

Nb/Al-STJ, Hf-STJ開発の現状

筑波大学素粒子実験室

奥平琢也

ニュートリノフロンティア研究会

2013/12/7

Out line

- ◆超伝導トンネル接合素子(STJ)
- ◆Nb/Al-STJの光応答
- ◆Hf-STJの光応答
- ◆まとめ

超伝導トンネル接合素子(STJ)

現在筑波大学が研究を行っているSTJは
ニオブとアルミを用いたSTJ(Nb/Al-STJ)とハフニウムを用いたSTJ(Hf-STJ)

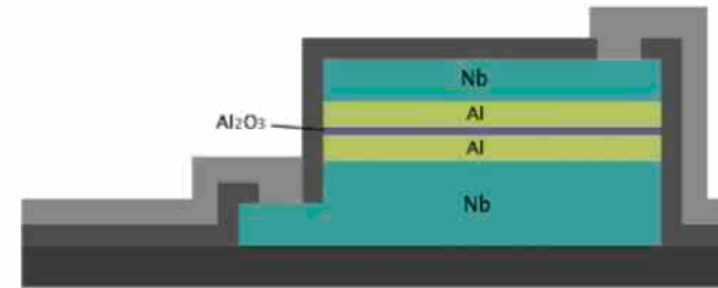
• Nb/Al-STJ

ロケット実験に用いる予定
作成方法が確立しており、
測定を行う温度は1.8K～0.9K程度

発生電荷数

$$q = G_{Al} \frac{\epsilon_p}{1.7\Delta_{Nb}} e$$

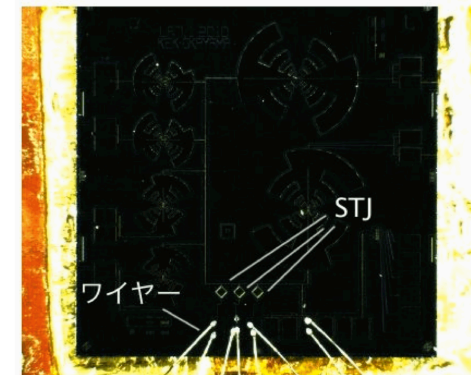
G_{Al} : トラッピングゲイン
 ϵ_p : 光子のエネルギー



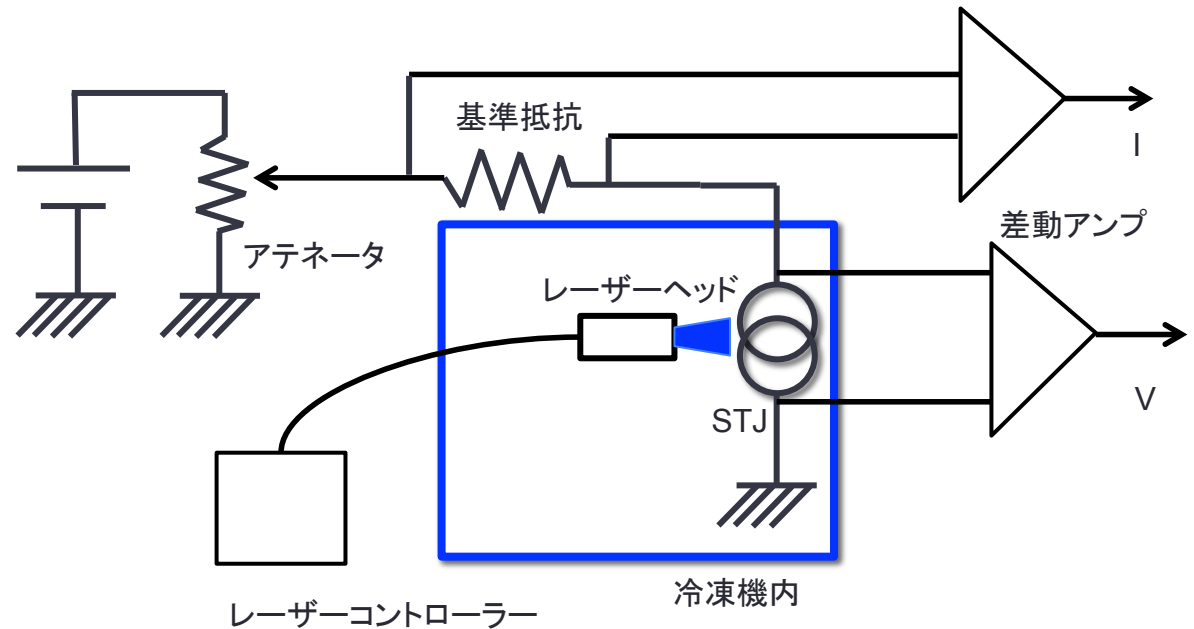
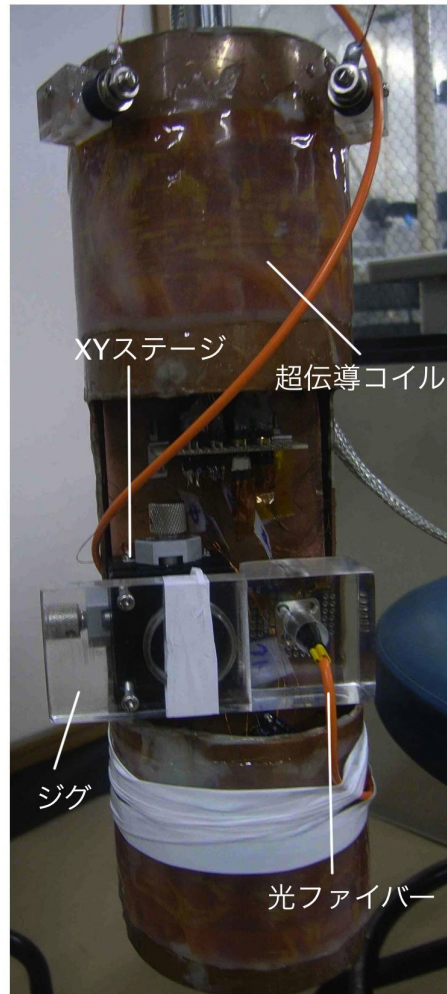
	Si	Nb	Al	Hf
Tc [K]		9.23	1.20	0.165
Δ [meV]	1100	1.550	0.172	0.020

