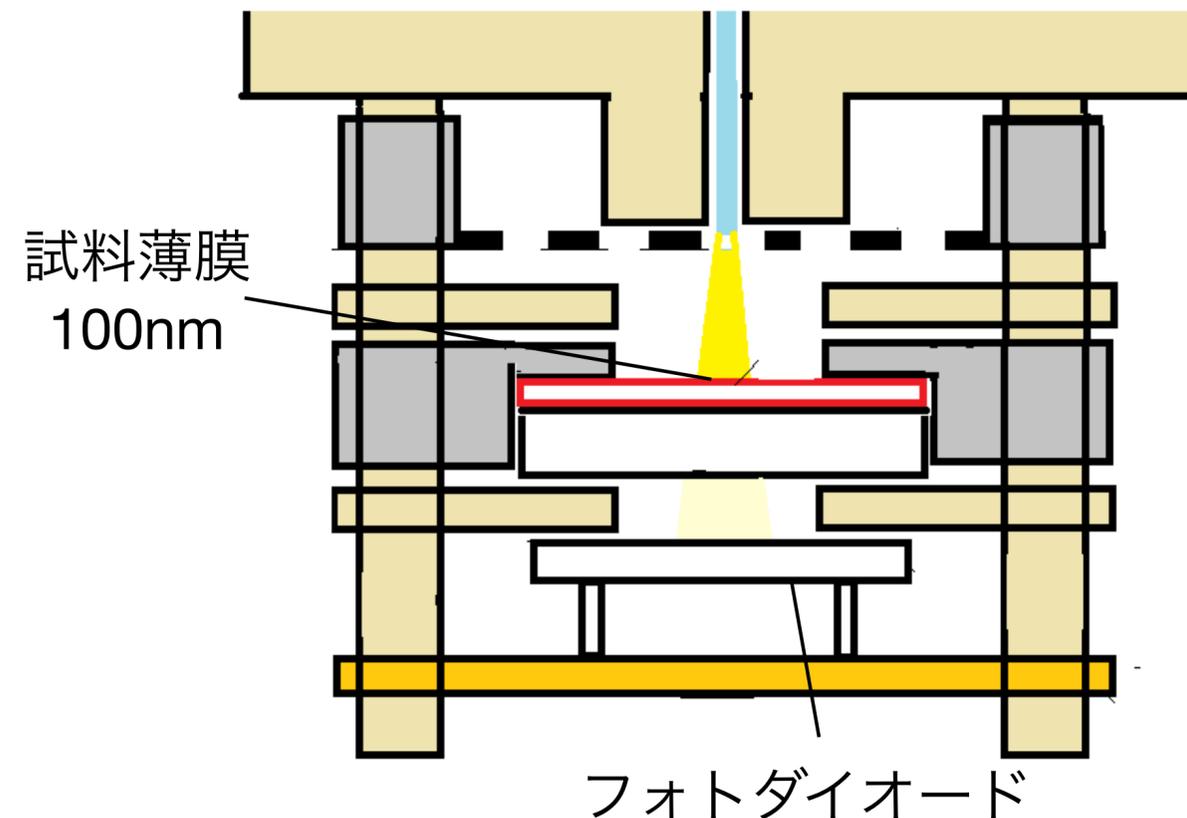


侵入長49nmでその光子は1個以下になってしまう。

同様に白金(Pt)に対しては、 $l \sim 4.4\text{nm}$ より

100nmを通過すると電磁界の割合は $1/e^{22.6} \sim \frac{1}{7 \times 10^9}$

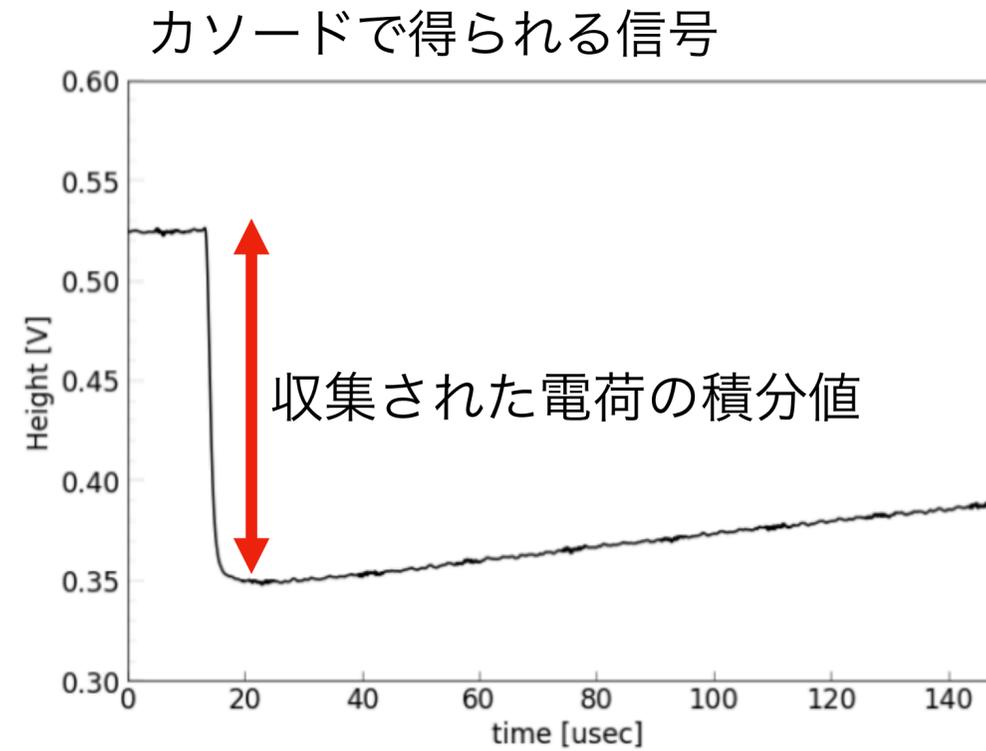
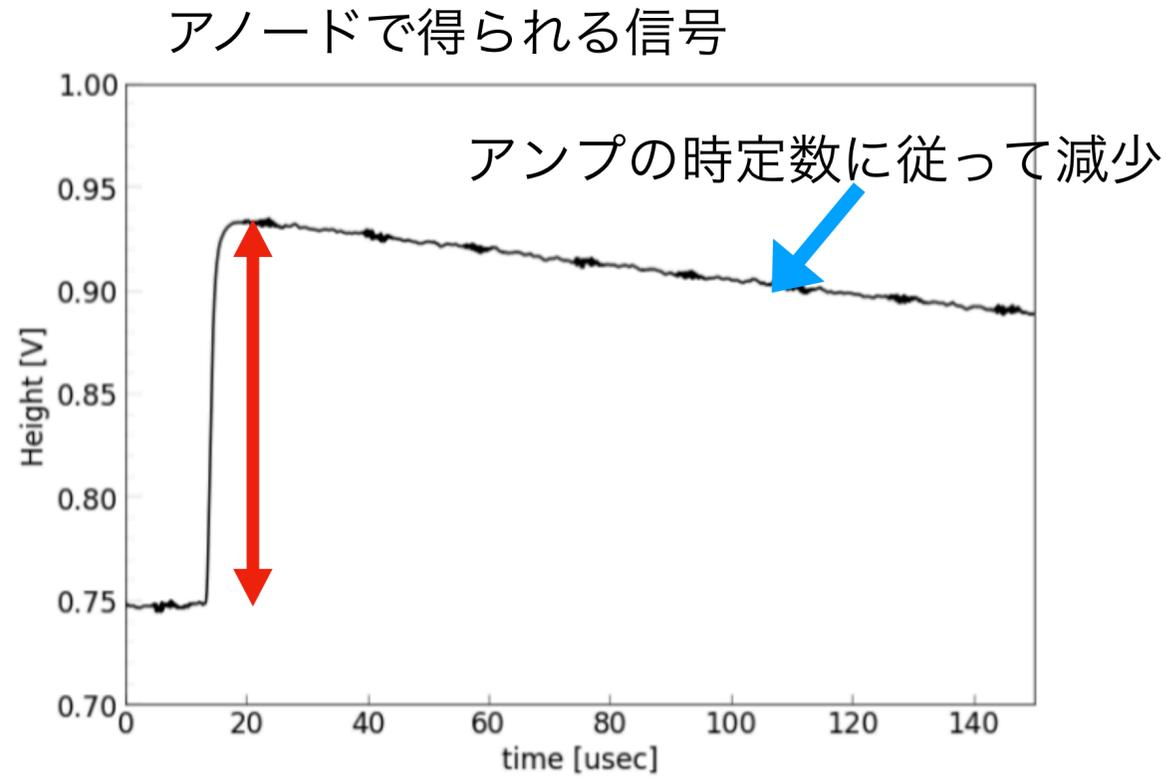
その光子数は ~ 2 個まで減少する。



