

# ニュートリノ崩壊光探索実験のための ニオブとアルミニウムを用いた 超伝導トンネル接合光検出器の開発

筑波大学 森内航也 修士論文発表 2016/02/12

筑波大数理, 理研<sup>A</sup>, KEK<sup>B</sup>, 岡山大<sup>C</sup>, 福井大学<sup>D</sup>, 近畿大学<sup>E</sup>, 関西学院大<sup>F</sup>,  
静岡大<sup>G</sup>, JAXA<sup>H</sup>, AIST<sup>I</sup>, Fermilab<sup>J</sup>, Seoul Nalt. Univ.<sup>K</sup>

森内航也, 金信弘, 武内勇司, 武政健一, 木内健司, 永田 和樹, 笠原宏太, 先崎蓮, 八木俊輔, 美馬寛<sup>A</sup>, 新井康夫<sup>B</sup>, 倉知郁生<sup>B</sup>, 羽澄昌史<sup>B</sup>, 石野宏和<sup>C</sup>, 吉田拓生<sup>D</sup>, 広瀬龍太<sup>D</sup>, 加藤幸弘<sup>E</sup>, 松浦周二<sup>F</sup>, 川人祥二<sup>G</sup>, 馬場俊祐<sup>H</sup>, 池田博一<sup>H</sup>, 和田武彦<sup>H</sup>, 長勢晃一<sup>H</sup>, 志岐成友<sup>I</sup>, 浮辺雅宏<sup>I</sup>, 藤井剛<sup>I</sup>, 大久保雅隆<sup>I</sup>, Erik Ramberg<sup>J</sup>, Paul Rubinov<sup>J</sup>, Dmitri Sergatskov<sup>J</sup>, Soo-Bong Kim<sup>K</sup>

# ニュートリノ崩壊光探索

質量の小さいニュートリノに崩壊するときに出る光子のエネルギーを測定する

• 質量の測定  $m_3 = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2E_\gamma}$

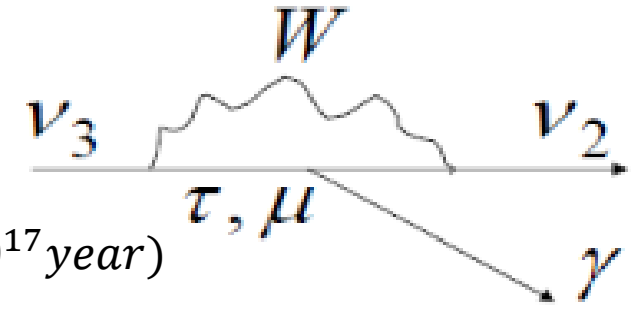
ニュートリノ振動実験による結果( $m_3^2 - m_2^2$ )と合わせることで  
ニュートリノ質量の決定。

• ニュートリノ崩壊の寿命

SMでは寿命 $\tau = O(10^{43} \text{ year})$ , Left-Right Symmetric Model では $\tau = O(10^{17} \text{ year})$

現在の実験による寿命の下限値は $\tau > O(10^{12} \text{ year})$

我々の実験では寿命の下限値引き上げも目指す。



## ニュートリノ崩壊光探索実験

長いニュートリノ寿命  $> 10^{12} \text{ year}$

⇒ 大量のニュートリノ源:

宇宙背景ニュートリノの崩壊光の観測

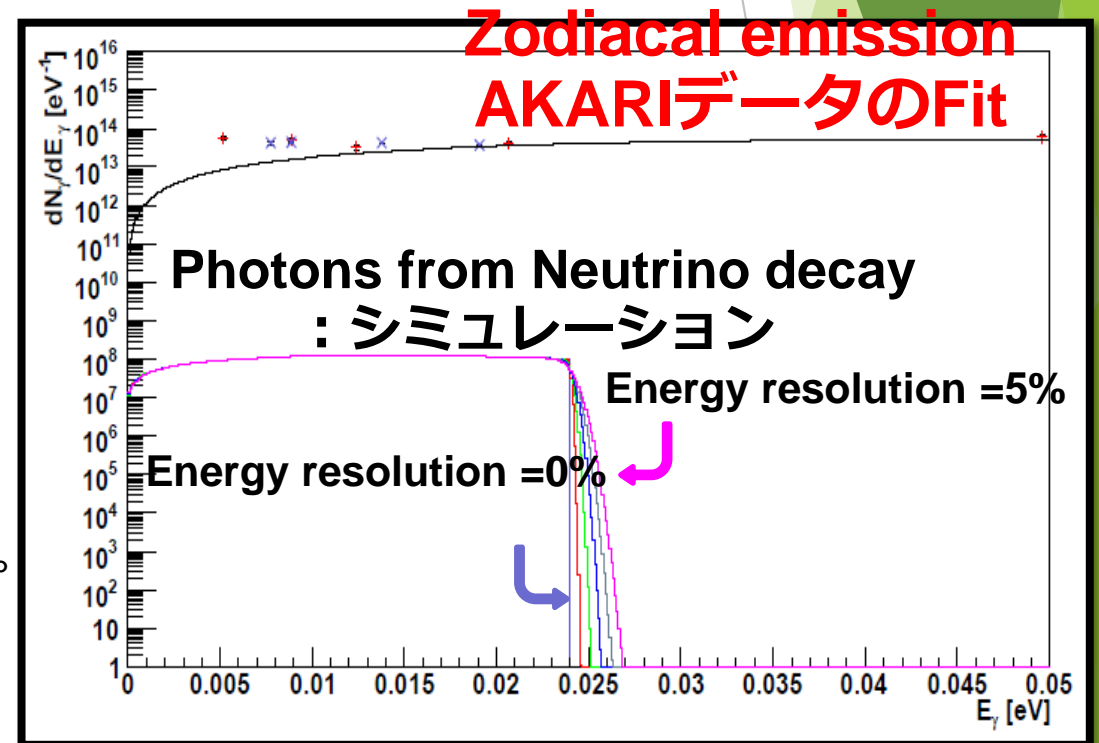
検出器

$E_\gamma = 25 \text{ meV}$  ( $m_3 = 50 \text{ meV}$ ) を仮定

$E: 16 \sim 31 \text{ meV}$  ( $\lambda: 40 - 80 \mu\text{m}$ )の領域でスペクトルを測定。

遠赤外領域で高いエネルギー分解能が可能である。

⇒ **超伝導検出器**



# STJ (Superconducting Tunnel Junction)

STJは超伝導体/絶縁膜/超伝導体の接合で形成された素子（ジョセフソン素子）である

## 検出器としての動作原理

1. 超伝導体層のクーパー対が光子を吸収し、準粒子 を生成。
2. 上部超伝導層から下部超伝導層に電圧をかけておくことで準粒子がトンネルし、電流が生じる。
3. トンネル電流を測定する。