• Hf-STJ

将来の衛星実験に用いる予定
希釈冷凍機を用いて100mK以下で測定を行う
原理的にはNb/Al-STJの約70倍のエネルギー分解能を持つ



測定回路



冷凍機外から光ファイバーを用いて光を照射

基準抵抗はSTJの抵抗値に対して十分大きいものを用い、**STJにとってほぼ定電流源**として働く回路を用いている

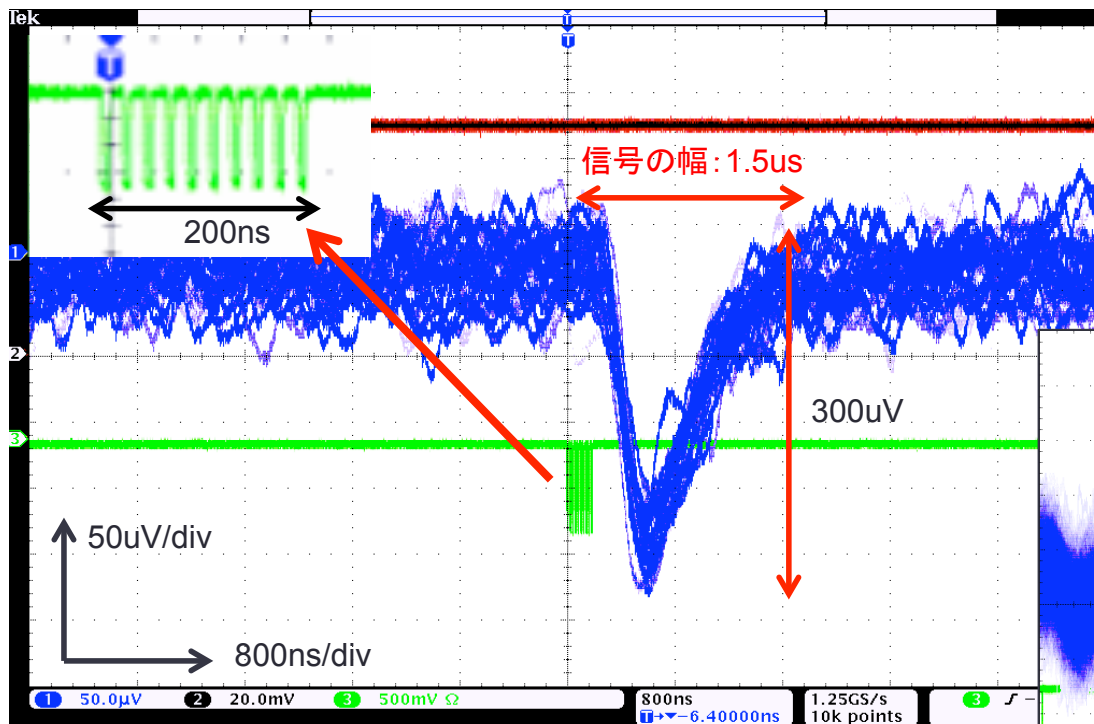
STJにレーザーを照射し、**STJの両端電圧の変化**を測定する

Nb/Al-STJの光照射時の電圧変化

100 μm ×100 μm のNb/Al-STJに近赤外光($\lambda=1320\text{nm}$)と青色光(456nm)のレーザーを照射し、電圧変化を観測 (測定温度:1.8K)

