

# 超伝導体を用いた放射線検出器

理化学研究所 延與放射線研究室 佐藤広海

共同研究者

理研 三島賢二、大野雅史、有吉誠一郎、滝澤慶之、大谷知行

KEK 清水裕彦

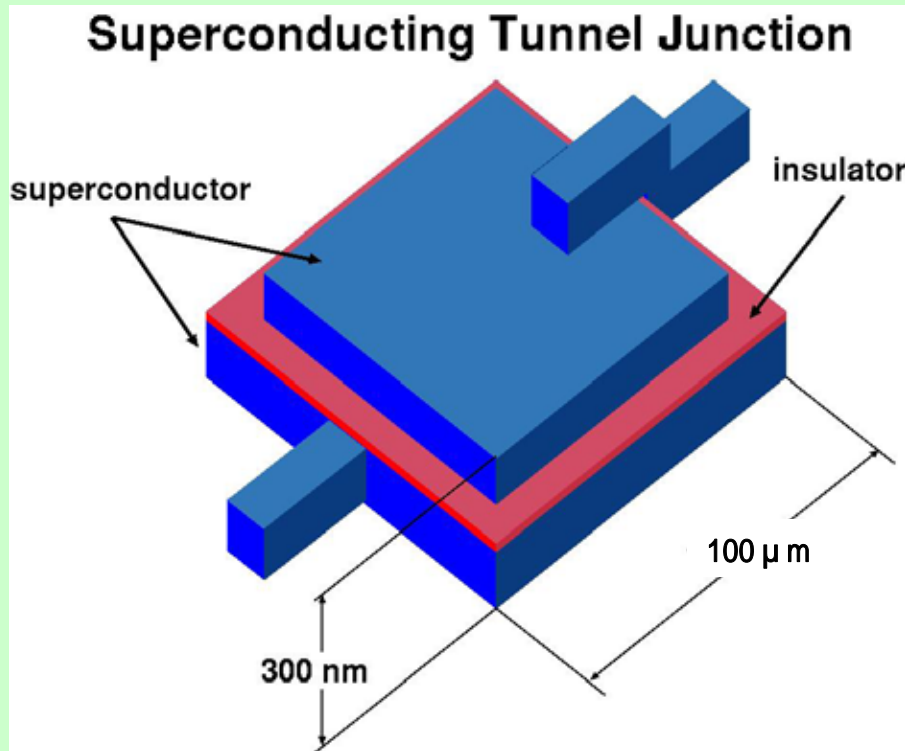
大阪電通大 倉門雅彦、志岐成友

埼玉大 高田進、明連広昭、田井野徹

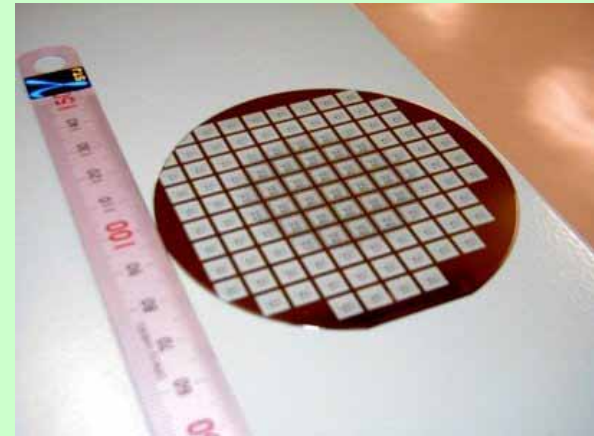
超伝導トンネル接合素子 (STJ)  
の開発と評価を中心に

# STJの構造

超伝導膜 / 絶縁膜 / 超伝導膜 という構造の、  
ジョセフソン素子の一種



	Z	転移温度(K)	ギャップエネルギー(meV)
Al	13	1.20	0.34
Nb	41	9.23	3.1
Ta	73	4.48	1.4



# STJの作製

クリーンルーム

STJ作製専用  
プロセス装置  
群を所有

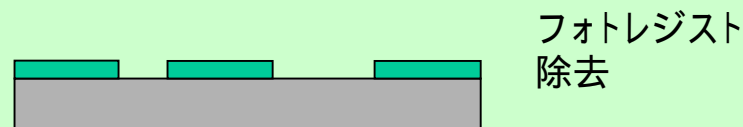
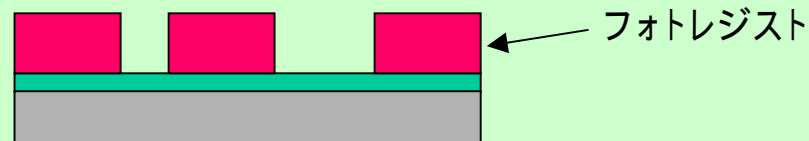
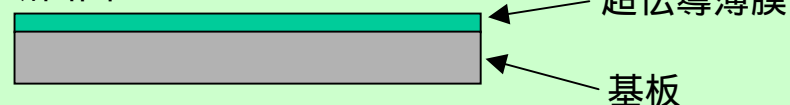


→ 基板に薄膜をスパッタによって成膜

↓  
フォトリソグラフィによるパターン形成

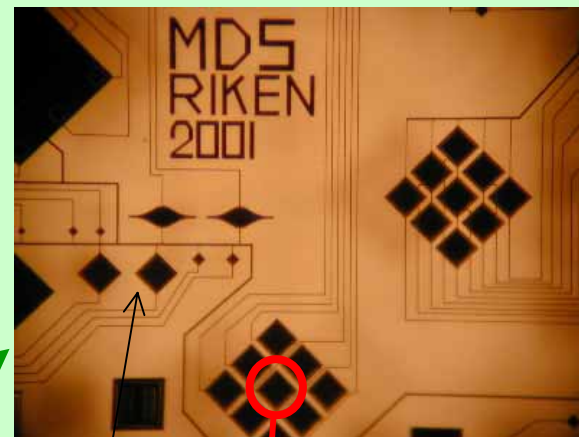
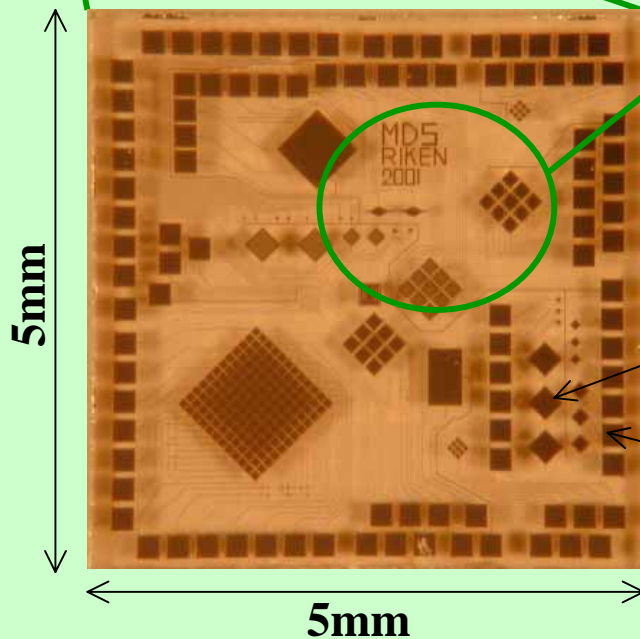
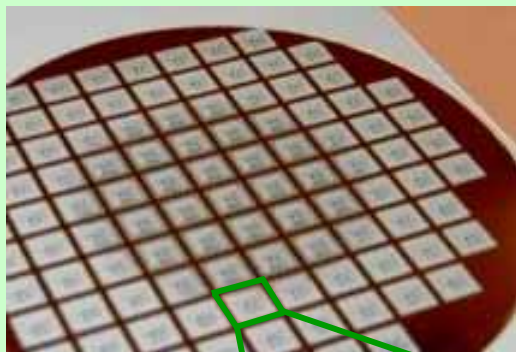
↓  
ドライエッチングによる薄膜の加工

断面図



# チップの例

3inch サファイア基板

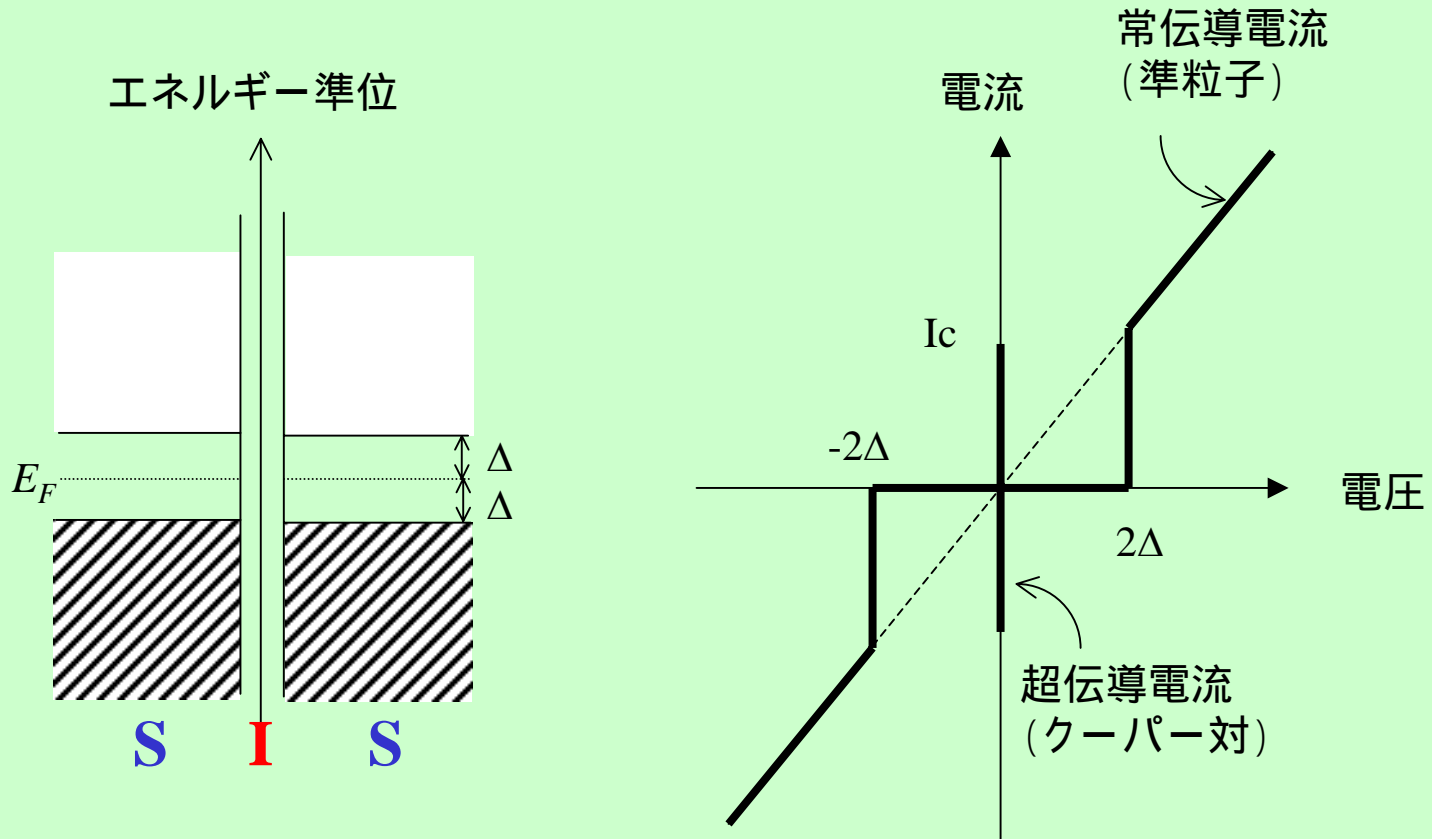


100 $\mu$ m x 100 $\mu$ m

**STJ** (検出器となる部分)

PAD

# 電流－電圧特性



# 放射線検出器としての動作原理

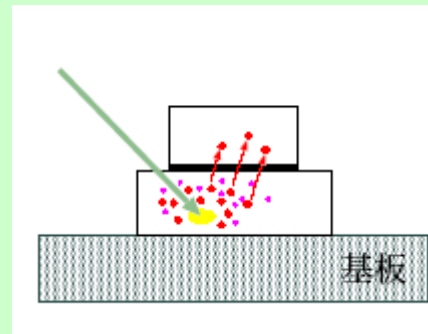
放射線からのエネルギーの付与

超伝導体中のクーパー対を解離

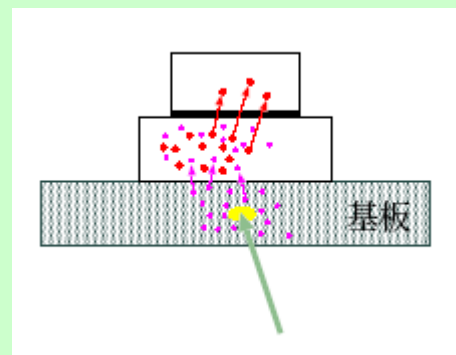
発生した準粒子(電子)がトンネル効果でもう一方の超伝導体電極へ

信号

直接吸収型



基板吸収型



動作条件

温度: 転移温度のおよそ1/10

磁場: ~ 100G

# STJの特徴

Charge carrier : **クーパー対の解離**によって発生した準粒子(電子)