ドリフト電場 0[V/cm]での薄膜裏での測定光量

部材	フラッシュランプ光	測定光量
金(Au)	有	$(-1.01 \pm 5.09) \times 10^{-11}$
	無	$(-1.64 \pm 4.50) \times 10^{-11}$
白金(Pt)	有	$(0.59 \pm 5.87) \times 10^{-11}$
	無	$(0.28 \pm 5.25) \times 10^{-11}$

電子数の計算

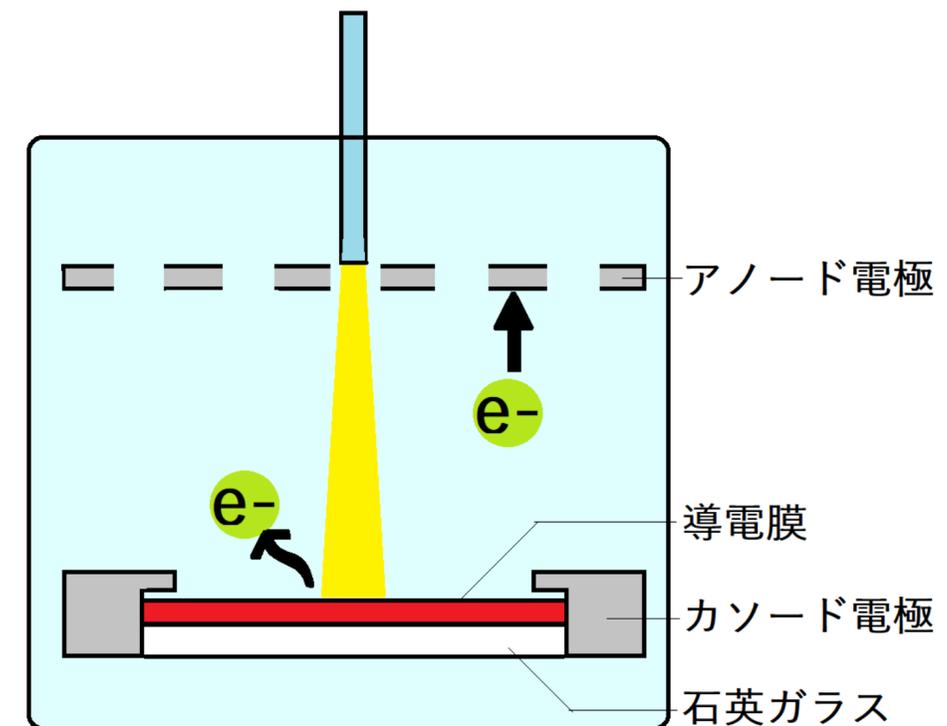


- 1: 観測した波高の最大値[V]を求め、アノード・カソードそれぞれで使用したプリアンプのゲインの値[V/C]を用いて電荷数[C]を読み出す。

$$\text{波高の最大値} / \text{ゲイン} = \text{測定電荷}$$

- 2: 素電荷[$1.60 \dots \times 10^{-19} \text{C}$]で割り、電子数に変換する。