入射光として50psのパルス光を1回～複数回をまとめて照射した

近赤外光10パルスまとめて照射した時の電圧の変化

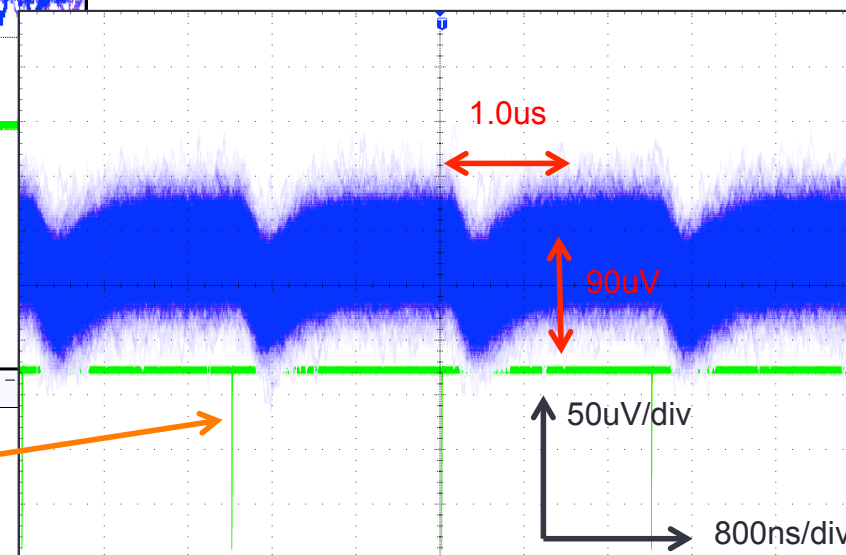


信号の幅 $\sim 1.5\mu\text{s}$

たち下がり時間 $\sim 0.3\mu\text{s}$

立ち上がり時間 $\sim 1.2\mu\text{s}$

青色光1パルスごとの電圧の変化

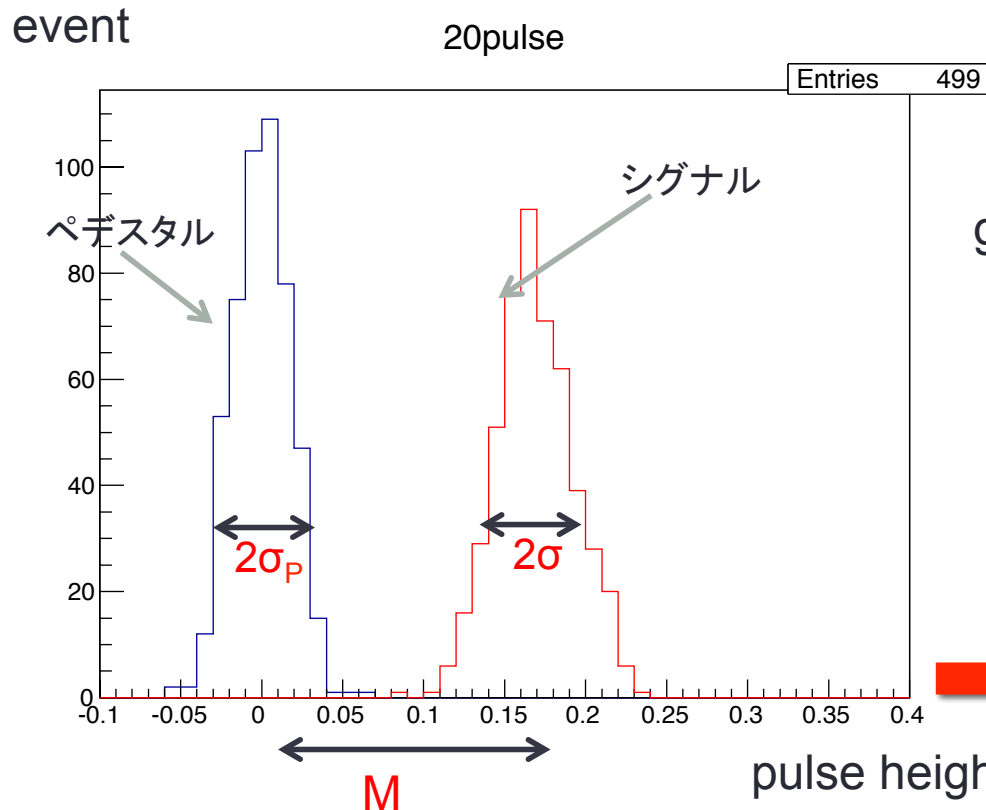
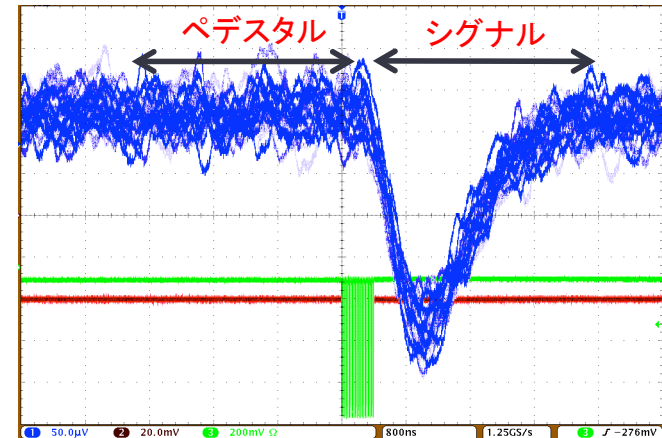