解離エネルギー  $(1.7\Delta) = 2.6 \text{ meV @ Nb}$

$$\text{FWHM} = 2.35 \sqrt{(1.7\Delta) F E} = 4.3 \text{ eV @ } 5.9 \text{ keV}$$

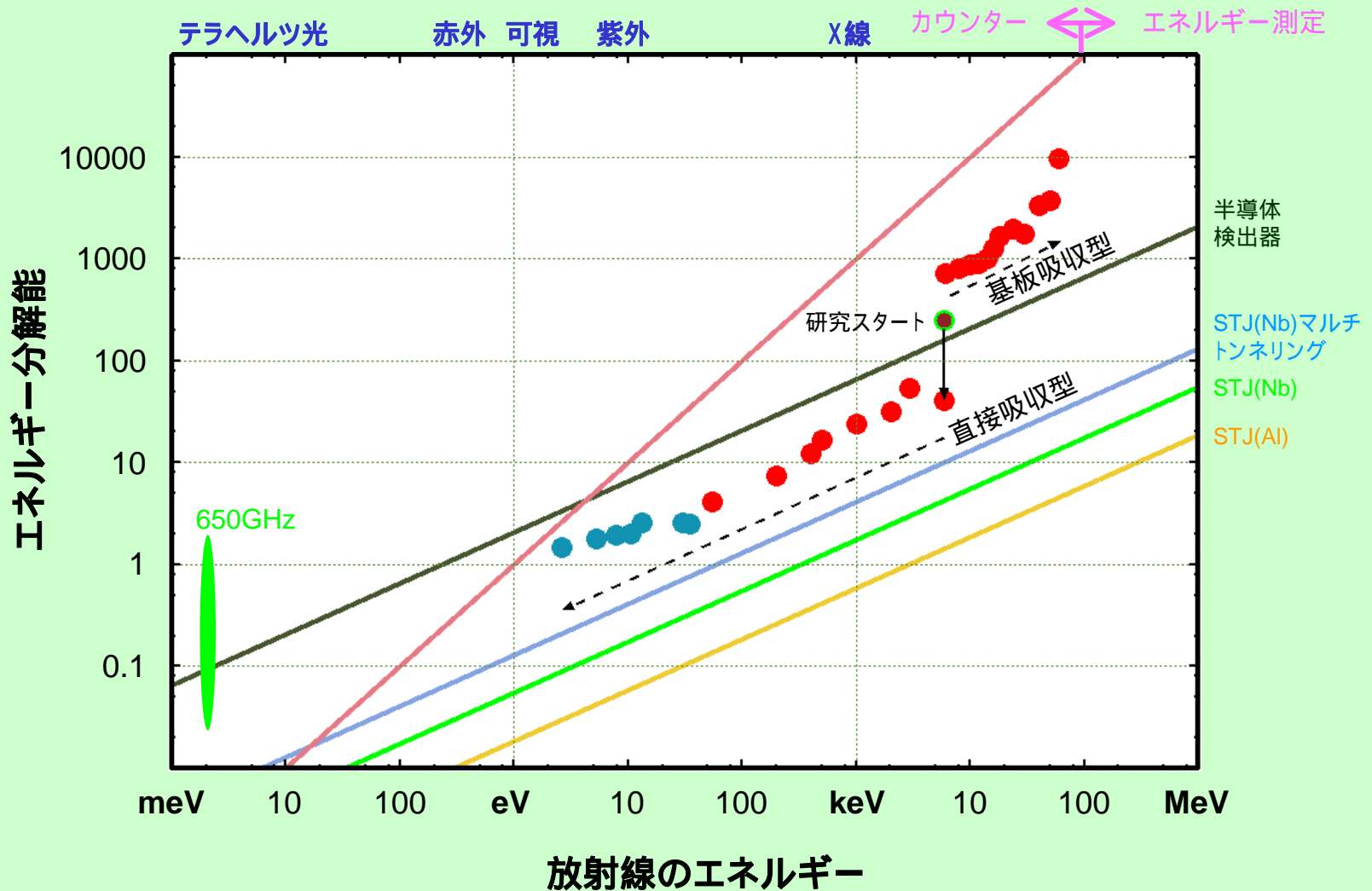
Fano factor (0.22)      Energy

→ **優れたエネルギー分解能**

電極構造自体が放射線を検出 : **不感層がない**

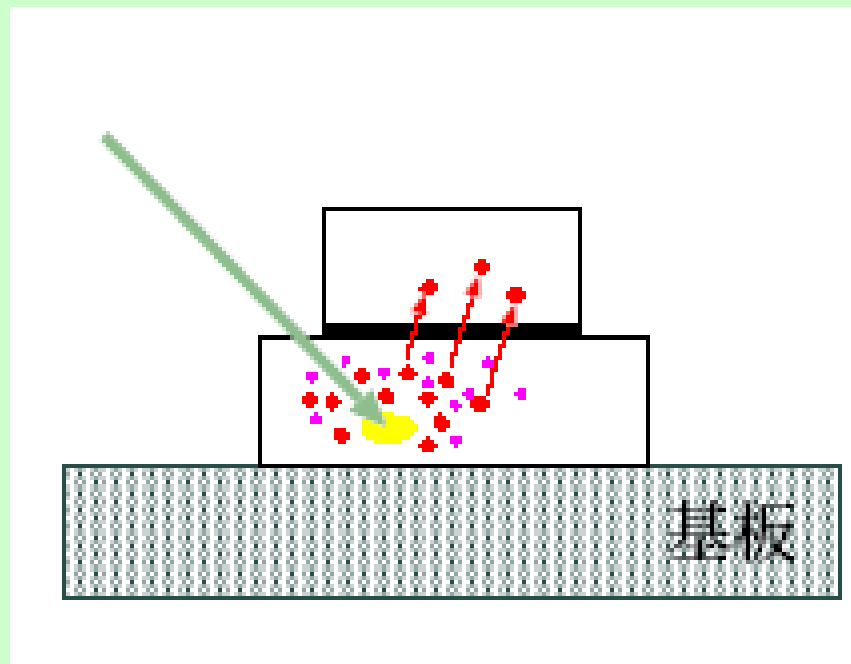
→ **低エネルギー粒子のエネルギー測定が可能**

# エネルギー分解能比較





# 直接吸収型による検出



# 素子構造の工夫

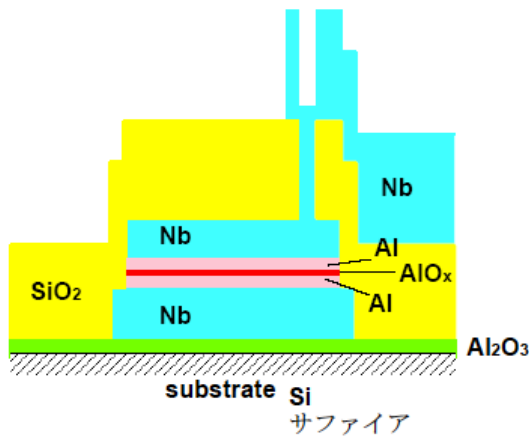
作成している素子の構造

Nb/Al-AIO<sub>x</sub>/Nb

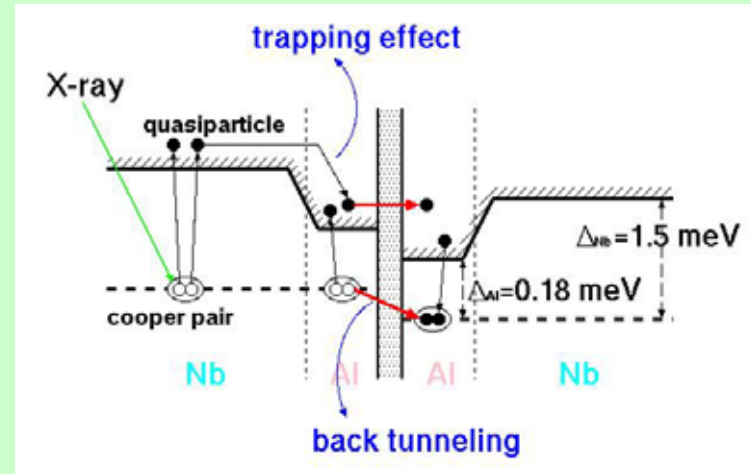


Nb/Al/AIO<sub>x</sub>/Al/Nb

Al トラッピング層を持った素子構造



エネルギーギャップ Nb : 3.1meV  
Al : 0.34meV

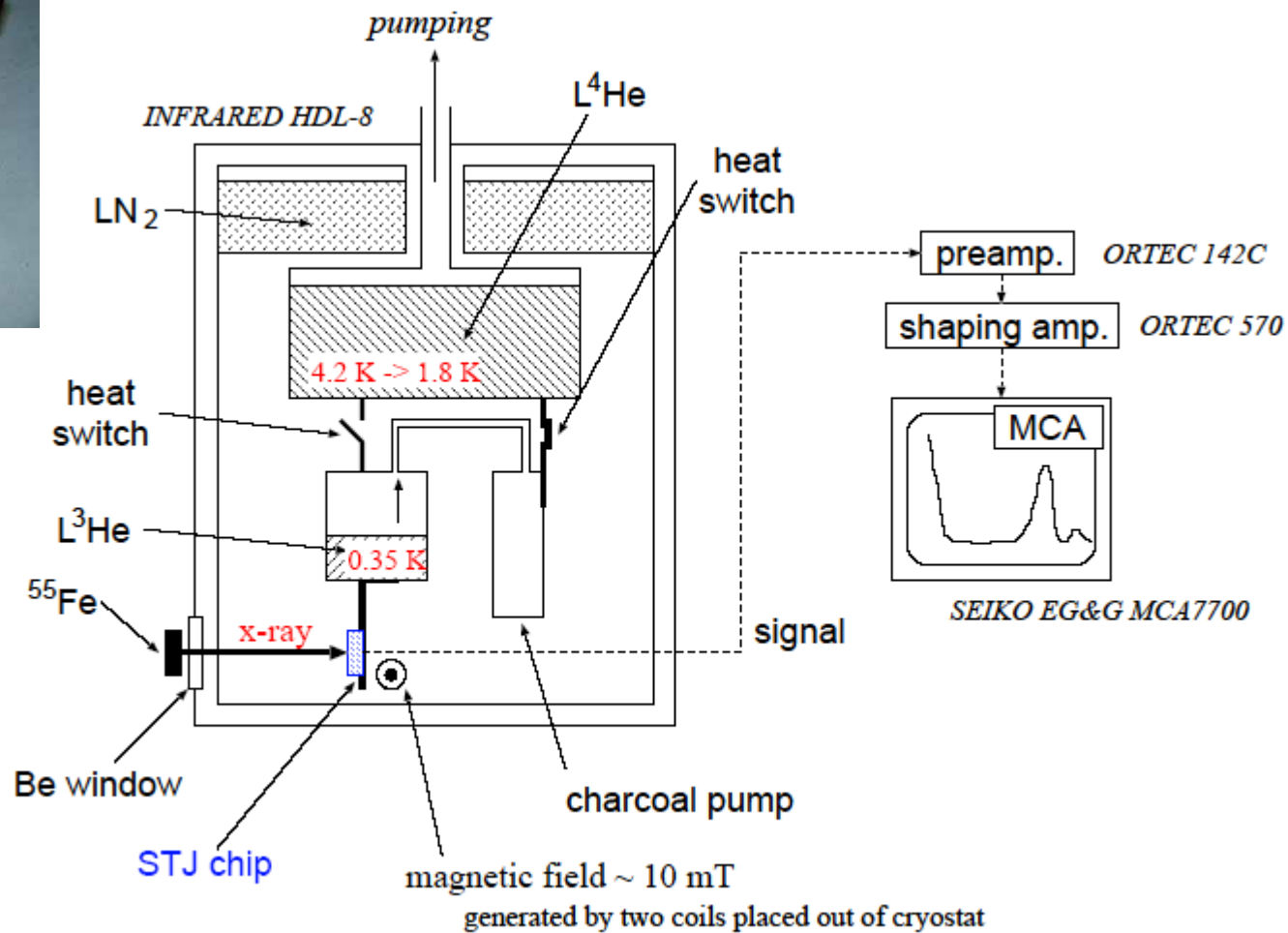


Nbよりもエネルギーギャップの小さいAlをトンネル障壁の上下に成膜することで、準粒子を障壁近傍に“トラップ”する。

➡ 10倍程度の信号の増幅

➡ S/N比の向上