## トラッピングゲイン（STJ内での増幅機構）

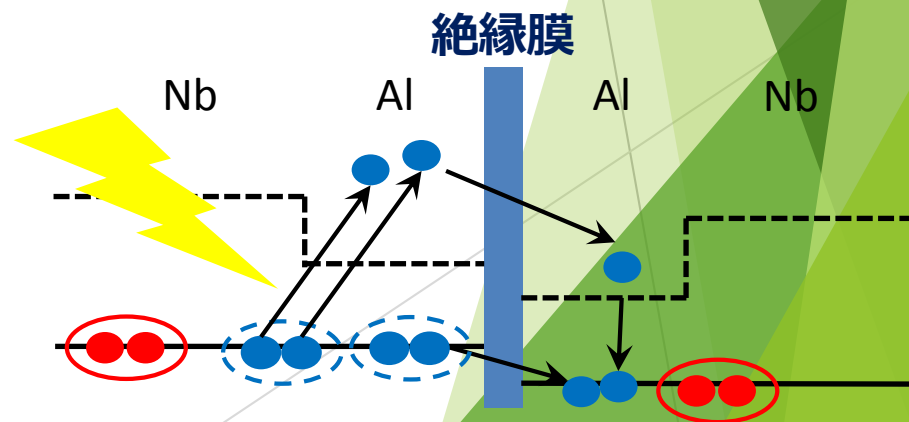
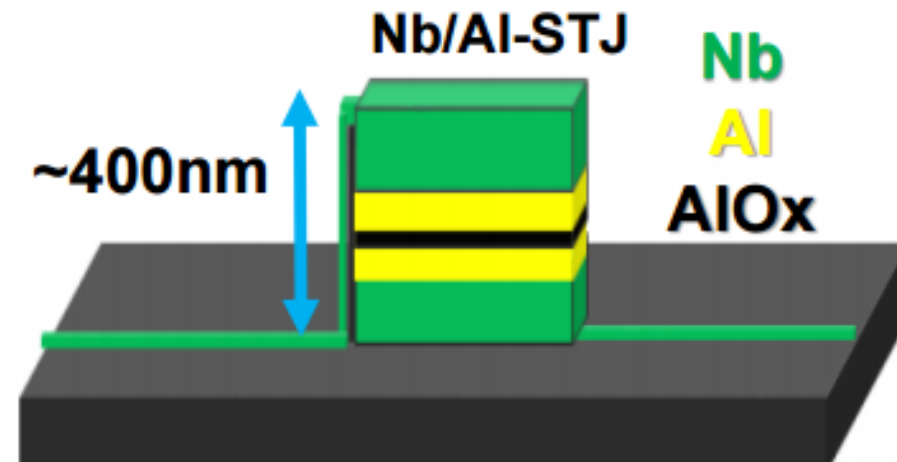
Al層があることにより、絶縁膜付近での準粒子の存在確率があがる。トンネルした粒子がクーパー対に戻ろうとすると、別のクーパー対を解離、新たに準粒子を生成することで発生準粒子を倍増させる。