各レーザーパルス

入射光子数の評価

STJの光照射時のパルス応答の波高分布から、入射光子数を評価する

ペDESTAL領域とシグナル領域を積分し、
それぞれの広がりと中心値から入射光子数を
求める



gainを G と置き、gainに揺らぎがないとすると

$$G \cdot N_\gamma = M$$

$$G \cdot \delta N_\gamma = G \sqrt{N_\gamma} = \sqrt{\sigma^2 - \sigma_p^2}$$

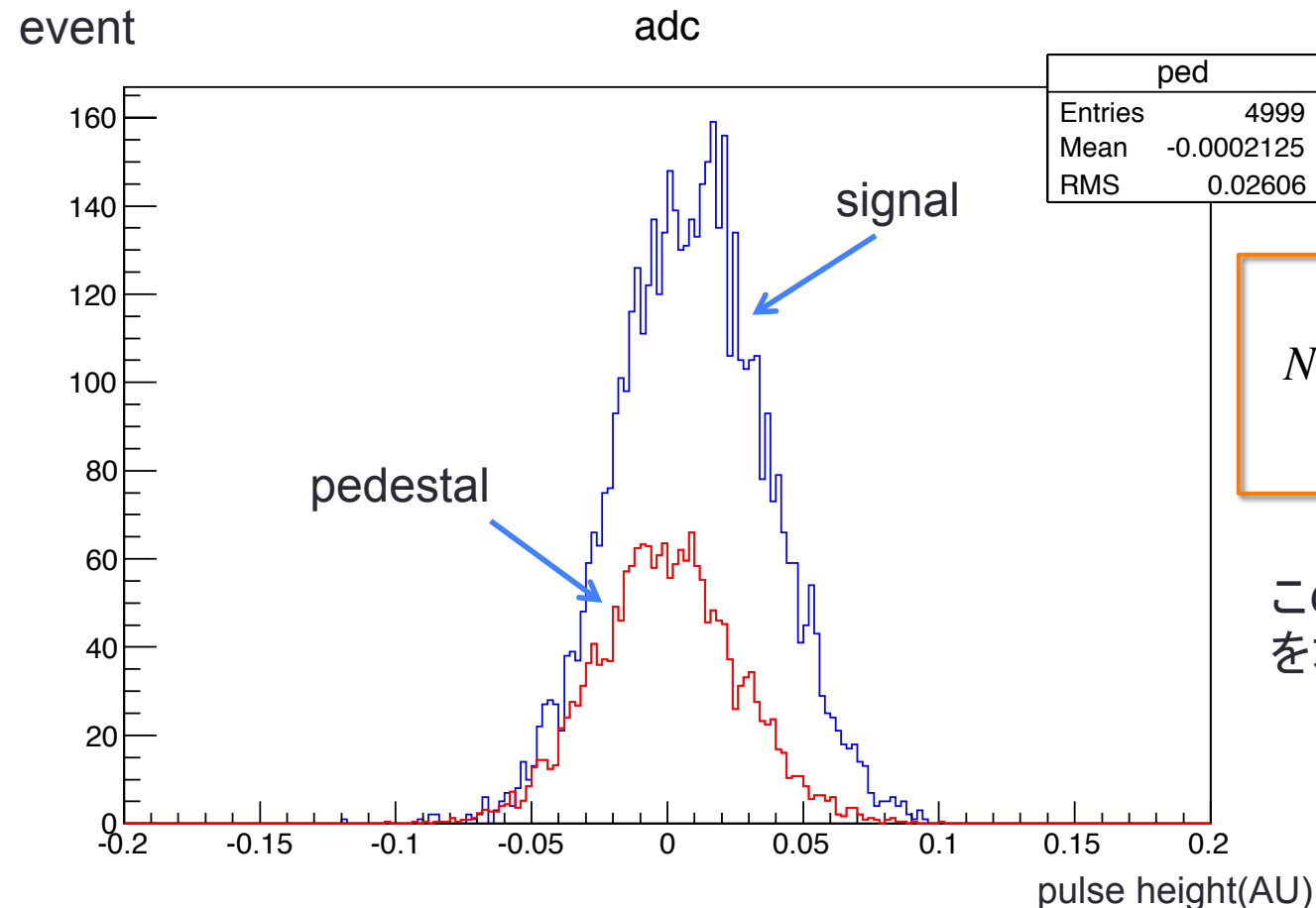
$$N_\gamma = \frac{M^2}{\sigma^2 - \sigma_p^2}$$