# 素子性能評価実験

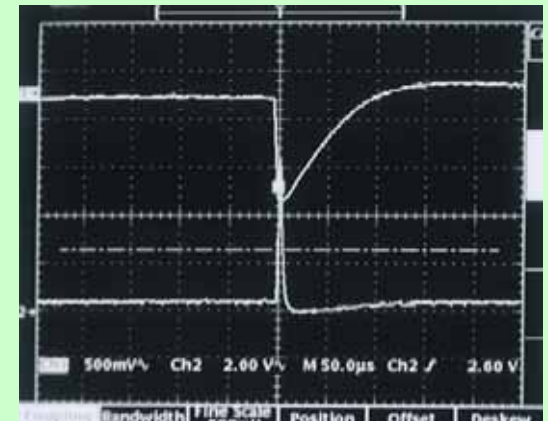
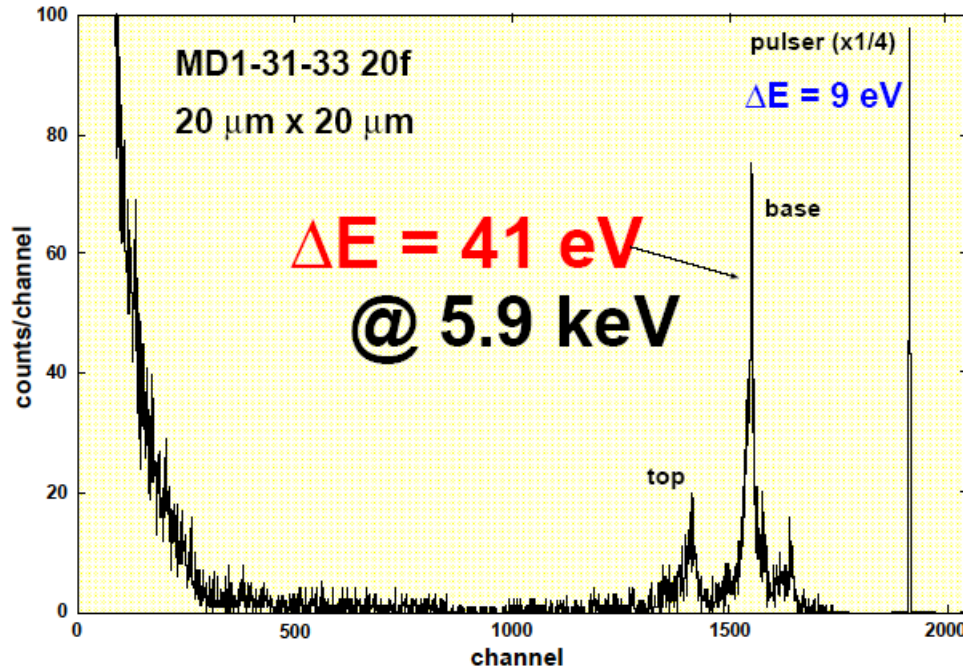


# X線の検出

$^{55}\text{Fe}$  X線源使用

Nb/Al/AlO<sub>x</sub>/Al/Nb

## 5.9 keV X線のスペクトル

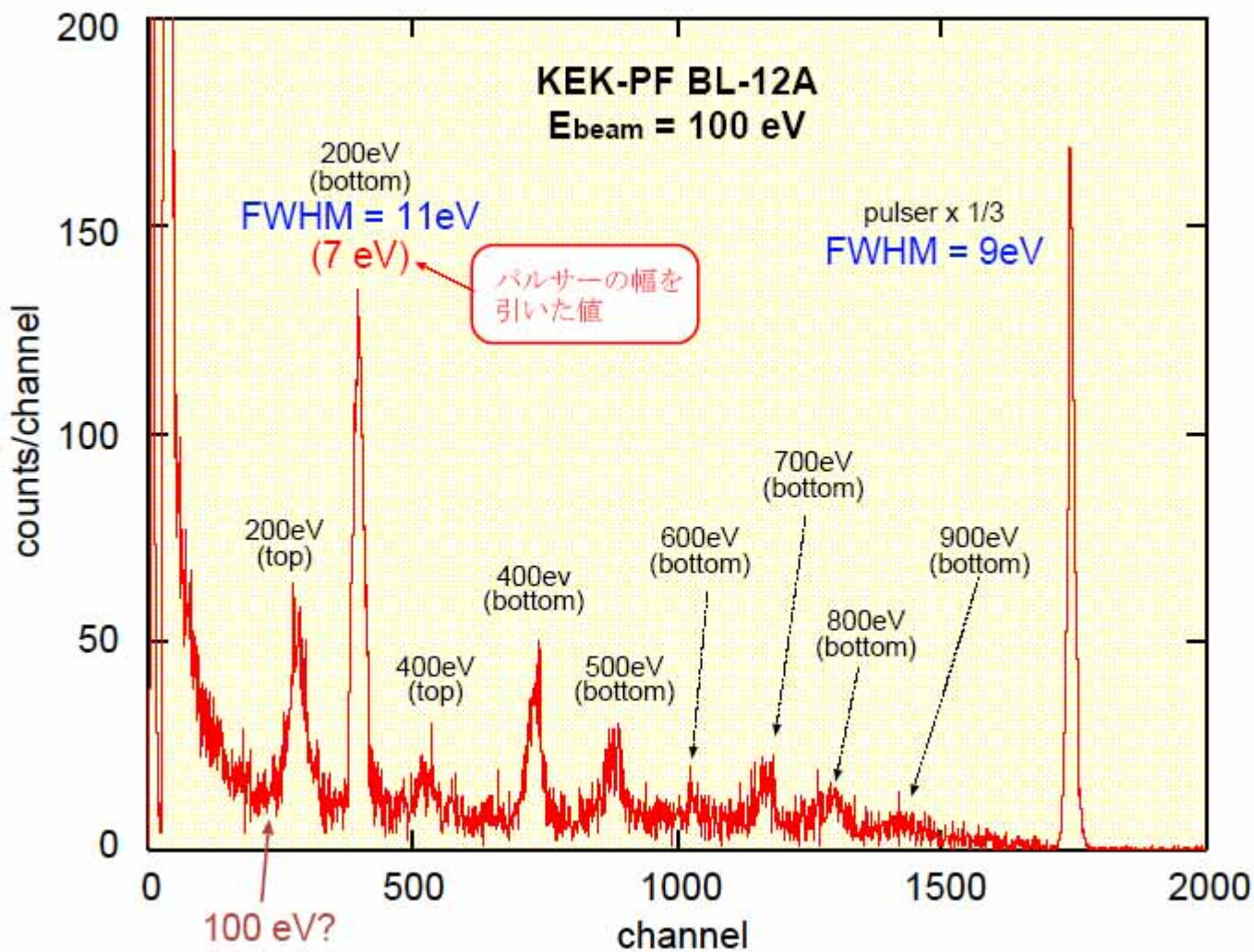


## ダブルピーク

上部・下部で吸収された信号の両方がピークをつくるため、ひとつのエネルギーに対して2本のピークが現れる

H.Sato et al., Jpn. J. Appl. Phys. 39 (2000) p5090

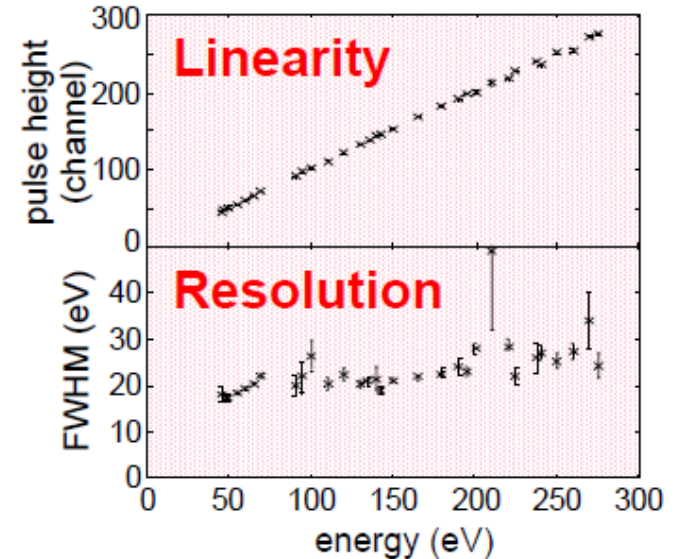
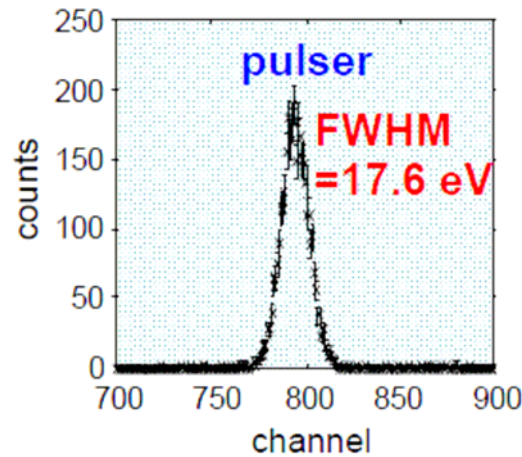
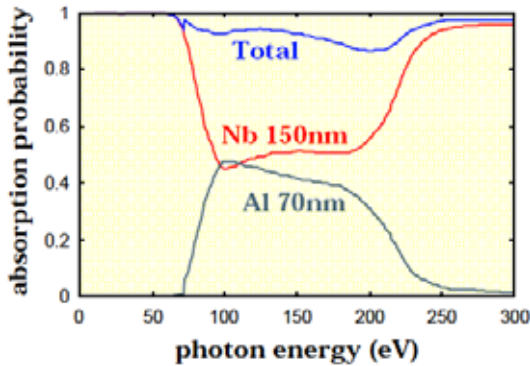
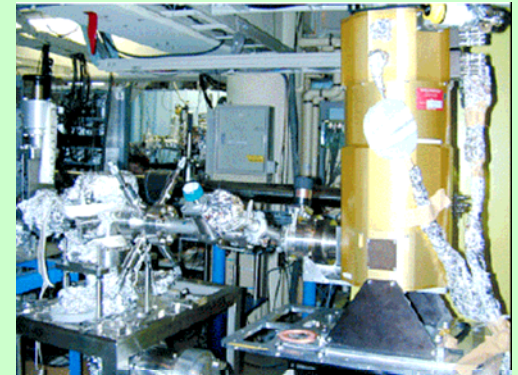
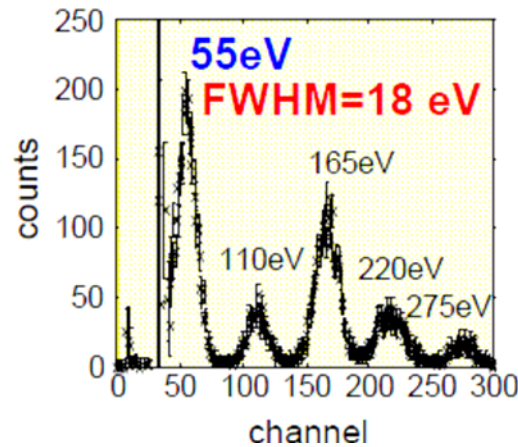
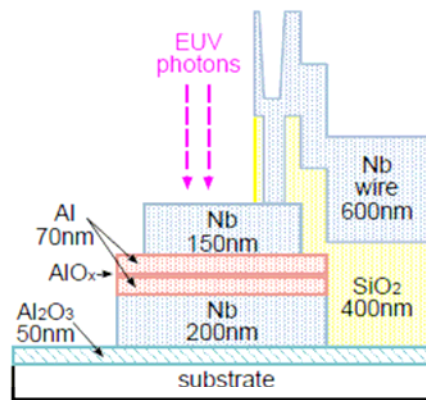
# 軟X線の検出



# 極端紫外線の検出

(KEK-PF BL-12A)

Nb / Al / AlO<sub>x</sub> / Al / Nb



>90% of photons are absorbed by top layer.