準粒子生成数

$$N = G_{Al} \frac{E_\gamma}{1.7\Delta}$$

$G_{Al}$  : Al層によるトラッピングゲイン  
 $E_\gamma$  : 入射光子のエネルギー

	Nb	Al
転移温度 $T_c$ (K)	9.23	1.20
エネルギーギャップ $\Delta$ (meV)	1.550	0.172



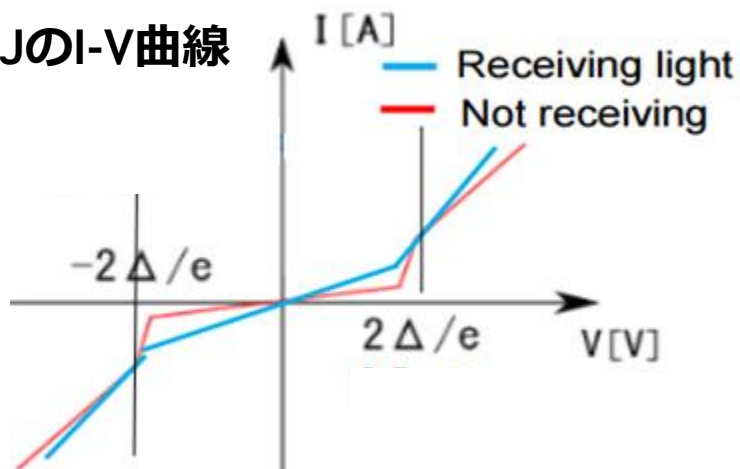
# STJの電流電圧特性

磁場を印加しジョセフソンカレントを抑制し、  
検出器として動作させる。

動作電圧では光入射なしでも電流が流れる（リークカレント）。

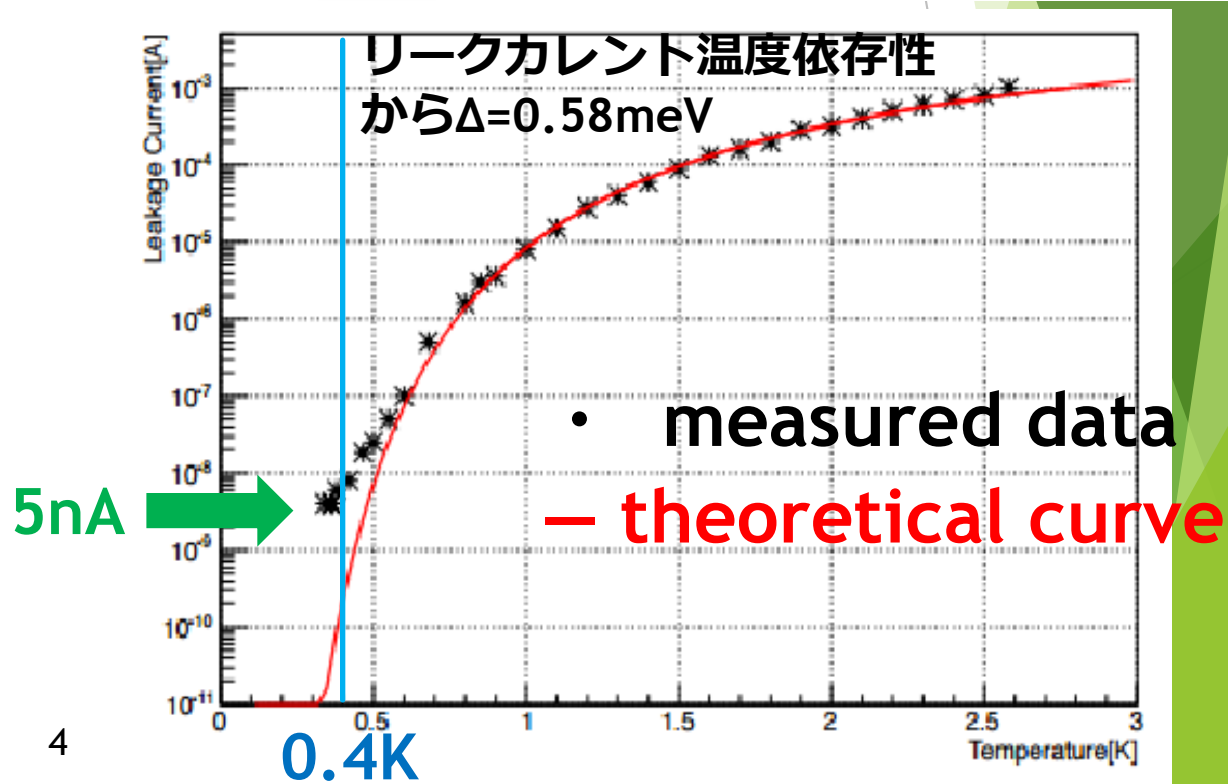
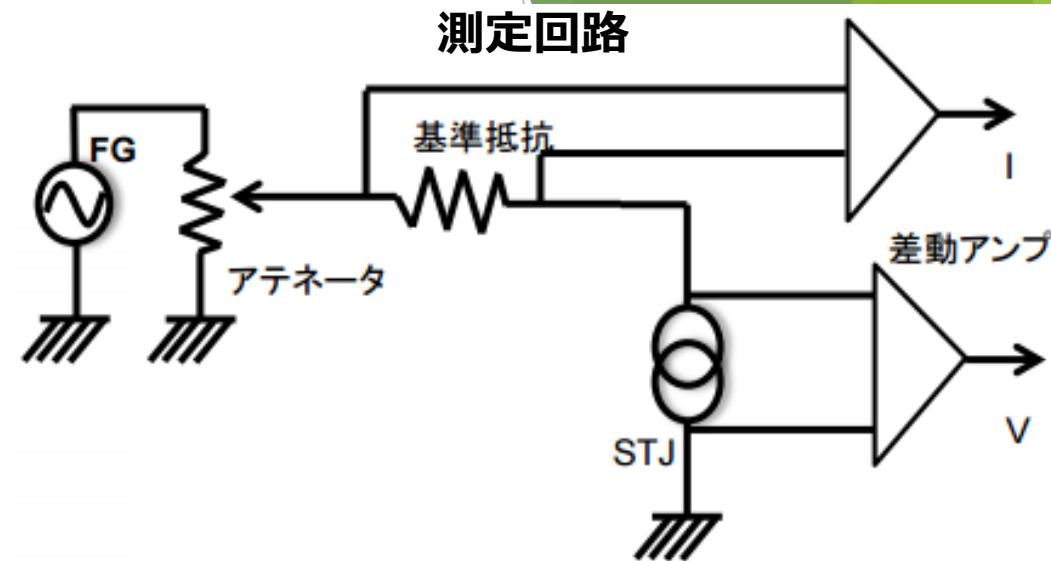
- ・熱励起された電子のトンネル
- ・測定系起因
  - 絶縁膜に垂直な磁束の侵入によるリークカレントの増大
  - 測定系の振動による準粒子の発生
  - 測定回路のGNDの不安定性
- ・絶縁膜の欠陥に流れる電流