M	signal mean
σ	signal r.m.s
σ_p	pedestal r.m.s

可視光照射時のパルス波高分布

遠赤外光の1photon検出の前段階として可視光(456nm)の1photon検出を目指す

4 μm^2 のSTJに可視光(456nm)の光を2pulse(100ps)照射した。



$$N_{\gamma} = \frac{M^2}{\sigma^2 - \sigma_p^2}$$

M mean
 σ r.m.s
 σ_p pedestal r.m.s

この式を用いて平均フォトン数を求めると

$$N_{\gamma} = 1.16 \pm 0.33$$

可視光照射時のパルス波高分布

平均photon数を変えながら

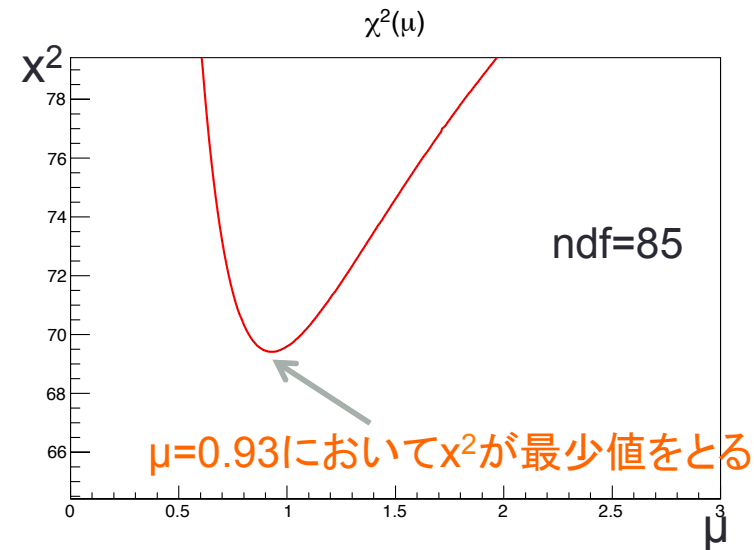
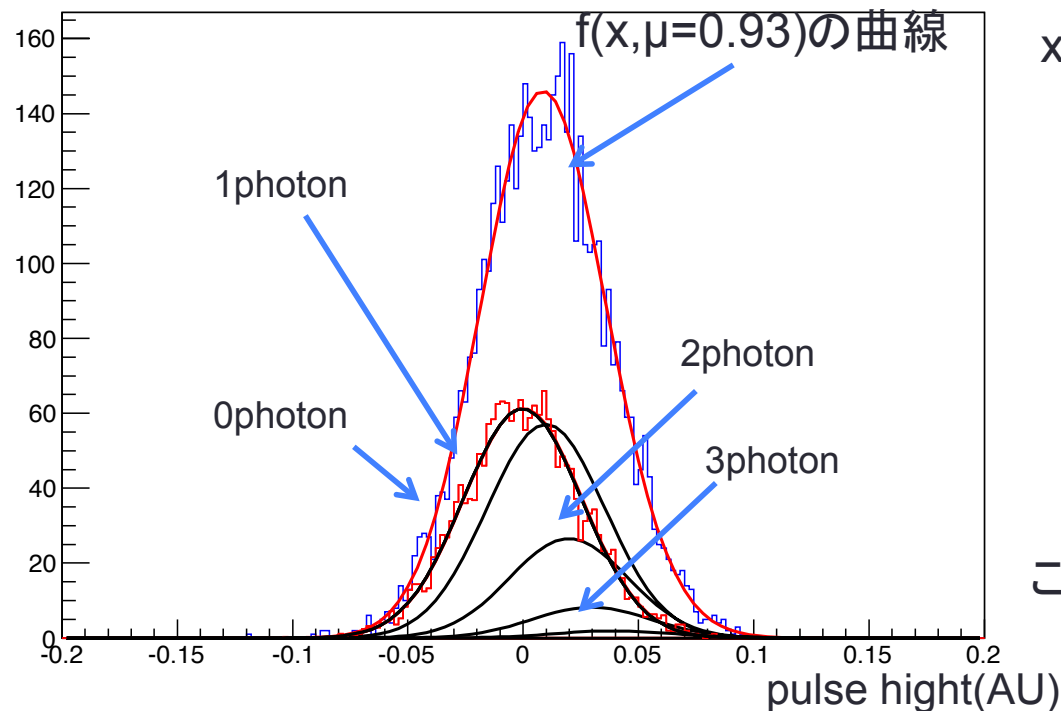
各フォトンのピークがポアソン分布に従いペデスタルと同じ広がりを持つ

$$f(x, \mu) = \frac{N_{obs}}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \sum_{n=0}^{10} \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!} \exp\left(-\frac{(x - n(M/\mu))^2}{2\sigma_p^2}\right)$$