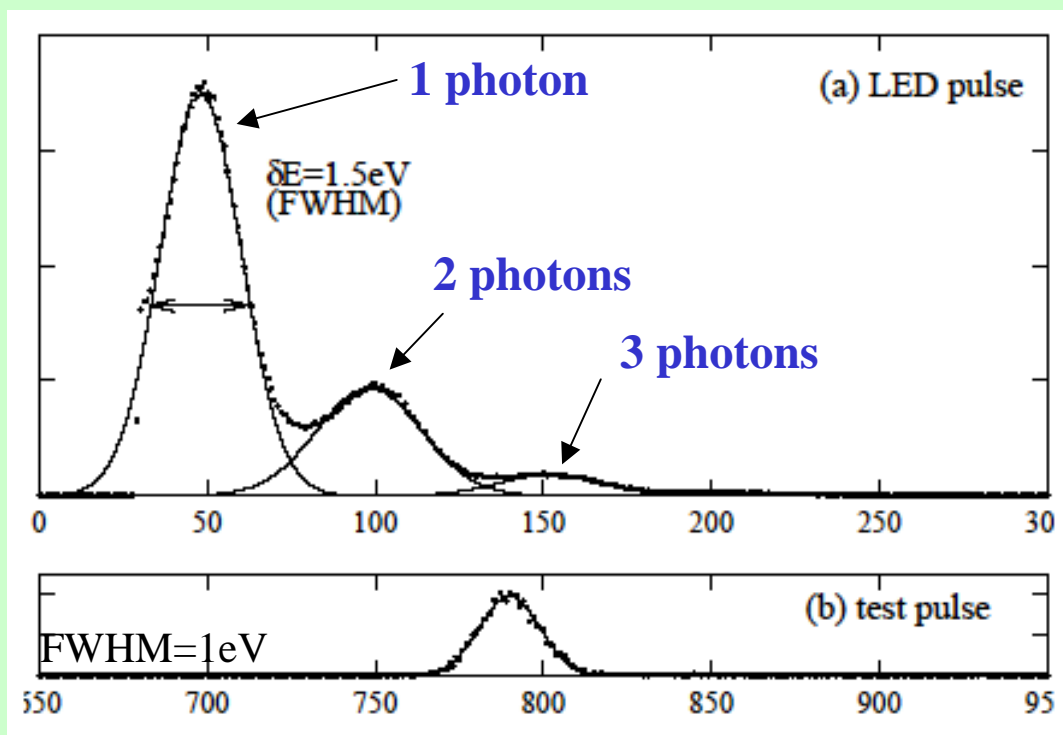
C.Otani et al., Physica C 372-376 (2002) p399



# 可視光の検出

フォトダイオードからの可視光をSTJに照射

**FWHM=1.5eV@2.64eV (470nm)**



S.Shiki et al., Nucl. Instr. Meth. A520 (2004) p530

S.Shiki et al., Publ. Astron. Soc. Japan 56 (2004) L19

# 低エネルギー陽子検出

$$dN \propto \left[ 1 + a \frac{\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{p}_{\bar{\nu}}}{E_e \cdot E_{\bar{\nu}}} + \frac{\mathbf{J}}{J} \cdot \left( A \frac{\mathbf{p}_e}{E_e} + B \frac{\mathbf{p}_{\bar{\nu}}}{E_{\bar{\nu}}} + D \frac{\mathbf{p}_e \times \mathbf{p}_{\bar{\nu}}}{E_e E_{\bar{\nu}}} \right) + \dots \right]$$

無偏極中性子を使用 (J=0)

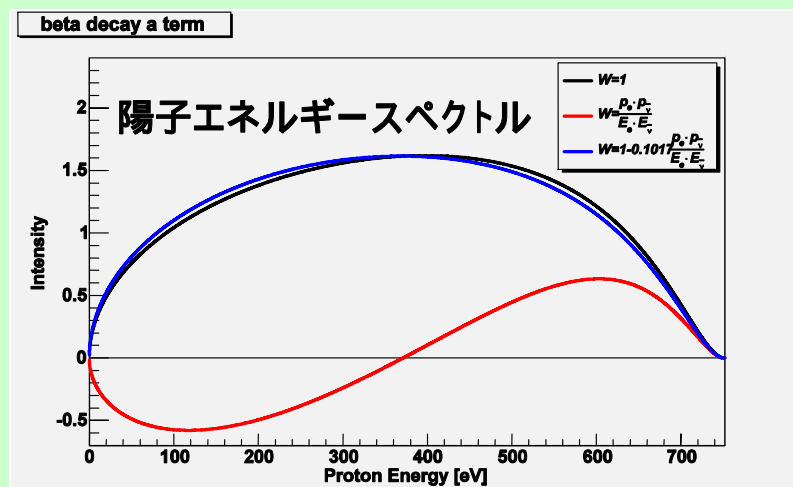
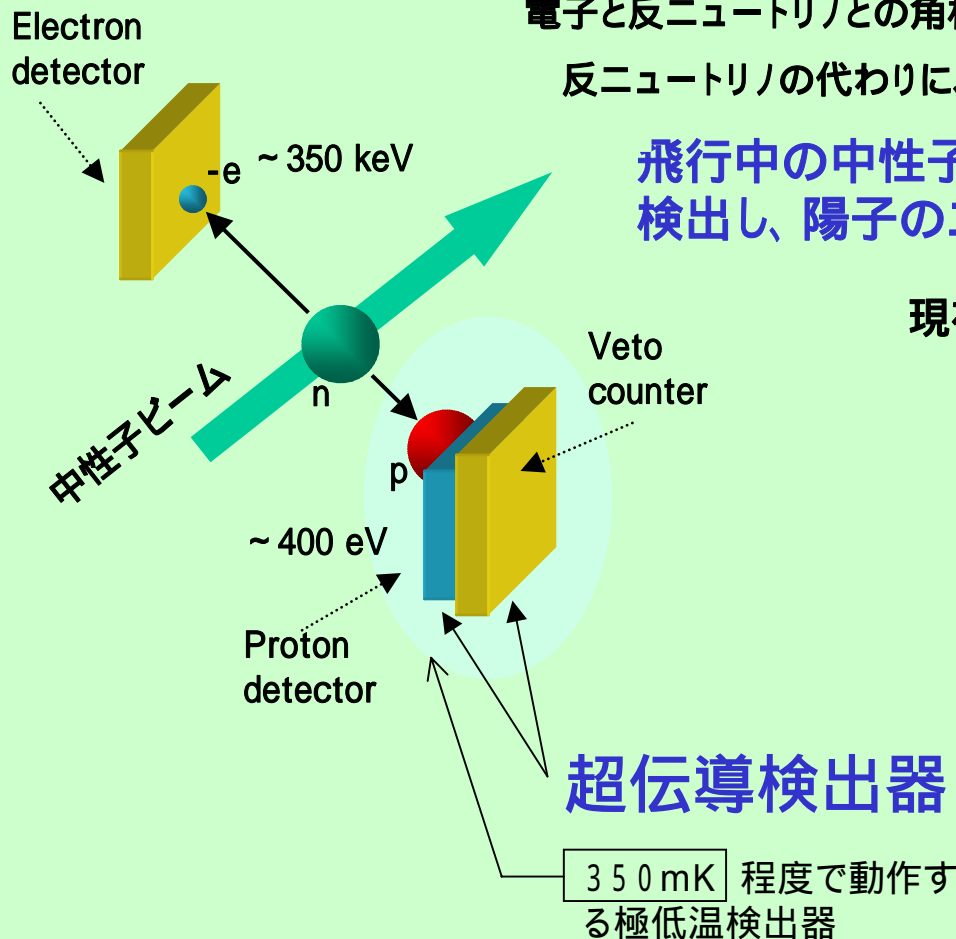
電子と反ニュートリノとの角相関項

反ニュートリノの代わりに、反跳陽子を測定

飛行中の中性子が崩壊した際に生じる陽子と電子を検出し、陽子のエネルギースペクトルを得る

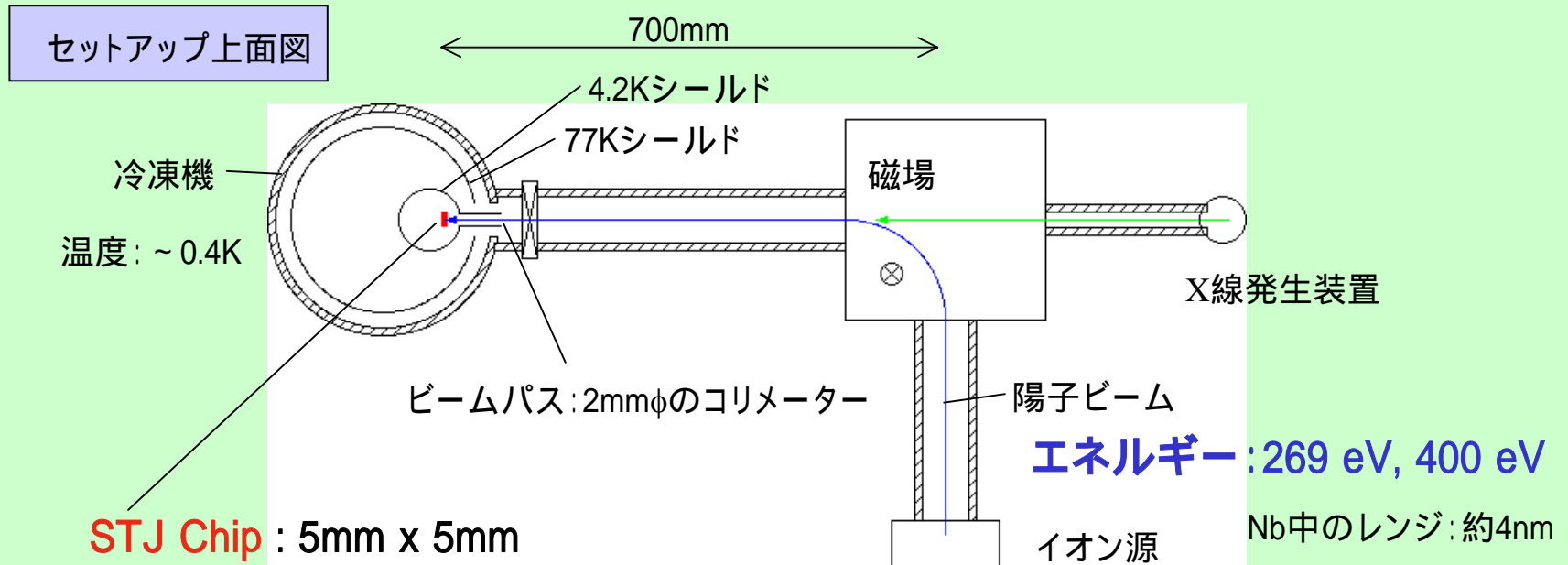
現在の測定値  $a = -0.103 \pm 0.004$

PDGの平均値





# 準備実験セットアップ

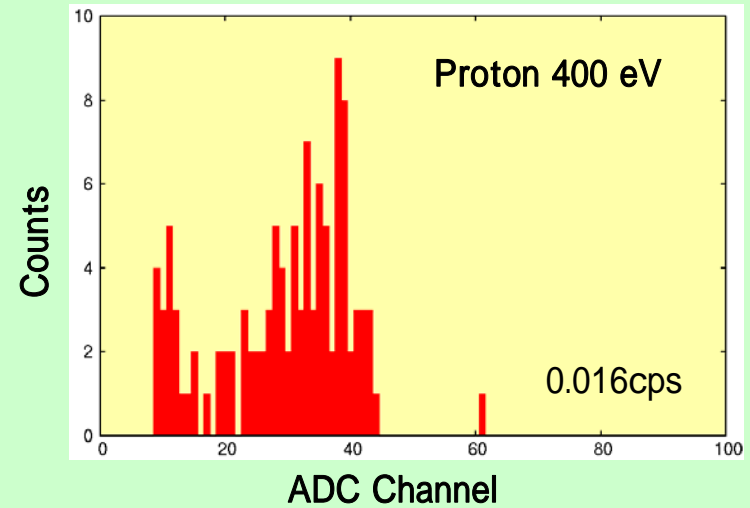
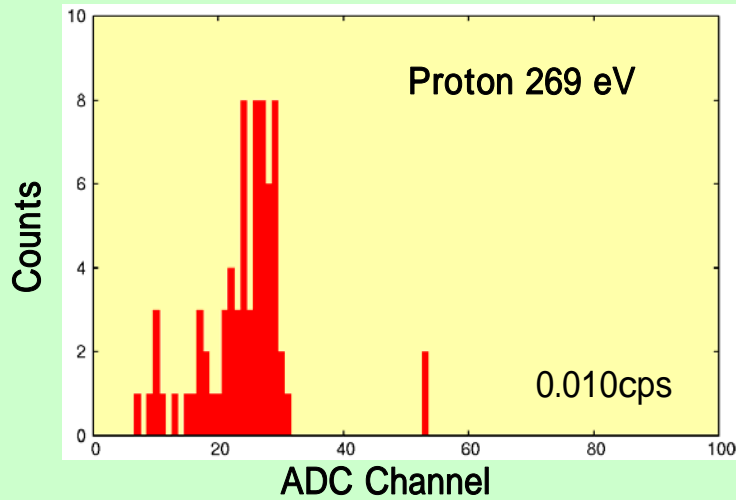