## ・Nb/Al-STJのI-V曲線

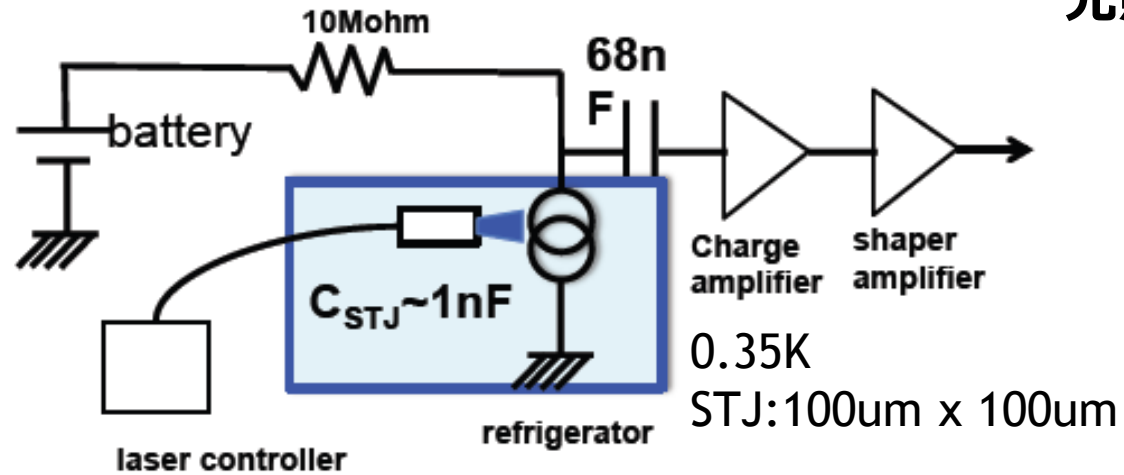


## 熱起因のリークカレント

右図から超伝導転移温度の1/10程度の温度で  
熱励起起因の成分は支配的ではなくなる。



# Nb/Al-STJ光応答測定



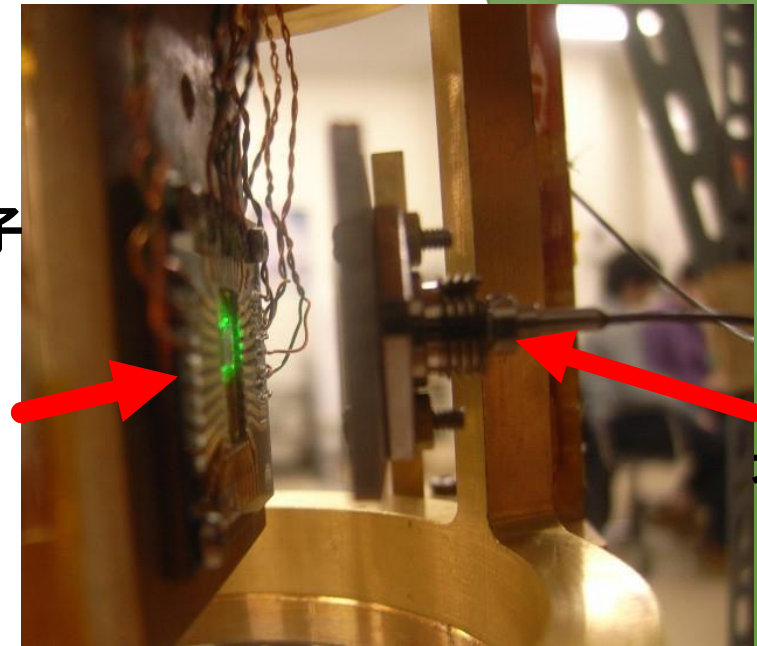
リークカレント 7nA@0.4mV  
~0.4mVの電圧で動作させたときの光応答

Charge amp. : ORTEC142C  
Shaper amp. : ORTEC671

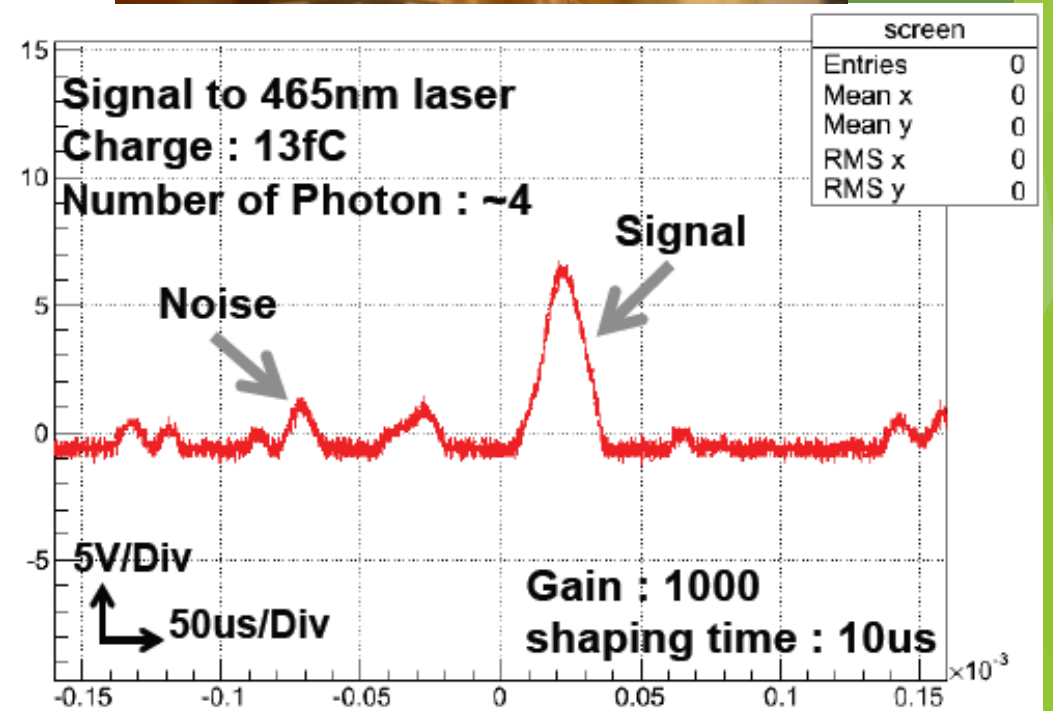
可視光、遠赤外光の1光子信号の測定には  
低ノイズの測定系の構築が必要

光照射の様子

STJ



光ファイバー



# Nb/Al-STJの開発

## 25meVの1光子検出への要請

25meVの1光子に対して、200e<sup>-</sup>程度

( $G_{al}=10$ , 信号幅1.5 $\mu$ sを仮定、 $\Delta$ は測定値0.57meV)

STJの信号幅1.5 $\mu$ sに200e<sup>-</sup>が流れる。

⇒ **信号がノイズに埋もれないためにリークカレントの低減が必要**

リークカレントへの要請 100pA以下

- ・測定系改善によるノイズ低減

⇒ **極低温から室温までの読み出し線にのるノイズと信号の分離**

STJ素子のすぐ近くで信号を増幅

- ・極低温動作可能な増幅回路開発

SOI-FETを用いた回路の開発

本発表では以下の項目について報告する。

- ・STJの静電容量測定
- ・ノイズ低減のための測定系の改善
- ・可視光1光子レベルの測定



# STJ静電容量の測定

STJの静電容量は信号増幅回路の設計上重要  
値を知っておく必要がある

## 測定方法

### 1. 極低温でのSTJの電流電圧特性の測定

ファンクションジェネレータ(FG)からsin波を入力し、I-V曲線を測定

10, 500, 2000 Hzの複数の周波数でI-Vの測定, 位相のずれをみる

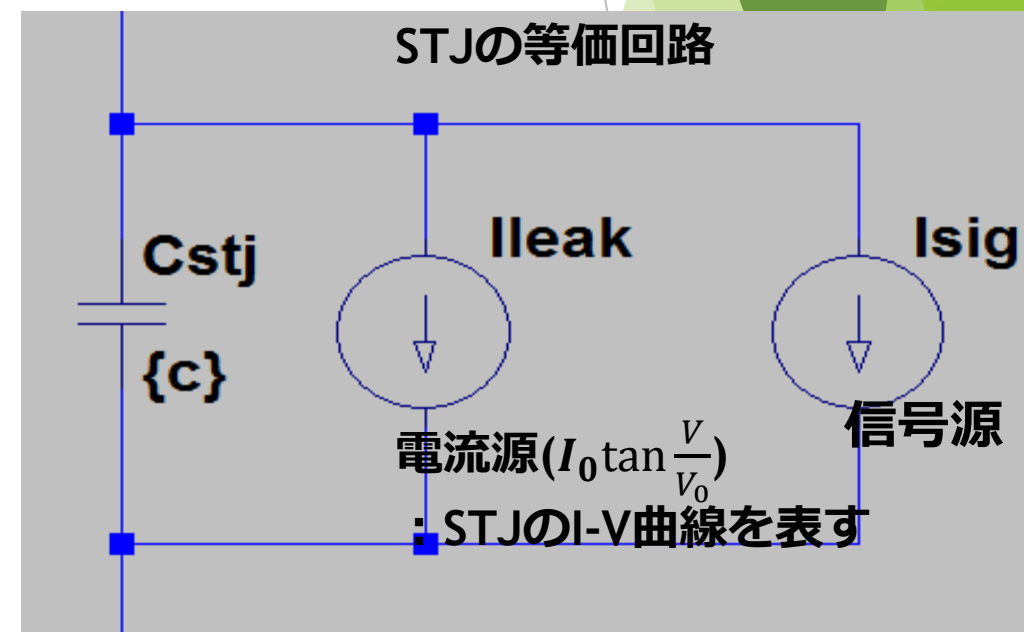
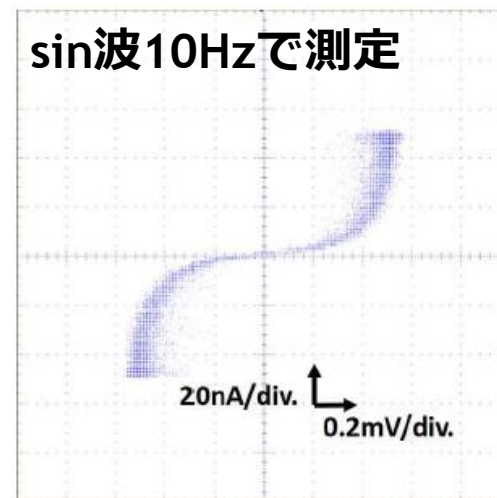
### 2. 回路シミュレータで実際の測定をシミュレーション