$$\text{測定電荷} / \text{素電荷} = \text{電子数}$$



光子数の計算

- 1 : 信号を読み出すFACDへの入力インピーダンス[Ω]を用いて信号の波高[V]を電流[A]の値に変換。

$$\text{波高[V]} / 50\Omega = \text{光電流値[A]}$$

- 2 : フォトダイオードの分高感度特性をもとに電流[A]の値を入射光子の仕事率[W]に変換。

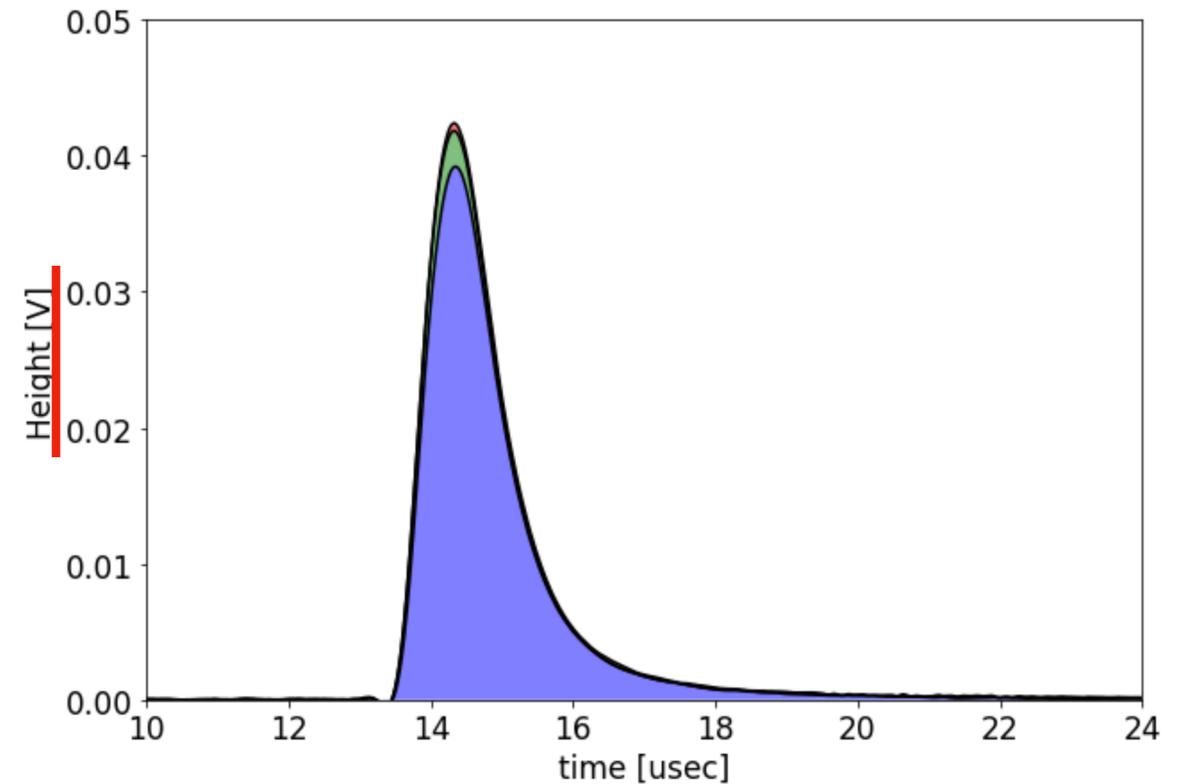
- 3 : 観測信号の時間[s]で積分することで入射光量[J]を求める。

$$\int \text{仕事率[W]} dt = \text{入射光量[J]}$$

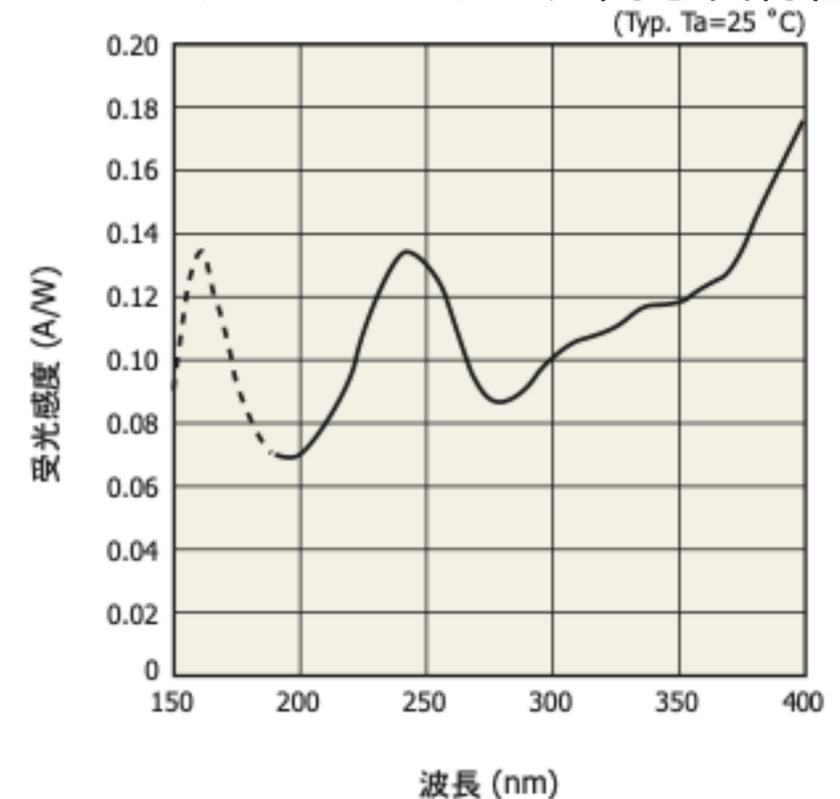
- 4 : 求めた入射光量[J]を予測から求めた1光子が持つ平均のエネルギー $E[\text{J}] (= hc/\lambda)$ で割ることで入射光子数を求める。