STJの構造: Nb(150nm)/Al(75nm)/AlOx/Al(75nm)/Nb(150nm)

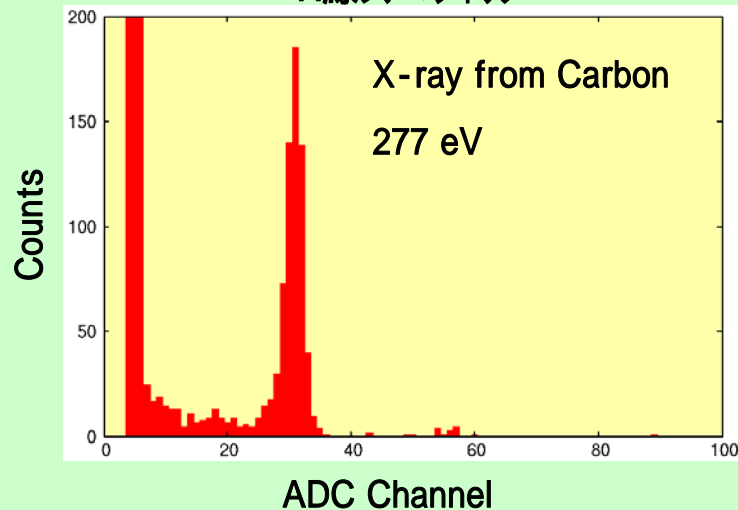
STJの大きさ: 50 $\mu$ m x 50 $\mu$ m

# スペクトル

それぞれ2時間の測定によって得られたスペクトル

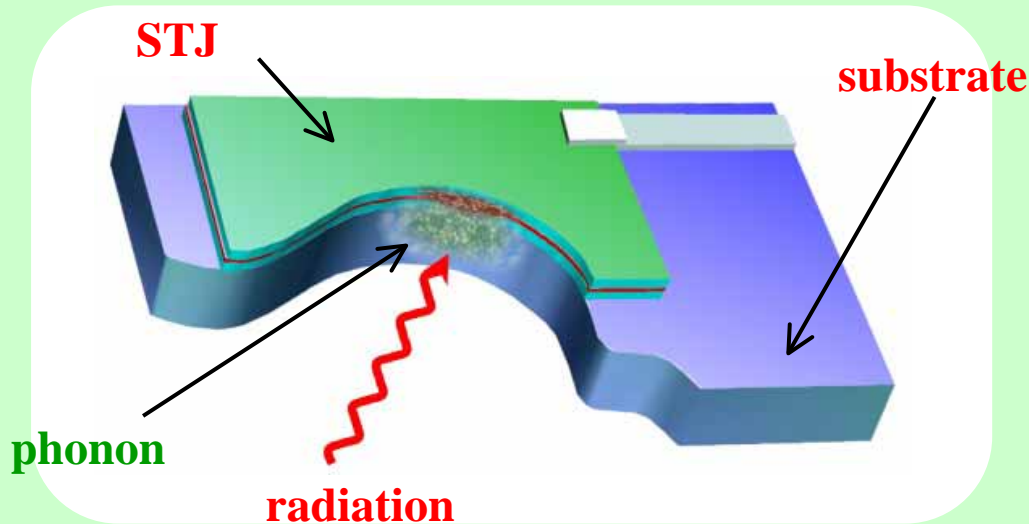


X線スペクトル



まだ分解能を議論するまでには至らないが、STJの「不感層が無い」という特徴を活かした、低エネルギー陽子のエネルギー検出に成功

# 基板吸収型による検出



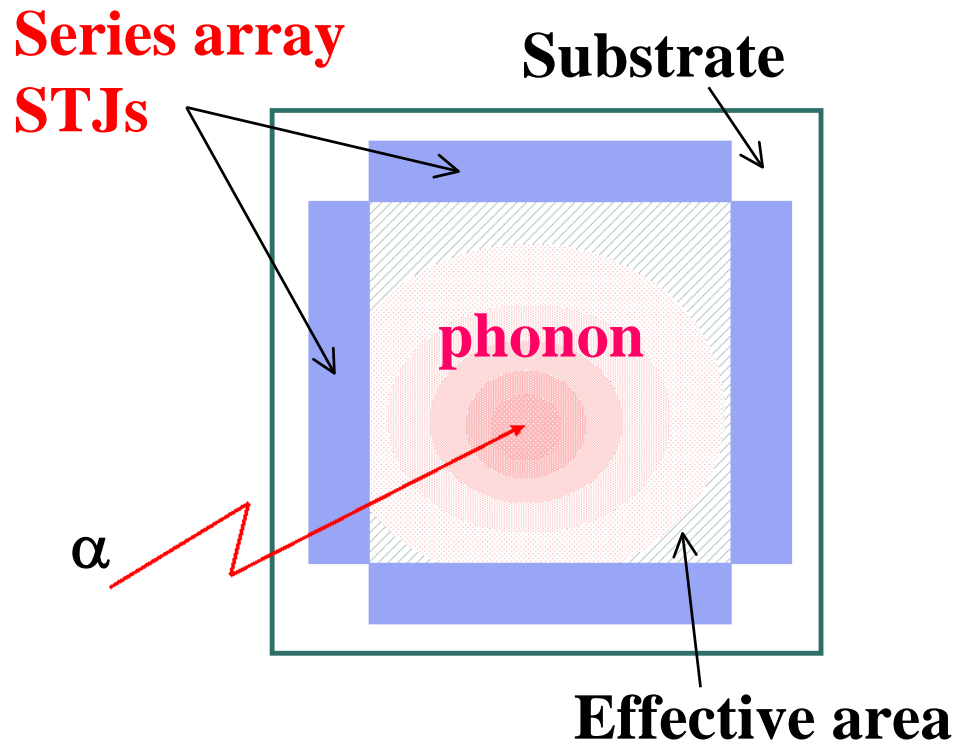
高い吸収効率

シングルピーク

広い検出領域

が実現可能

# 直列接合素子を用いた検出



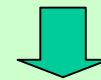
**$\alpha$ -particles are absorbed by substrate.**



**Phonons are created.**



**Phonons are detected by four series array STJs.**



**Signals from for series arrays are summed.**

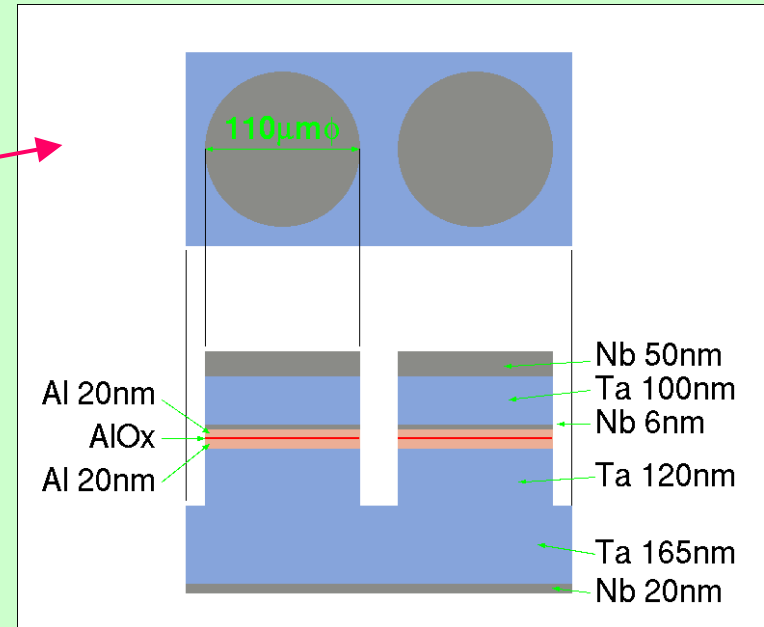
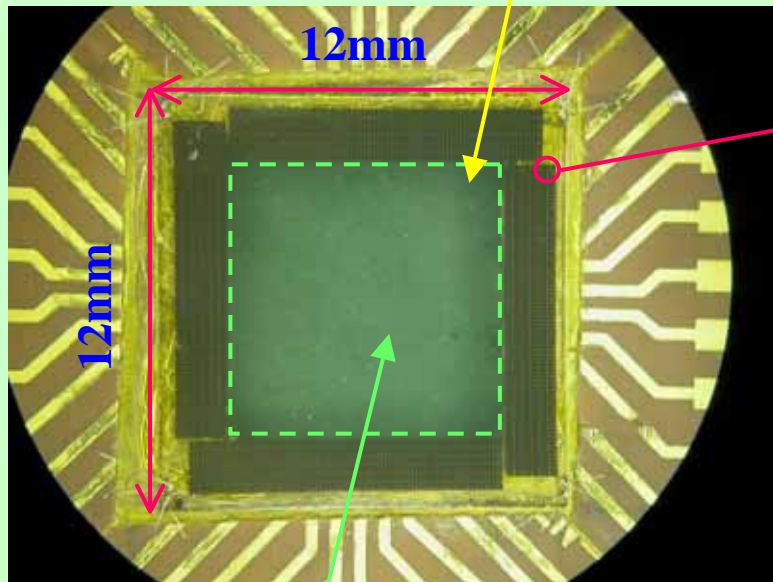


**Full energy peak of  $\alpha$ -particles are obtained.**

M. Kurakado et al., Proc. SPIE 1743 (1992) 351.

# 線テスト用直列接合素子

Sapphire substrate

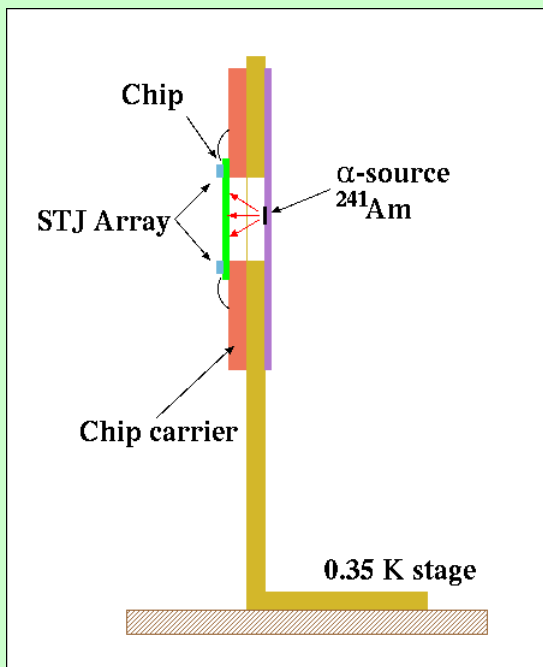
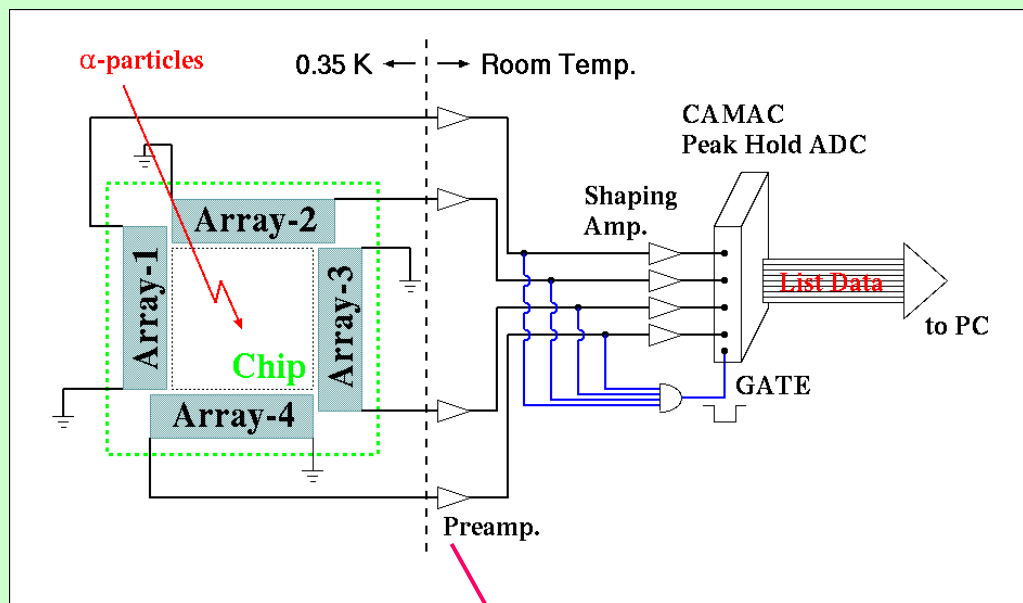
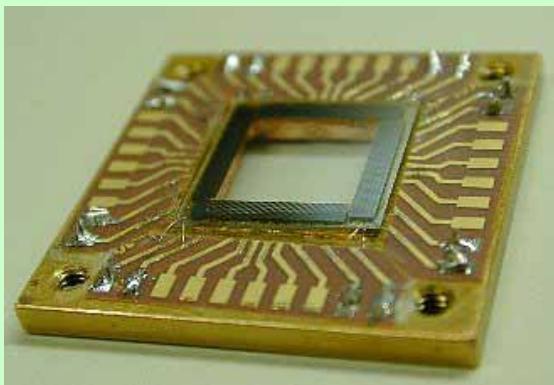