を描き、それぞれ χ^2 乗を求めた

event

adc



これよりSTJが検出したphoton数は

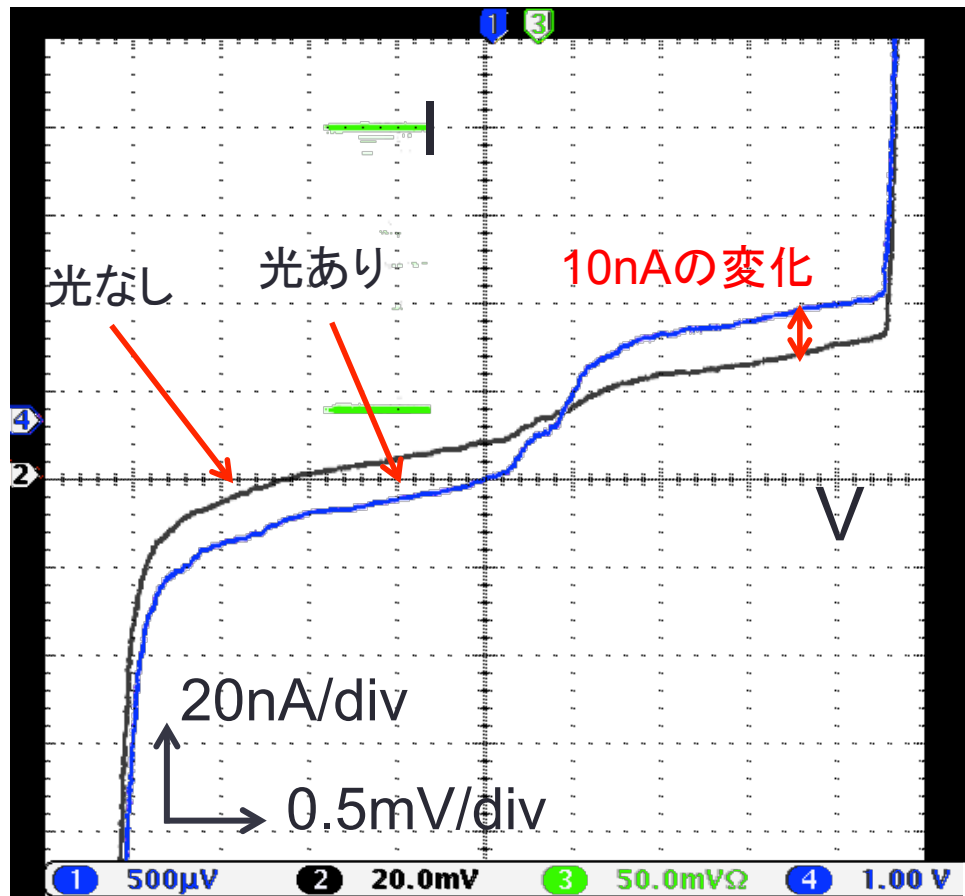
$$N_V = 0.93 \quad {}^{+0.19}_{-0.14}$$

4 μm^2 のSTJに2pulseの可視光(456nm)の光を照射した際のヒストグラム

➡ 1photon peakとペデスタルは0.4 σ 離れている

光照射時のIVカーブの変化

可視光(456nm)のパルス光を $4\mu\text{m}^2$ のSTJに20MHzで定常的に照射した際のIVカーブの変化



ここから1pulseあたりに発生する電荷量を推測すると

$$10\text{ nA}/20\text{ MHz} = 0.5 \times 10^{-15} \text{ C} = 3.1 \times 10^3 \text{ e}$$