$$\text{入射光量[J]} / E = \text{入射光子数}$$

観測で得られるフォトダイオードの信号



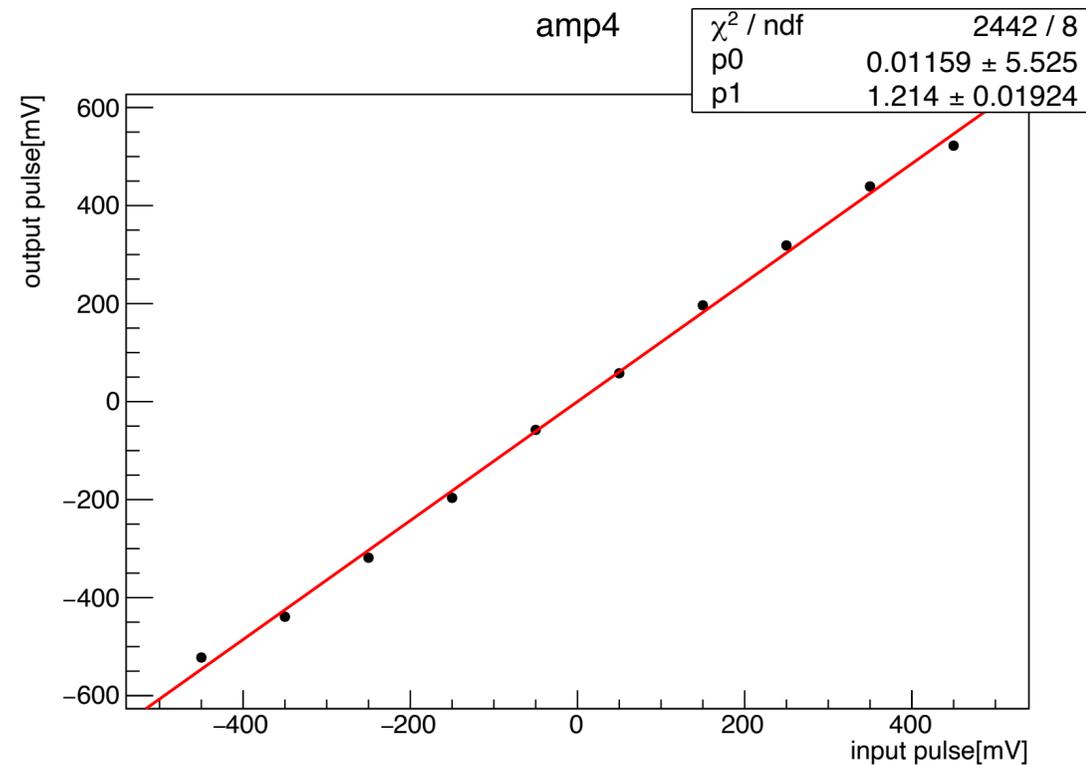
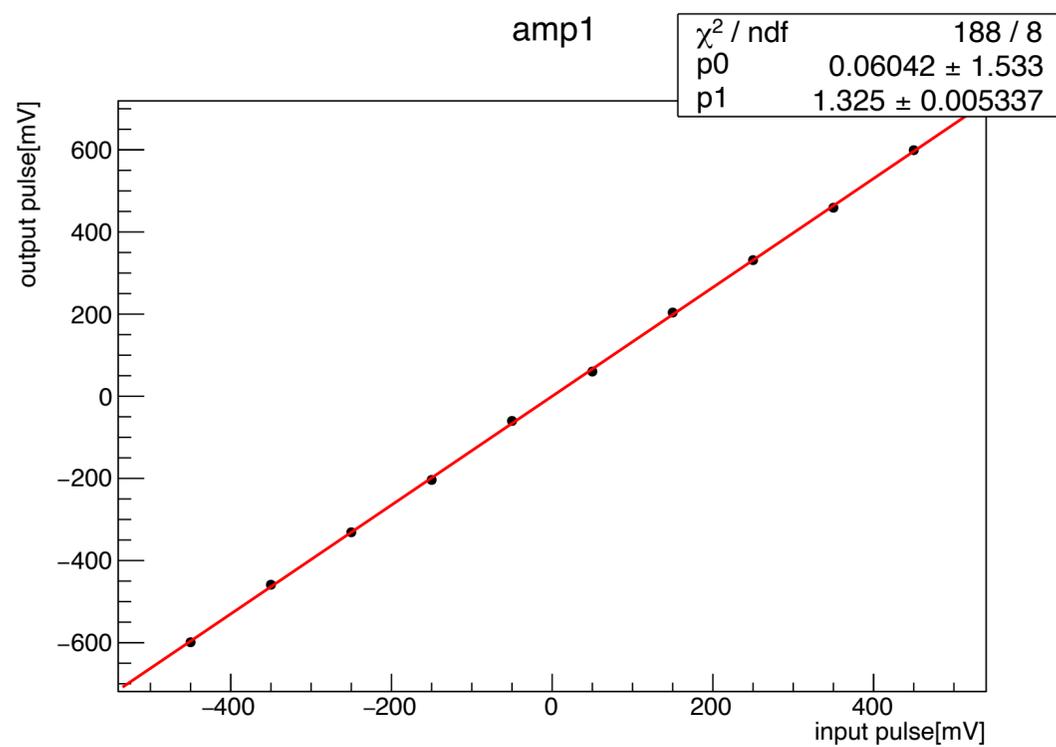
フォトダイオードの分高感度特性