Effective area: 8mm x 8mm

288 series x 3 parallel x 4 arrays  
= 3456 STJs

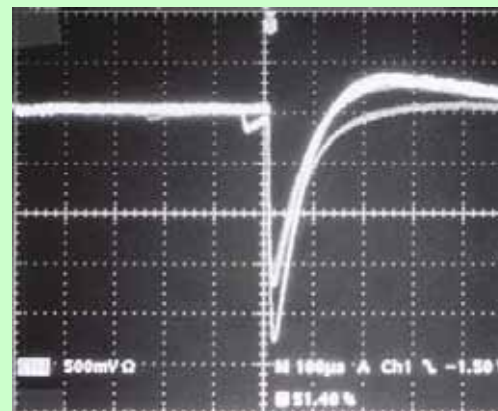
# 評価実験のセットアップ

## Data acquisition process



## Preamp. Signal (Array-4)

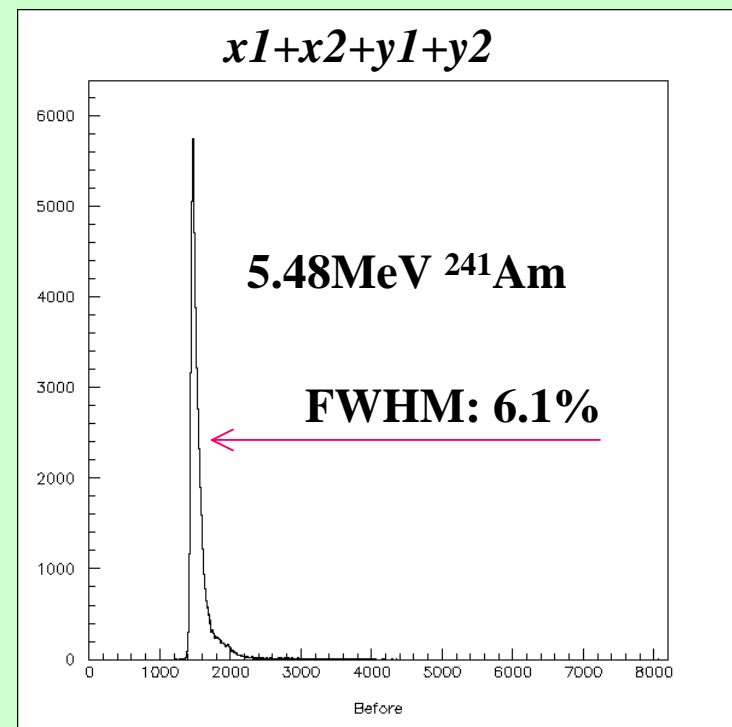
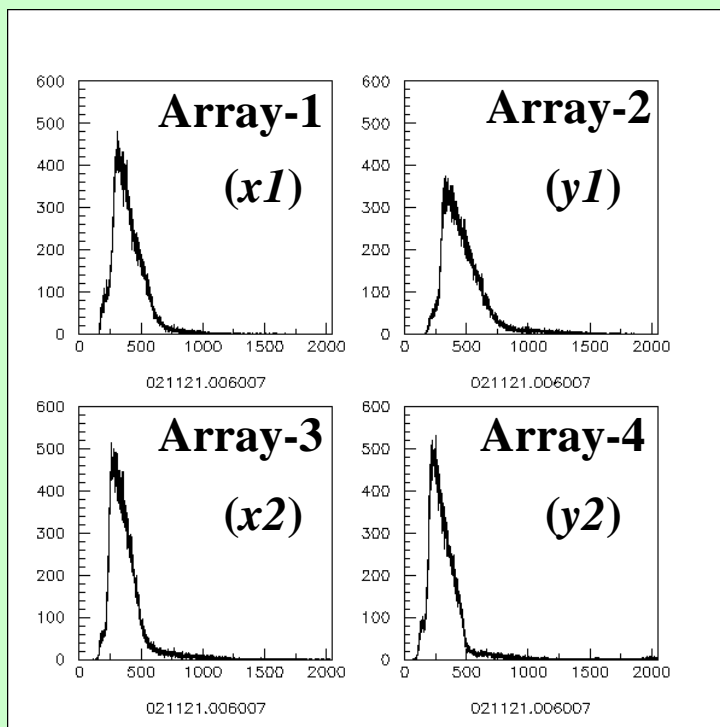
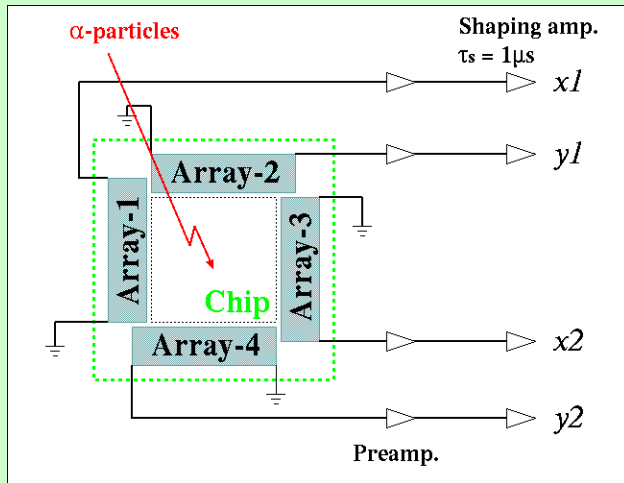
500mV/div.



100μs/div.

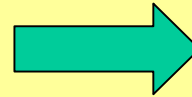
# エネルギースペクトル

Sum of 4 arrays  
(Coincident events)

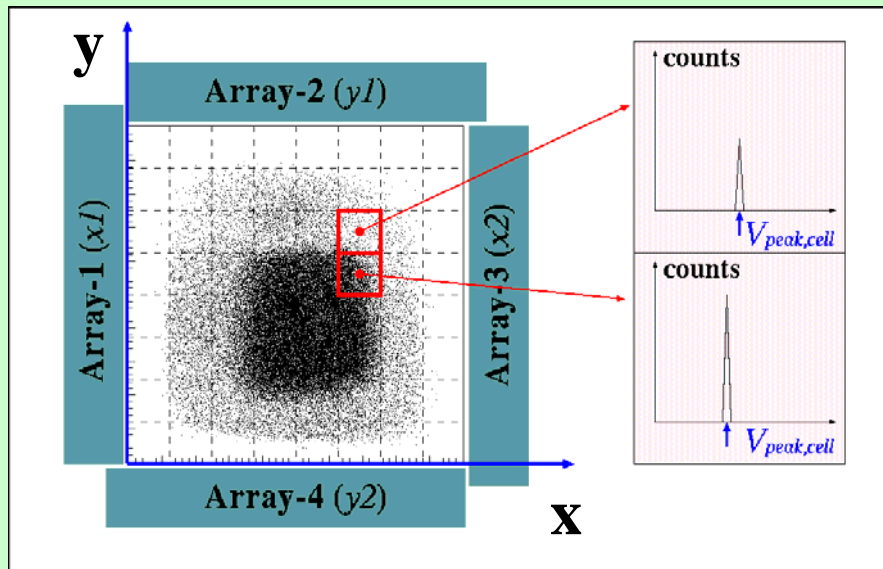


# 位置補正解析

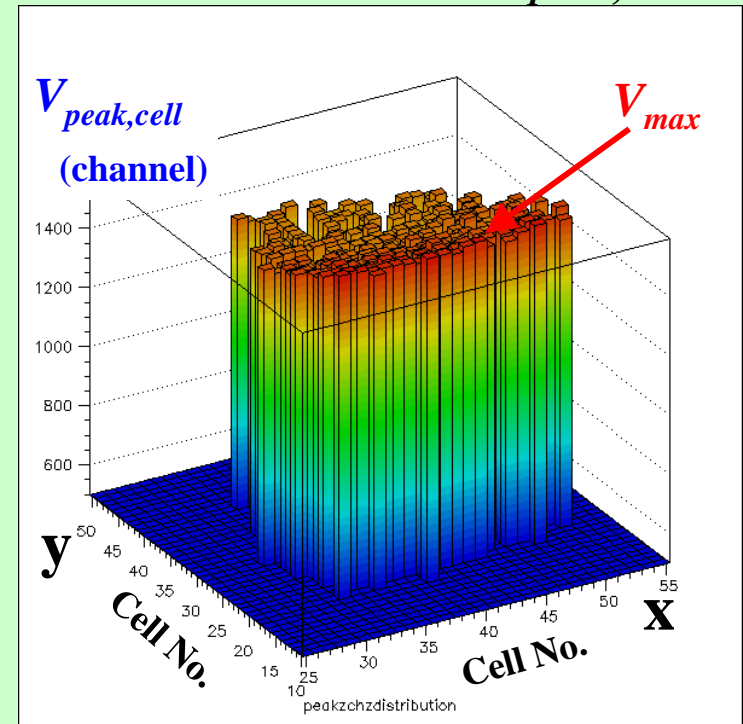
Position dependence of the pulse height



Broaden the peak width



Distribution of  $V_{peak,cell}$



$$x = \frac{x2}{x1+x2} \quad y = \frac{y1}{y1+y2}$$

Correction coefficient

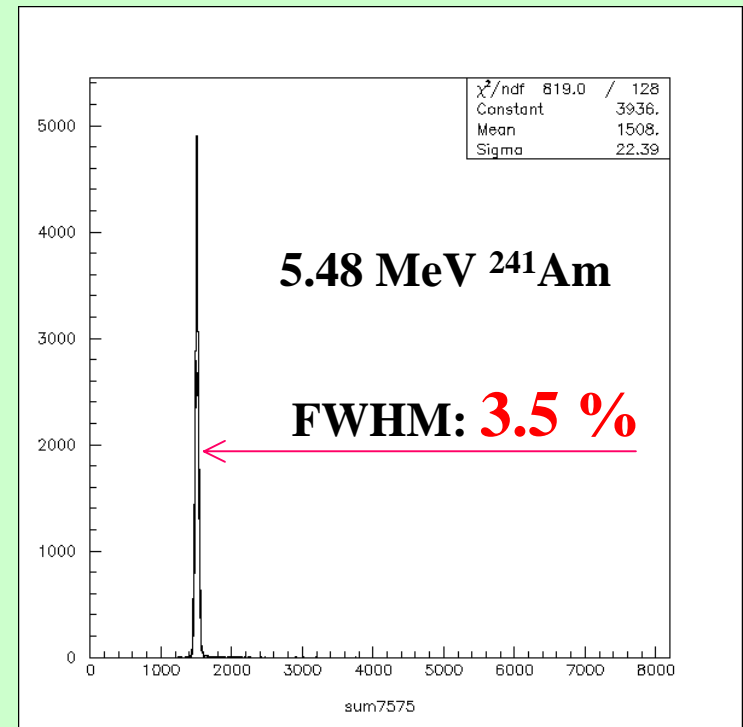
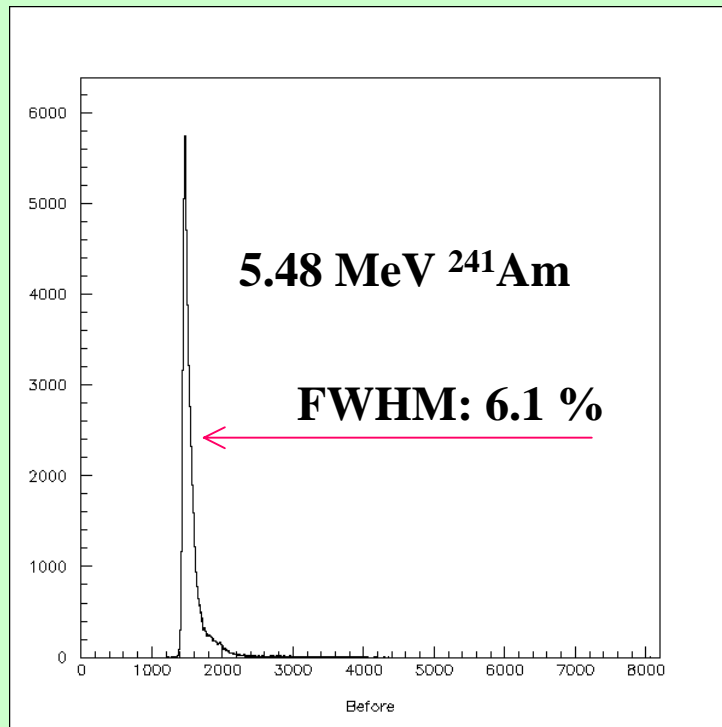
$$R = V_{max} / V_{peak,cell}$$