1pulse当たり $3.1 \times 10^3 \text{ e}$ 程度の電荷が発生していると考えられる。

$G_{\text{Al}} = 6.7$ とした場合、1pulseあたり0.45photonがSTJに入射していることになる

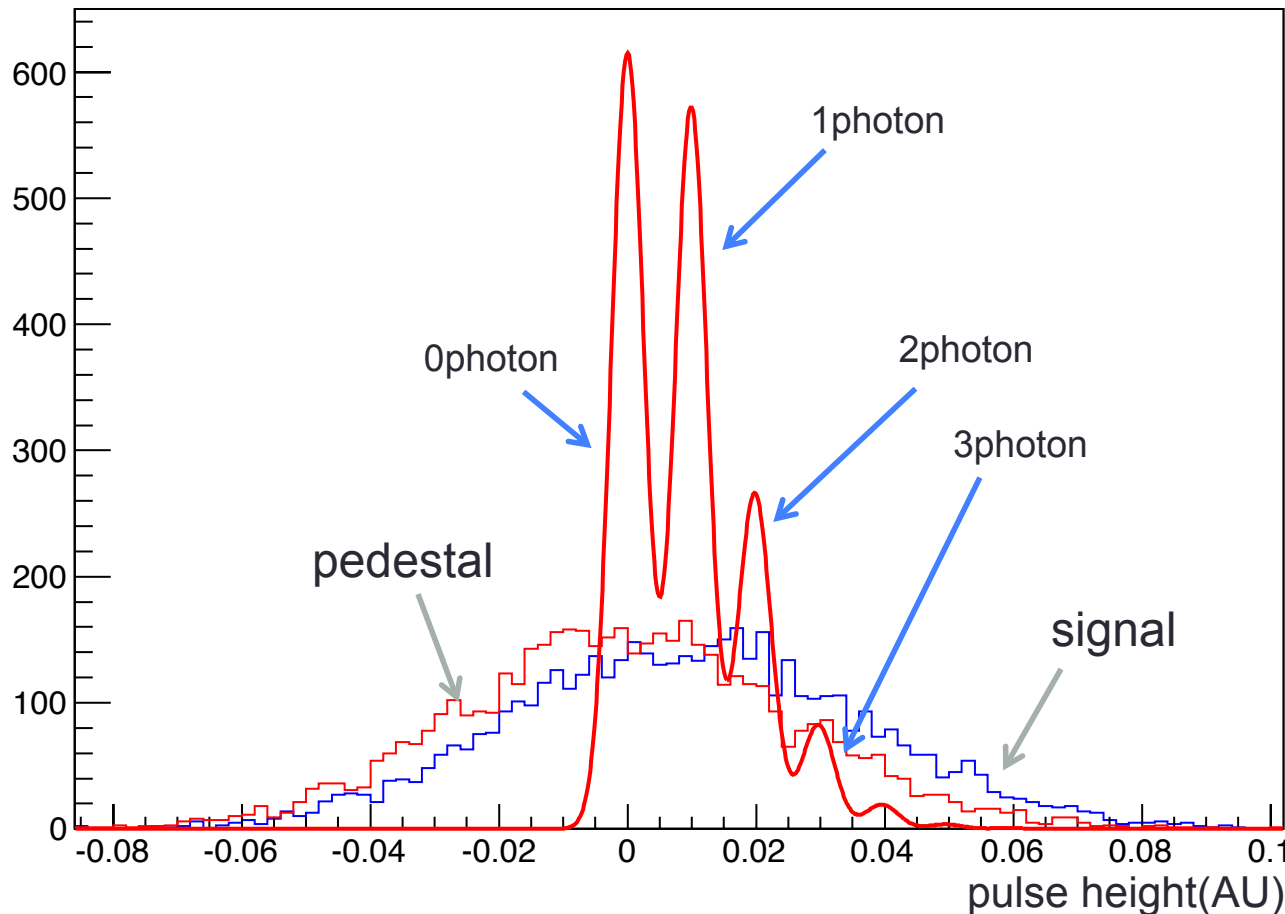
➡ $G_{\text{al}} = 6.7$ と求めることができた

光を当てる前と後では電流値が変化する

ノイズを軽減した際に予想される分布

ノイズを1/10にした場合の
$$f(x, \mu) = \frac{N_{obs}}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \sum_{n=0}^{10} \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!} \exp\left(-\frac{(x - n(M/\mu))^2}{2\sigma_p^2}\right)$$

event



ノイズを1/10まで軽減することができればペDESTALと1photon peakが4 σ 程度で分離できる(1photonが単体で検出できる)

➡ 1photonを単体で検出するためにはノイズの軽減が必要
低温アンプの導入が考えられる

Hf-STJ

2011年にHf-STJを作成に世界で初めて成功

ピクセルサイズが違うHf-STJを作成し、性能評価を行った



200 μm ×200 μm のHf-STJ
動作温度：T=80~177mK
I_c=60 μA Rd=0.2 Ω

100 μm ×100 μm のHf-STJ
動作温度：T=39~53mK
I_c=10 μA Rd=0.6 Ω

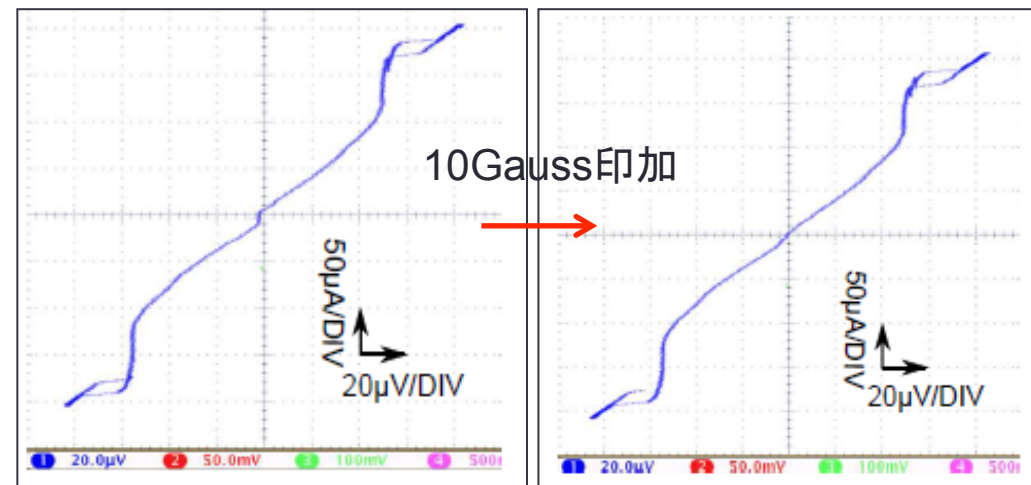
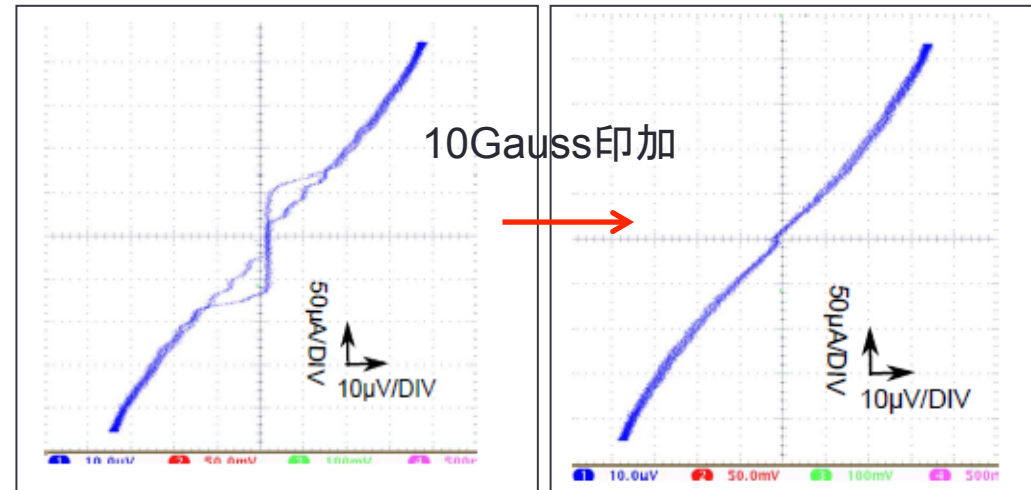
200 μm ×200 μm 、100 μm ×100 μm
どちらもSTJとしての動作を確認