STJの等価回路として右図の回路を仮定

電流電圧特性をtangent 関数で近似

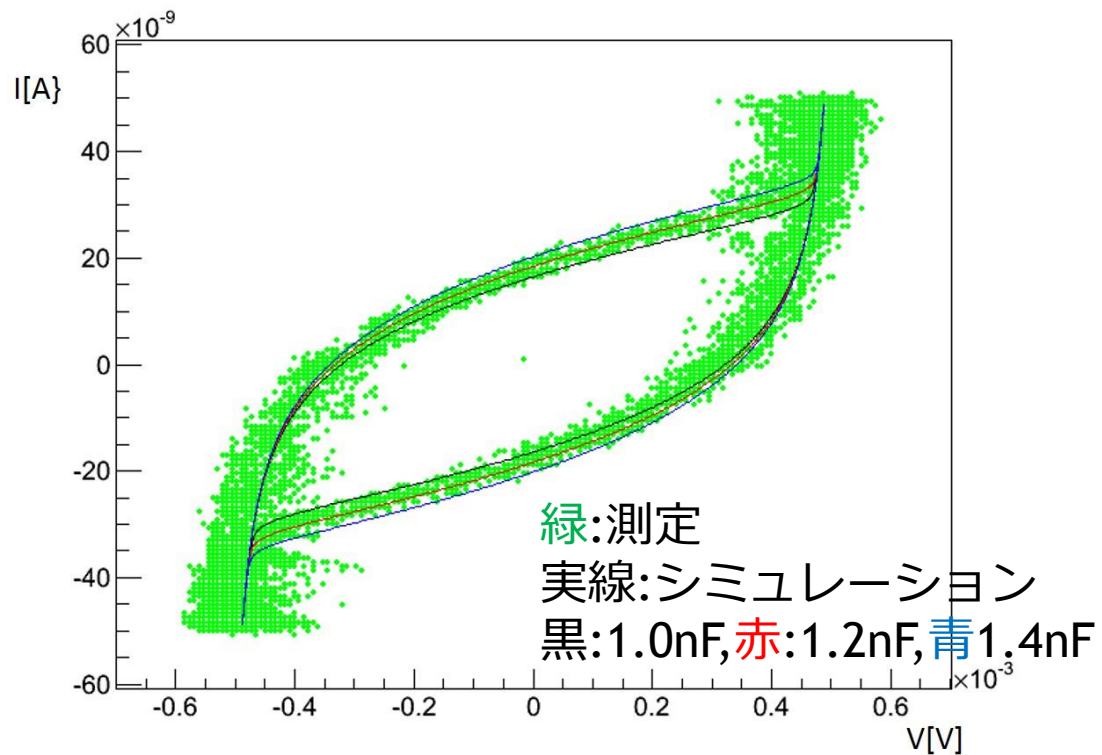
### 3. 最小自乗法による最丈値の決定

$C_{stj}$ の数値を変え、測定結果との一致をみる

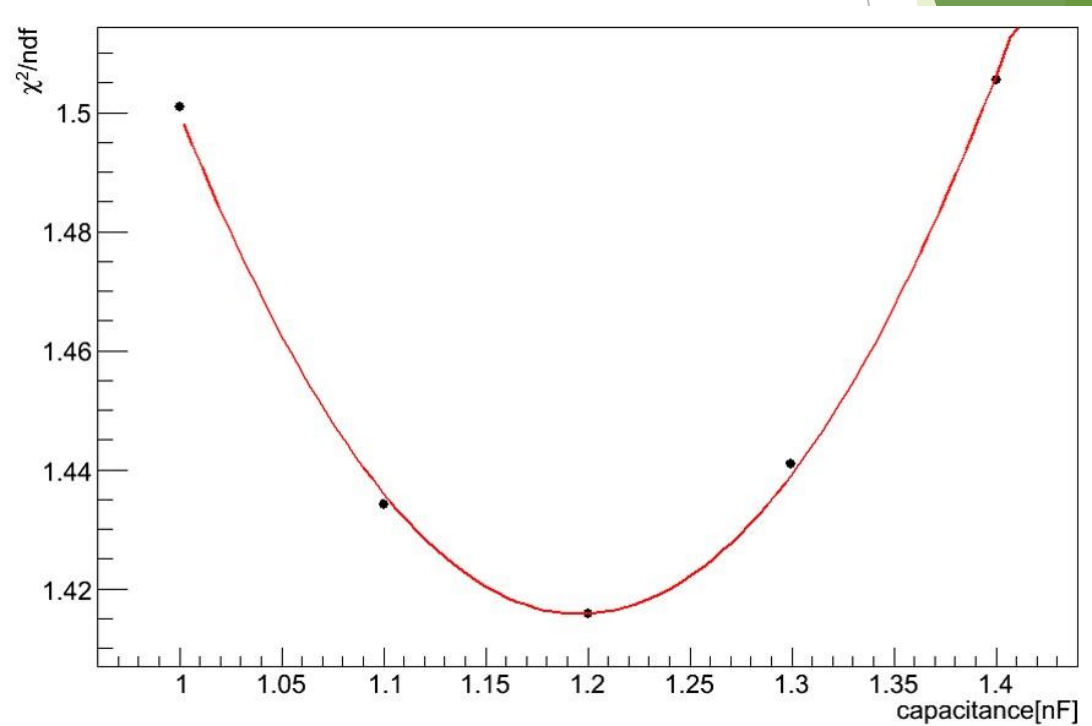


# STJ静電容量

## 100um角STJ測定結果



100um角Nb/Al-STJ  
sin波2000Hzで測定



100um角Nb/Al-STJ  
 $1.20 \pm 0.01$  nF



# STJ静電容量の測定結果

## 測定したサンプルと結果

サンプル ID	ジャンクションサイズ	静電容量
チップ 8H, 素子 20umA	20 $\mu m$ 角	0.85 $\pm$ 0.07nF
チップ 8D, 素子 stj-B	20 $\mu m$ 角	0.83 $\pm$ 0.05nF
チップ 8H, 素子 50umA	50 $\mu m$ 角	1.09 $\pm$ 0.01nF
チップ 7H, 素子 50umA	50 $\mu m$ 角	1.02 $\pm$ 0.01nF