# 位置補正解析の効果

Before

After

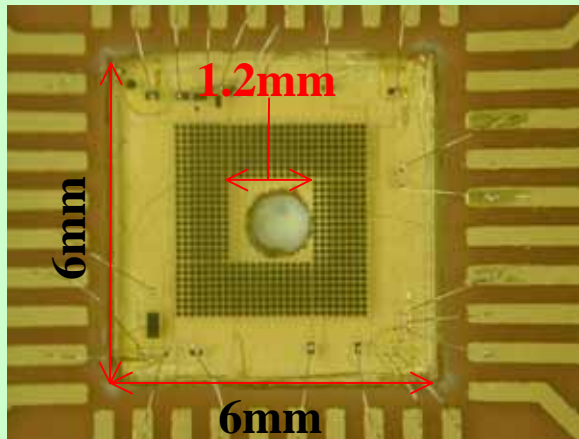


Correction condition

Segmentation : 75 x 75 cells

Events in one cell > 100 events

# 別のチップデザインの場合

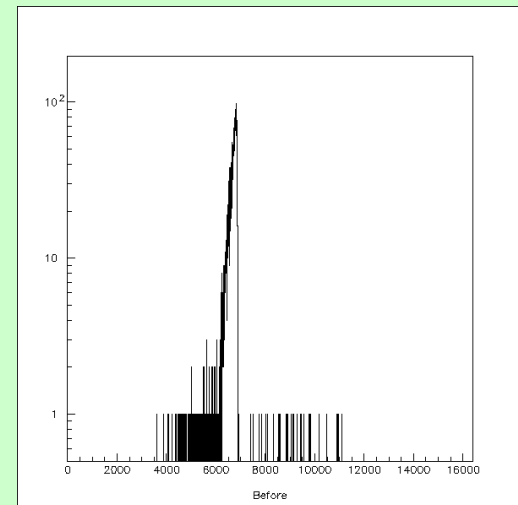


$\phi 100\mu\text{m}$ -JJ x 40 series x 4 parallel  
x 4 arrays

Nb	150nm
Al	70nm
AlO <sub>x</sub>	
Al	70nm
Nb	200nm

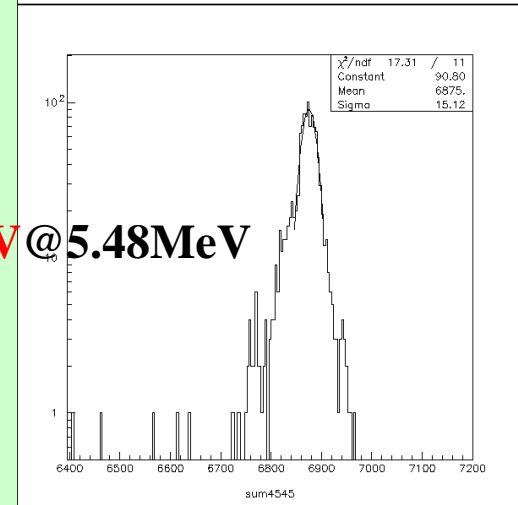
Sapphire substrate

Before  
correction

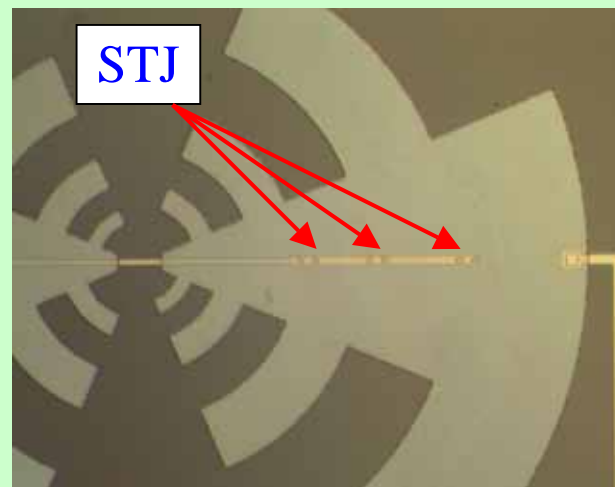
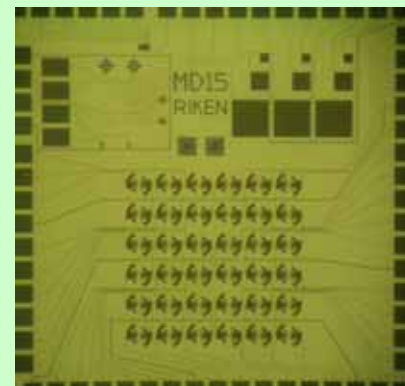
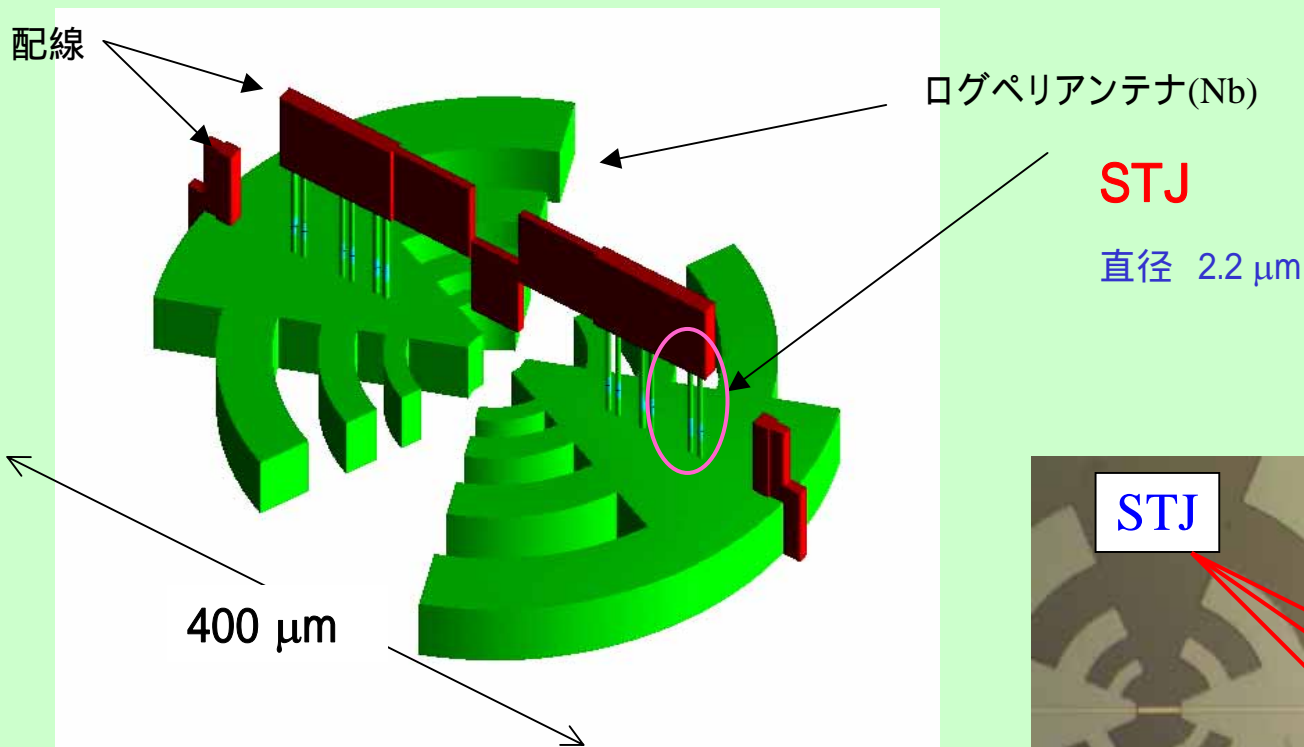


After  
correction

$\Delta E = 28\text{keV} @ 5.48\text{MeV}$   
(0.52%)



# テラヘルツイメージング

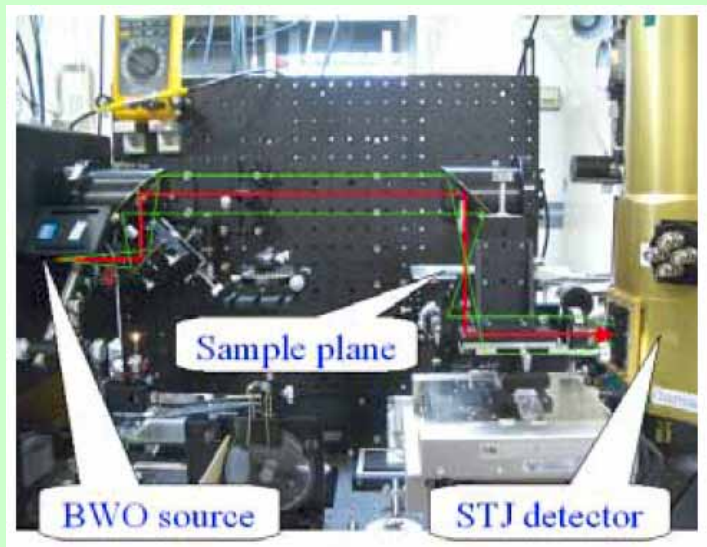


高感度

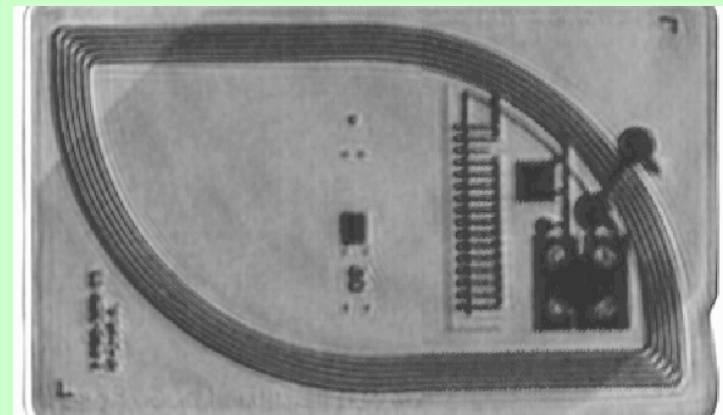
$$\text{NEP}_{\text{STJ}} \sim 10^{-(17 \sim 18)} \text{ W / Hz}$$

# イメージング測定例

STJ検出器1画素を用いて、試料のスキャンにより  
イメージングを行う



実験のセットアップ



STJを用いた世界初のテラヘルツ  
透過画像 (SUICAカード)

現在、5画素リニアアレイに着手

# 今後の開発項目

## エネルギー分解能の向上

素子作製プロセスの最適化

## 検出エリアの拡大

単素子の面積拡大

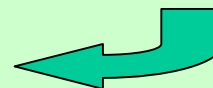
素子のアレイ化



多素子読み出し

配線数には限界あり

## 超伝導エレクトロニクスとの融合



低温領域にADC、MUXを導入し、多素子読み出しに対応

## クライオスタットの技術向上

簡便に長時間運転が可能 無冷媒冷凍機

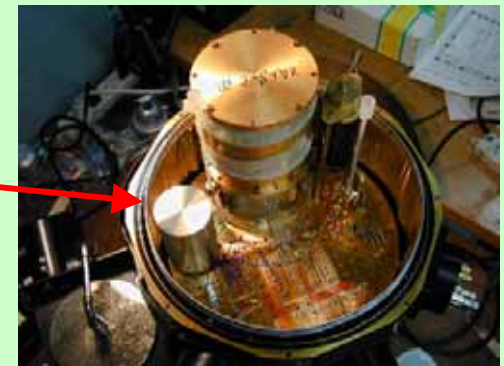
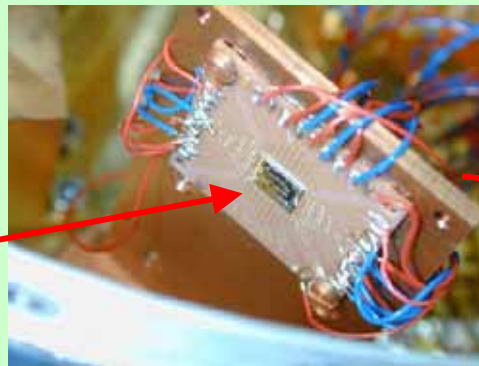
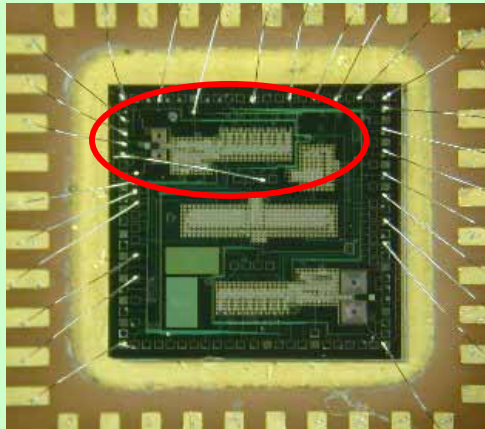
# 超伝導ADC回路のテスト

将来のSTJ読み出しに向けて、超伝導回路の動作実験を開始

名古屋大学 藤巻研究室との共同研究

4.2K

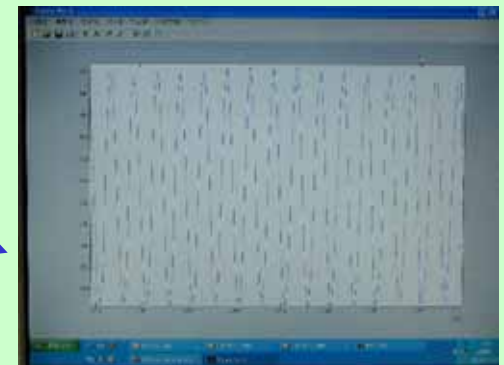
ADC (Nagoya Univ.)