アンプ回路

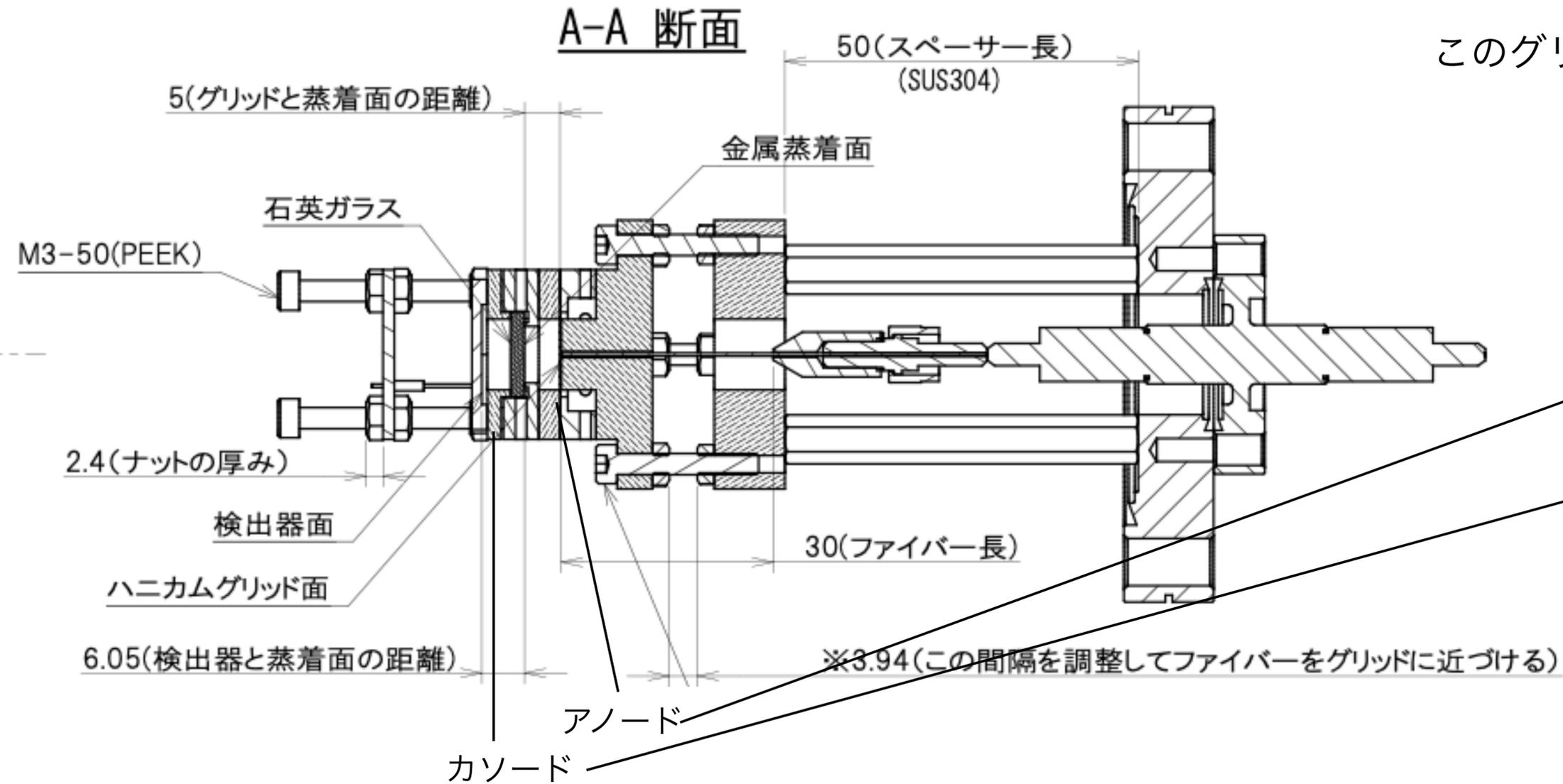
アノード、カソードで読み出す電子数の信号はアンプ回路を通して読み出す。
電子数の計算にはこのアンプ回路のゲイン値を用いる。