チップ 8H, 素子 A10	100 $\mu m$ 角	1.40 $\pm$ 0.08nF
チップ 7H, 素子 A6	100 $\mu m$ 角	1.33 $\pm$ 0.03nF
チップ 7H, 素子 A9	100 $\mu m$ 角	1.18 $\pm$ 0.04nF
チップ 8D, 素子 A9	100 $\mu m$ 角	1.20 $\pm$ 0.01nF

静電容量測定結果は測定系の寄生容量込み.配線寄生容量0.8nF.  
小さいジャンクションサイズのSTJでは  
配線寄生容量が支配的。

# 筑波大学の測定系の改善

## 3He減圧冷凍機

最低温度300mKで測定可能 ->熱起因リークカレントは十分抑制できる

- ・素子に入る外部磁場へのシールド  
ステージを筒上に囲むように磁場シールドの設置
- ・測定回路のGNDの安定化  
冷凍機筐体を測定回路のGNDとし、読み出しで用いるオシロスコープ、差動アンプ等を接地し安定させる

**この位置に磁場シールドを設置**

**最低温ステージ**



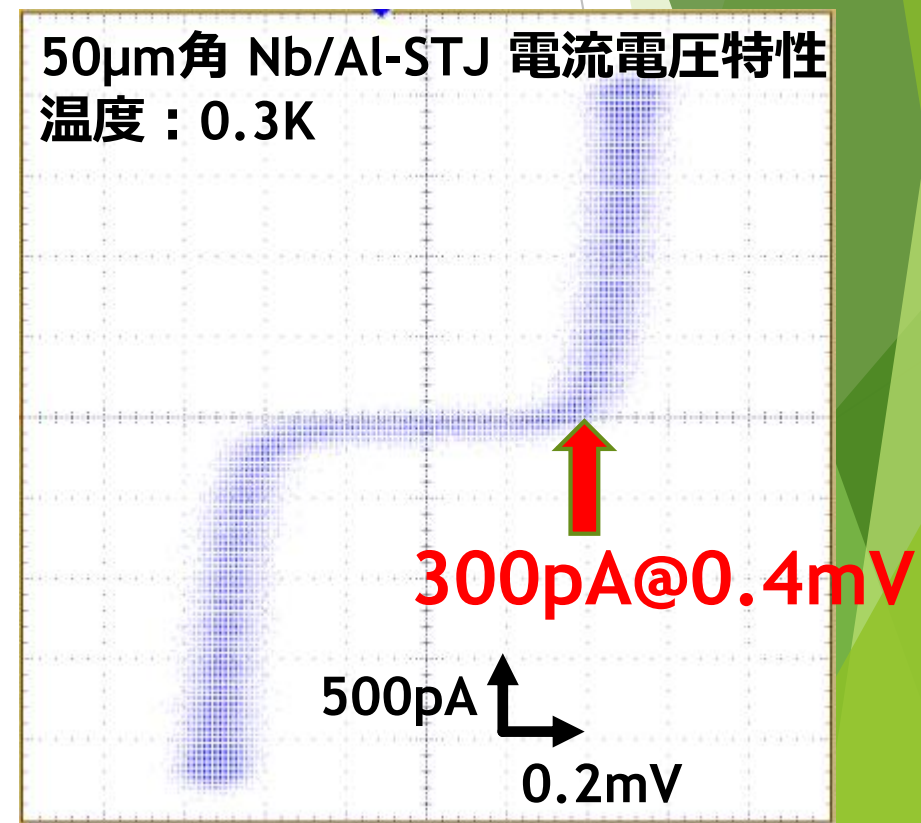
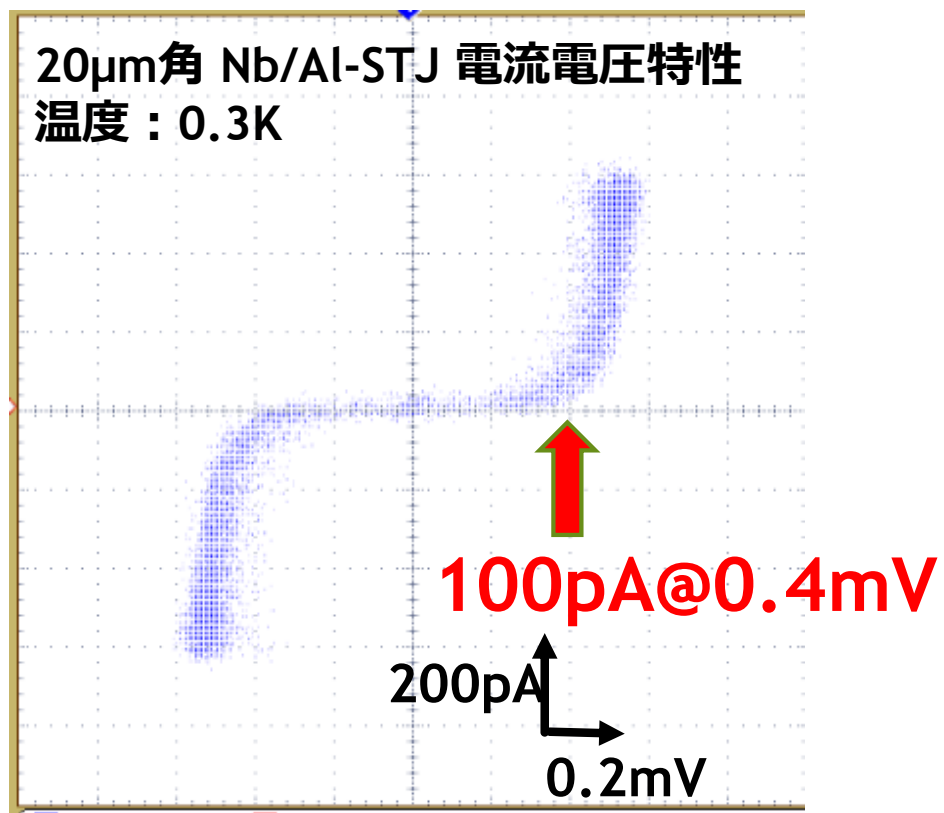
# 測定系改善後の結果