8 bit, 50~100MHz clock

8 bit parallel readout

ADCの入力に、外部より正弦波を入力。ADCアウプットをPCで取り込んで再構成



実験に使用している冷凍機での動作を確認。

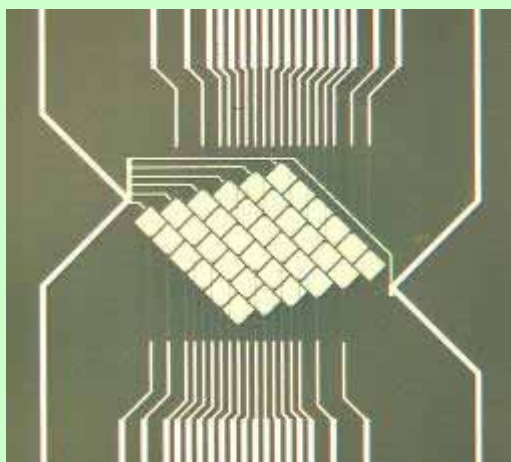
現在、STJとの組み合わせテスト準備中。

# 他のグループの例

## ESA-ESTEC

### S-Cam 2

STJを用いた、地上天文観測用アレイ



**Ta-Al** JJ, 40 $\mu$ m角 6x6アレイ

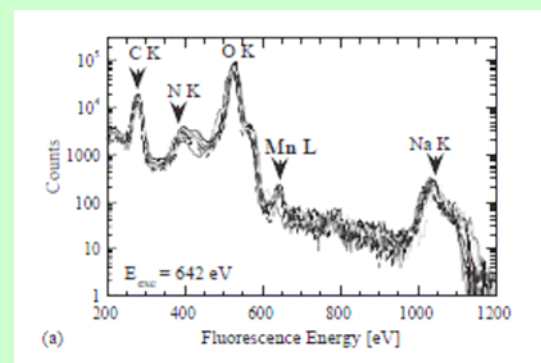
Crab pulsar の観測等に使用  
されている

→ S-Cam 3 12x10 pixels

D.D.E. Martin et al., NIM A **520** (2004) 512

## LLNL

放射光でのX線吸収分光  
(fluorescence-detected XAS)



**Ta-Al** JJ, 9素子

たんぱく質中のMnの結  
合状態の知見

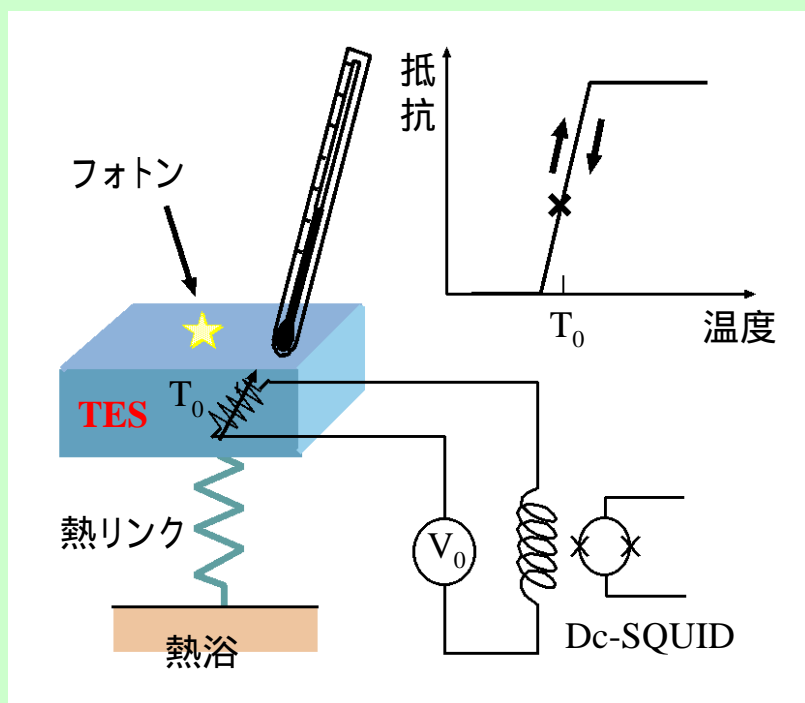
S. Friedrich, NIM A **520** (2004) 621

# 超伝導転移端温度計 (TES)

Transition Edge Sensor : TES

構成: フォトンの吸収体 + 高感度温度計 (TES)

フォトン入射時の吸収体の温度上昇を、高感度な温度計 (TES) で測定



極低温での物質の格子比熱

: 温度の3乗に比例して小さくなる

極低温での物質の電子比熱

: 温度に比例して小さくなる

mK程度の温度上昇

超伝導体の $T_c$ 付近における抵抗値の急峻な温度依存性を利用



# TESの特徴

エネルギー分解能

$$\Delta E_{(FWHM)} = 2.36\sqrt{4kT_c^2 C(1/\alpha)\sqrt{n/2}}$$

C : 熱容量

: 転移の急峻さを表すパラメタ (=d[logR]/d[logT])

n: 定数 (=5)

$T_c$ , Cが小さいほど、また  $\alpha$  が大きいほど良い分解能が実現

信号の時定数

$$\tau_{eff} = \frac{C}{G(1+\alpha/n)} \quad (\text{数}10 \sim \text{数}100 \mu\text{s})$$

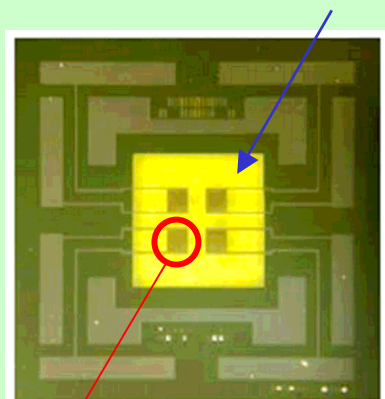
G: TESと熱浴の間の熱コンダクタンス

# 開発状況

低エネルギー陽子検出のためのTESを開発中

コンセプト:大面積、比較的高い転移温度

SiNメンブレン(500nm)

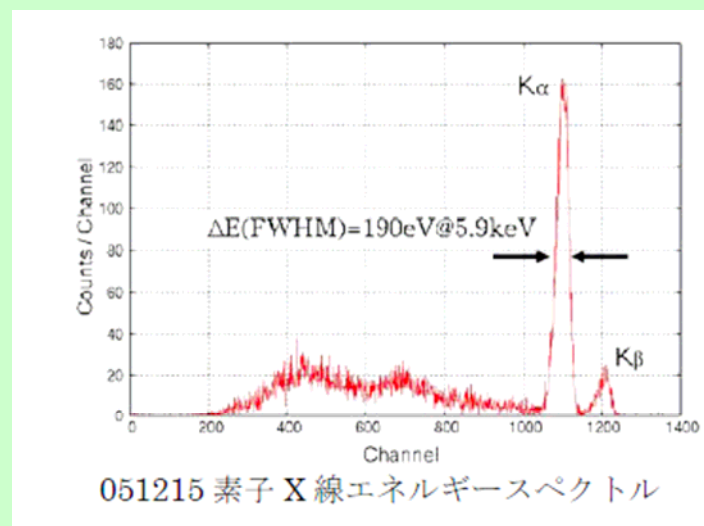


TES :  
Au(35nm)/Ti(100nm)/Au(35nm)

サイズ:500 $\mu$ m

T<sub>c</sub>=380mK

55Fe 線源からのX線で評価



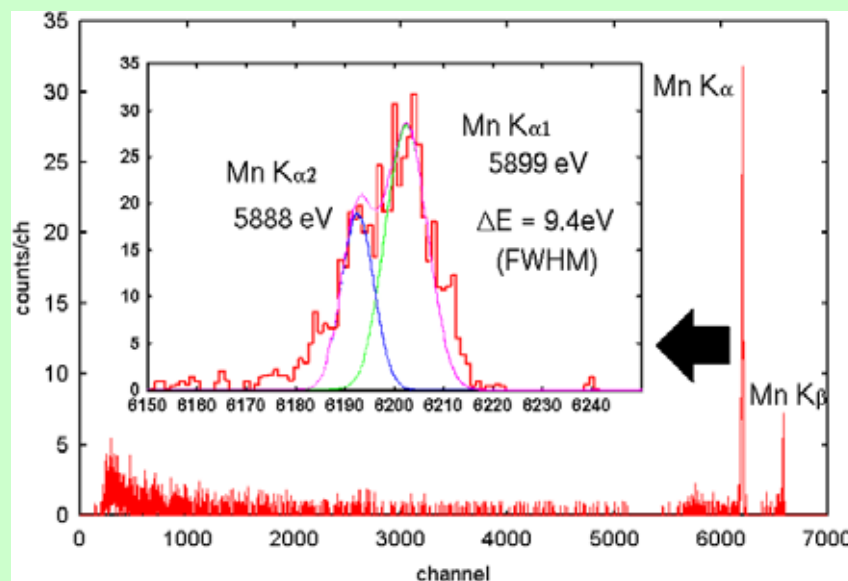
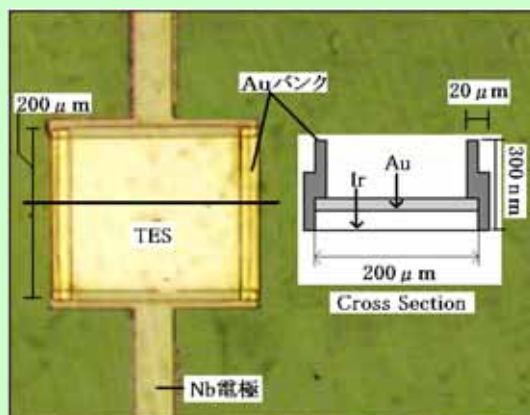
分解能向上のため、開発続行中

# “普通の”TESのパフォーマンス

## 5.9keV X線による評価

	$\Delta E$ (eV)	( $\mu s$ )	Thermometer	Tc(mK)	Rn( $\Omega$ )	Absorber
SRON	4.5 (3.9)	100	TiAu	96	0.25	Cu
NIST	4.5	750	MoCu	93	0.017	None/TES
GSFC	6.1	310	MoAu	106	0.010	None/TES
Jyvaskyla	9.2	260	TiAu	150	0.25	Bi
<b>東大</b>	<b>9.4</b>	<b>400</b>	<b>IrAu</b>	<b>110</b>	<b>0.15</b>	<b>None/TES</b>

東大 中沢・高橋研



# まとめ

視光から硬X線までの光子検出、線・陽子等の粒子検出が可能な、STJの開発

## STJ単接合・直接吸収型

極端紫外線・可視光等、低いエネルギーへの応用が適している

## STJ直列接合・基板吸収型

エネルギーの高い光子(硬X線)・重イオンへの応用が適している

## 現在の開発の中心

- ・低エネルギー陽子検出器 (STJ, TES)      中性子ベータ崩壊実験へ適用
- ・検出領域の大面积化
- ・超伝導ADCを用いた波形取得
- ・25画素テラヘルツイメージングの実現(理研仙台THzグループと)