ジャンクションサイズを小さくすることにより
リークカレントが30%に減少した

Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011

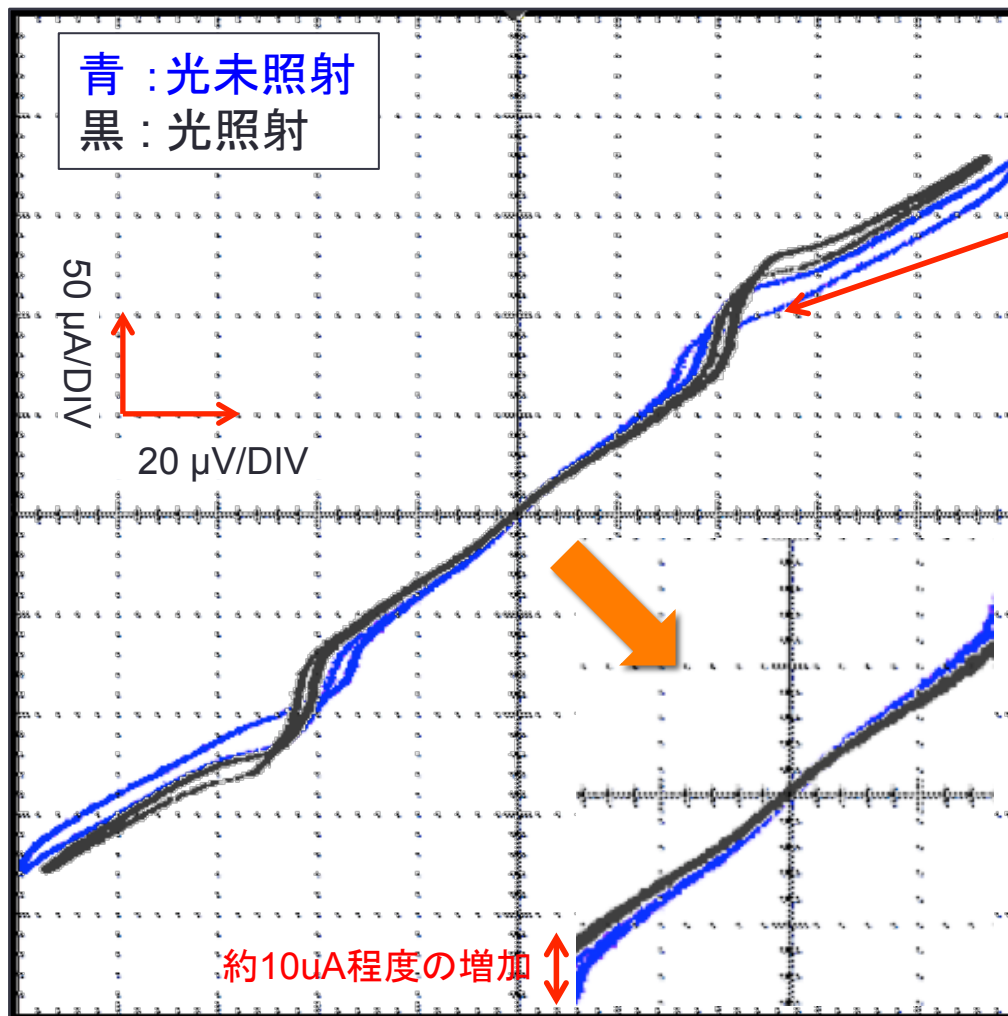
Development of superconducting tunnel junction photon detector using Hafnium

Shin-Hong Kim^{a,*}, Hyun-Sang Jeong^a, Kenji Kiuchi^a, Shinya Kanai^a,
Takashi Onjo^a, Ken-ichi Takemasa^a, Yuji Takeuchi^a, Hirokazu Ikeda^b,
Shuji Matsuura^b, Hiromi Sato^c, Masashi Hazumi^d, Soo-Bong Kim^e



Hf-STJの光応答



可視光(456nm)のパルス光をHf-STJに100kHzで定常的に照射した



光を照射したことにより電流が増加していることがわかる

光子による発生電荷量を概算すると
 $10\mu\text{A}/100\text{kHz} = 1.0 \times 10^{-10} \text{C/pulse}$
 $= 6.2 \times 10^8 \text{e/pulse}$

まとめ

- Nb/Al-STJに近赤外光と可視光を照射し、その信号の時間特性が私たちの実験に適していることを確認した
- 平均photon数1photon程度の可視光による信号を観測した。1photon peakとペデスタルとは 0.4σ 程度離れている。
 ノイズとペデスタルを 4σ 程度分離するためにはノイズを1/10程度にする必要がある
- 今後は測定系の低ノイズ化、1K程度で動作する低温アンプの導入などが考えられる。
 SOI-STJなどが候補としてあげられる。
- Hf-STJの作成に世界で初めて成功し、光に対する応答を確認した
今後詳細な測定を進めていく必要がある