## 回路GNDの安定化

- ・レモケーブルの外部導体でのみ接続されていたGNDを新たにシールド線を設置し接続を強化

リークカレント     $\sim 10\text{nA} \rightarrow 300\text{pA}$ に低減( $50\mu\text{m}$ 角)

$\sim 10\text{nA} \rightarrow 100\text{pA}$ に低減( $20\mu\text{m}$ 角)



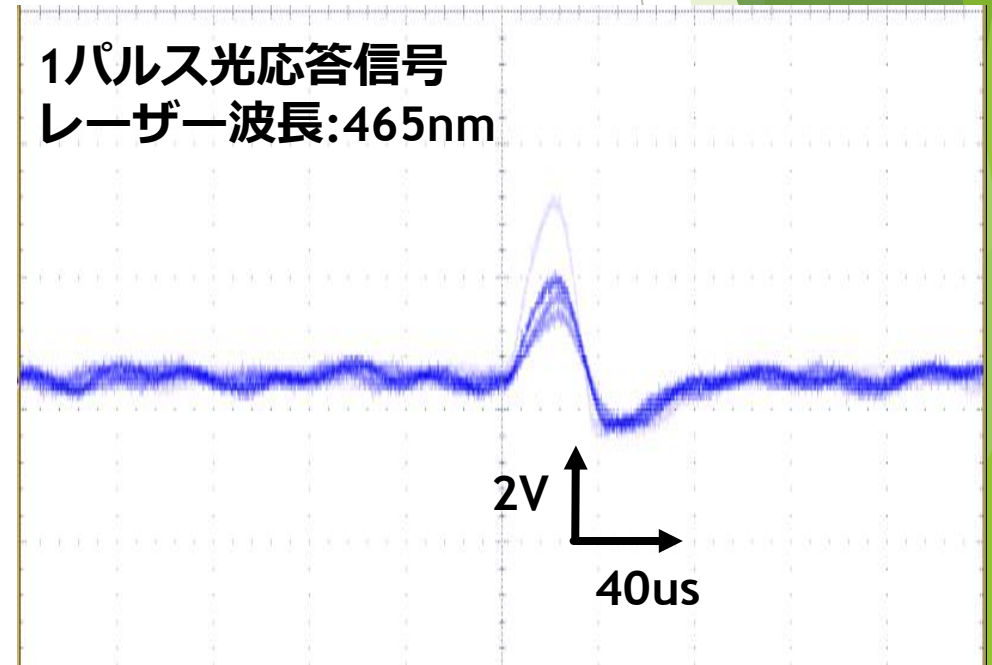
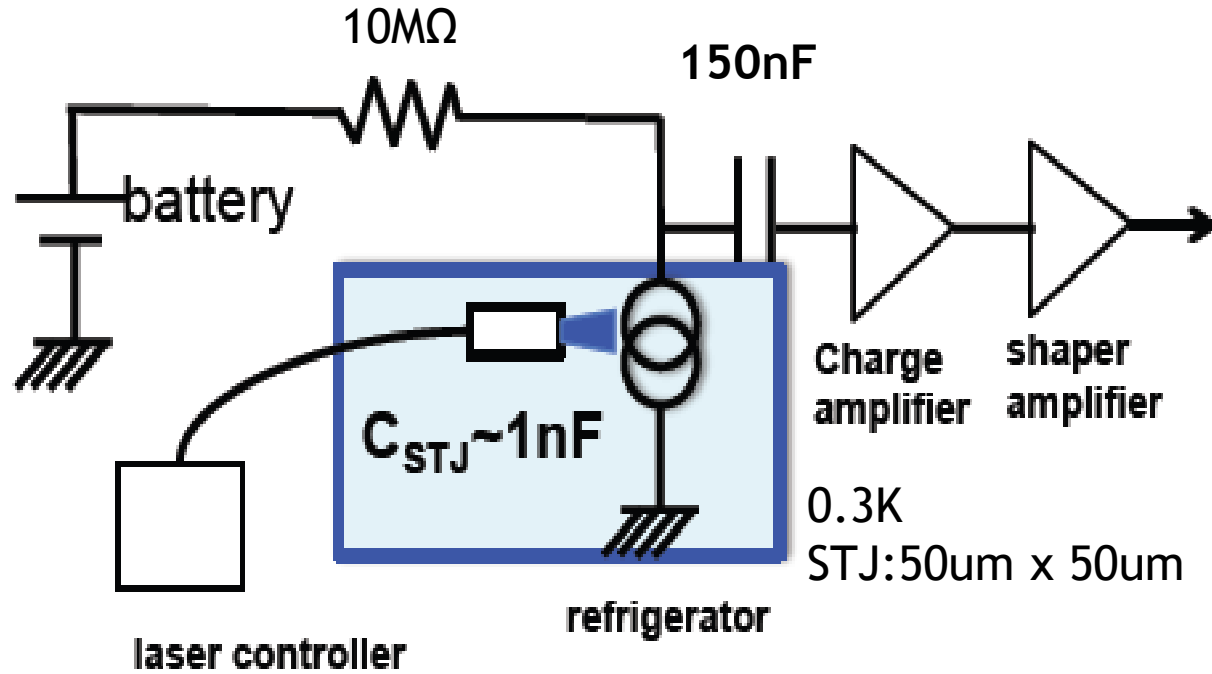
# 光応答測定