テストパルス用回路の2pFのコンデンサを利用し、1000mVインプット時のアウトプットをフィッティング結果から求めることで使用した各アンプ回路のゲインを導いた。

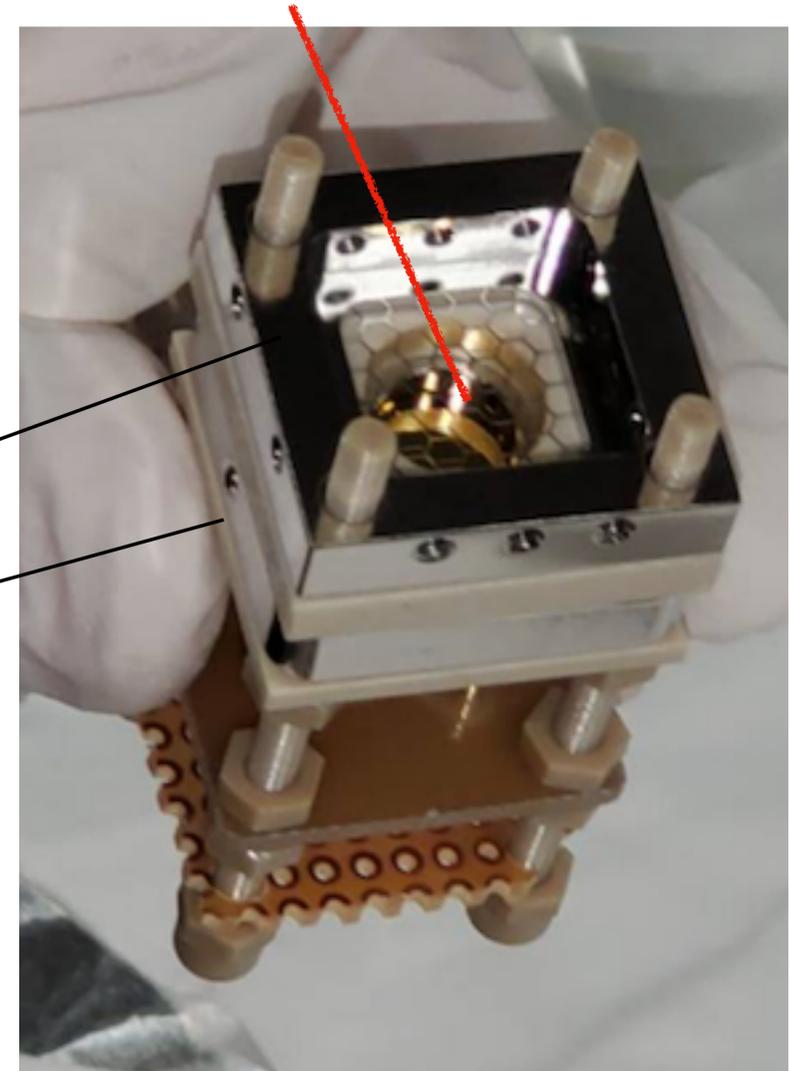


	ゲイン[mV/pC]
Amp1[カソード]	662.58 ± 5.55
Amp2[アノード]	606.90 ± 20.01

測定器詳細



このグリッド面の位置から光を通す



キセノンフラッシュランプからの光はファイバーを通して、アノードの位置から照射され、出た光が全て金属薄膜に当たるように設計した。