レーザー 波長 $\lambda=465\text{nm}$  パルス光測定

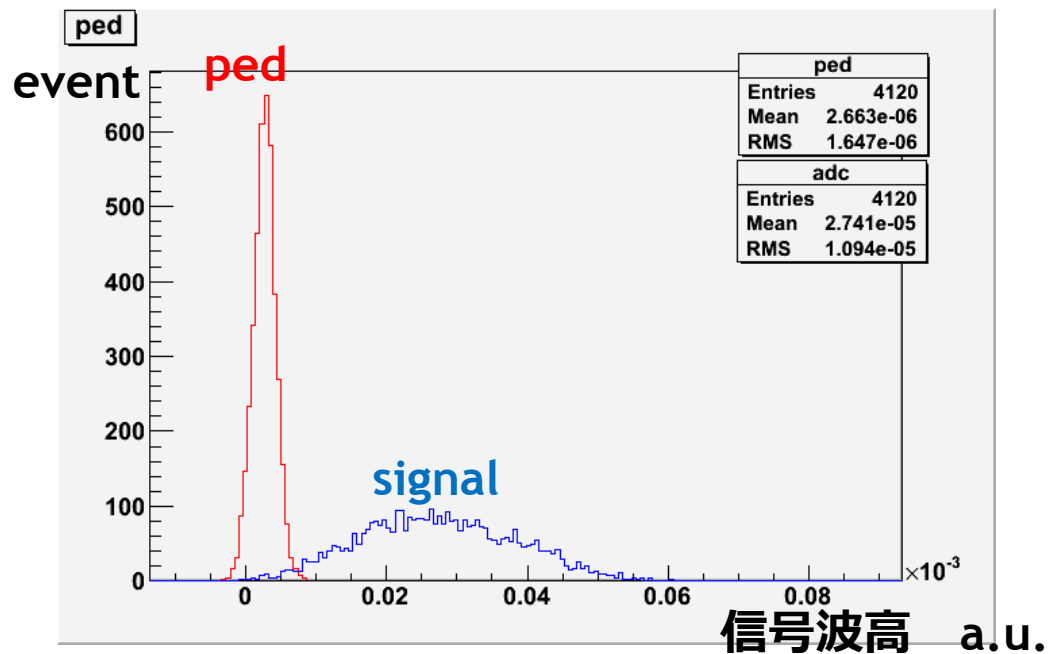
Shaper amp.

shaping time :  $10\mu\text{s}$

gain : 10



# 測定結果



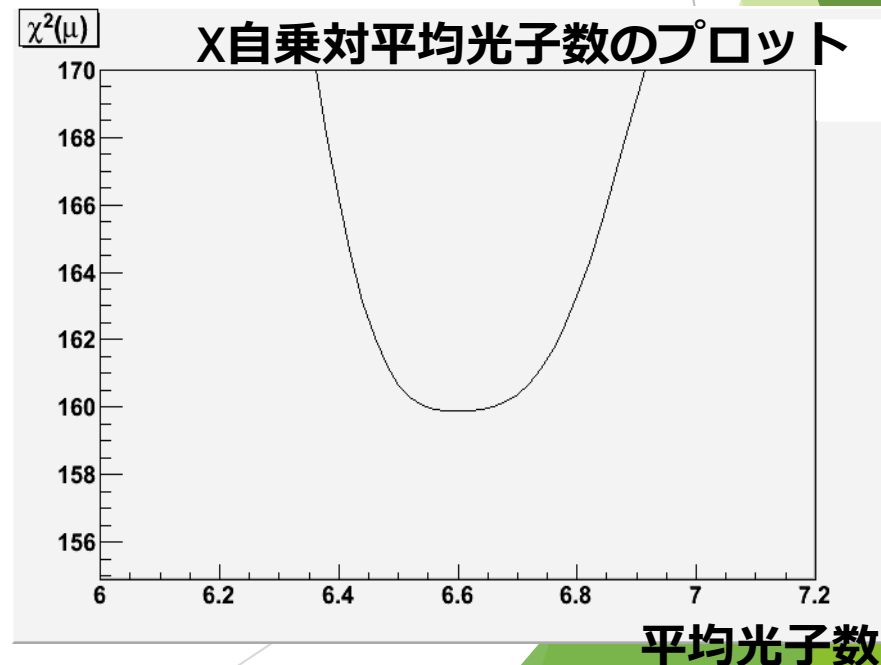
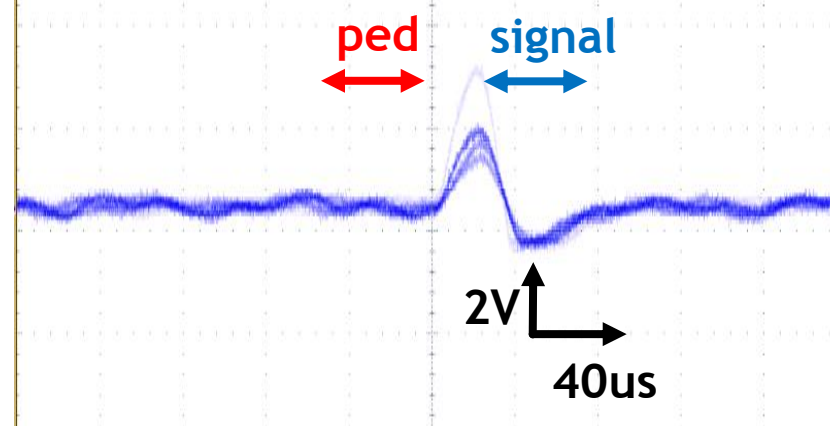
光子数がポアソン分布することを仮定,以下の式でフィット

$$f(x, y) = \frac{N_{obs}}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} \sum_{n=0}^{20} \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!} \exp \left\{ -\frac{(x - n(M/\mu))^2}{2\sigma_p^2} \right\}$$

右図はある光子数を仮定した場合のx自乗のプロット  
 信号値  $6.6 \pm 0.1$  光子相当

1光子信号はペデスタル分布の $2.5\sigma$ あたり

1パルス光応答信号  
 レーザー波長:465nm





# まとめ

- STJ静電容量測定

100 $\mu$ m角の素子で0.5nF

現在の測定系では配線の寄生容量0.8nFが支配的

- 測定系の改善

磁場シールド、測定回路GNDの安定化によりノイズが低減

~10nA  $\rightarrow$  300pA @ 0.4mV (junction size 50 $\mu$ m x 50 $\mu$ m)

~10nA  $\rightarrow$  100pA @ 0.4mV (junction size 20 $\mu$ m x 20 $\mu$ m Nb/Al-STJ)

- 光応答測定

可視光(波長 $\lambda$ =465nm)に対して6.6光子相当の信号を測定できた

結果からペデスタルの2.5 $\sigma$ あたりに1光子信号が予想できる

今後

- さらなるノイズ軽減
- ノイズ軽減された測定系で光応答評価を行う
- 光強度を絞り光応答測定を行い、可視光 1 光子観測を行う
- 将来的には赤外1光子の測定を行う