

極低温放射線検出器

東京大学大学院工学系研究科
原子力国際専攻
バイオエンジニアリング専攻
高橋浩之

放射線検出器

- 気体放射線検出器
 - 電荷を一つ作るのに大きなエネルギー($\sim 30\text{eV}$)が必要
- 固体放射線検出器
 - 半導体検出器
 - 電荷を一つ作るのに 3eV 程度ですむが、それでも生成電荷は少ない
 - シンチレーション検出器
 - 発光を用いるので、信号キャリアは高速 光子を生成するのに大きなエネルギー($\sim 30\text{eV}$)が必要
 - 金属を用いた放射線検出器
 - 超伝導体を用いた検出器
 - 電荷信号を用いないので、信号キャリアを多数生成できる。
 - 温度ゆらぎの影響を受けるので、極低温で動作させる必要がある。

極低温を利用した放射線検出器

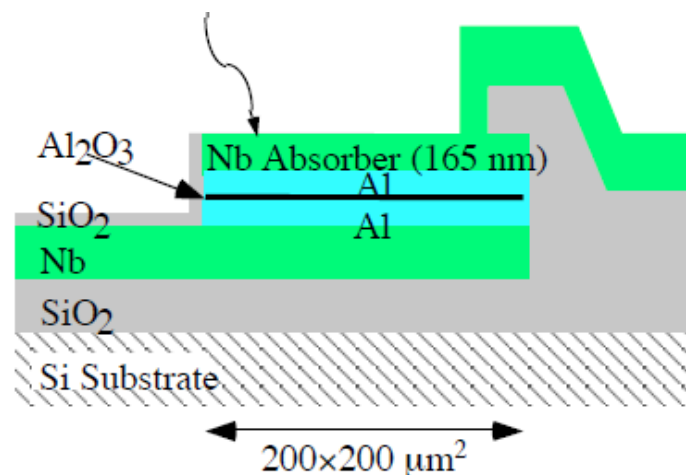
- 極めて高いエネルギー分解能
 - 半導体検出器の数十倍
 - 蛍光X線分析で化学状態の情報も得られる
- 超伝導トンネル接合型検出器(STJ)
クーパー対の準粒子励起を検出原理
- マイクロカロリメータ
放射線入射による温度上昇を検出原理

極低温検出器の応用分野

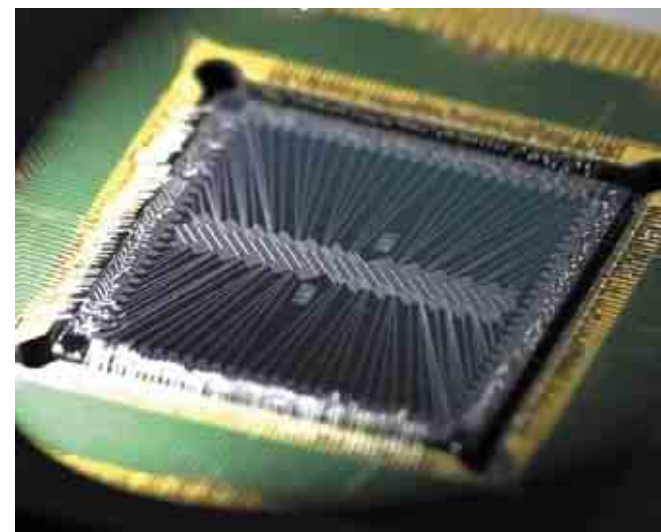
- 蛍光X線分析
- 素粒子物理
- 暗黒物質探索(WIMP)
- X線天文学
- テラヘルツ光
- 量子暗号通信
- 質量分析

- ・ 高いエネルギー分解能を持った検出技術
- ・ ごくわずかな変化をとらえる高感度検出技術

超伝導トンネル接合素子 (Superconducting Tunnel Junction: STJ)

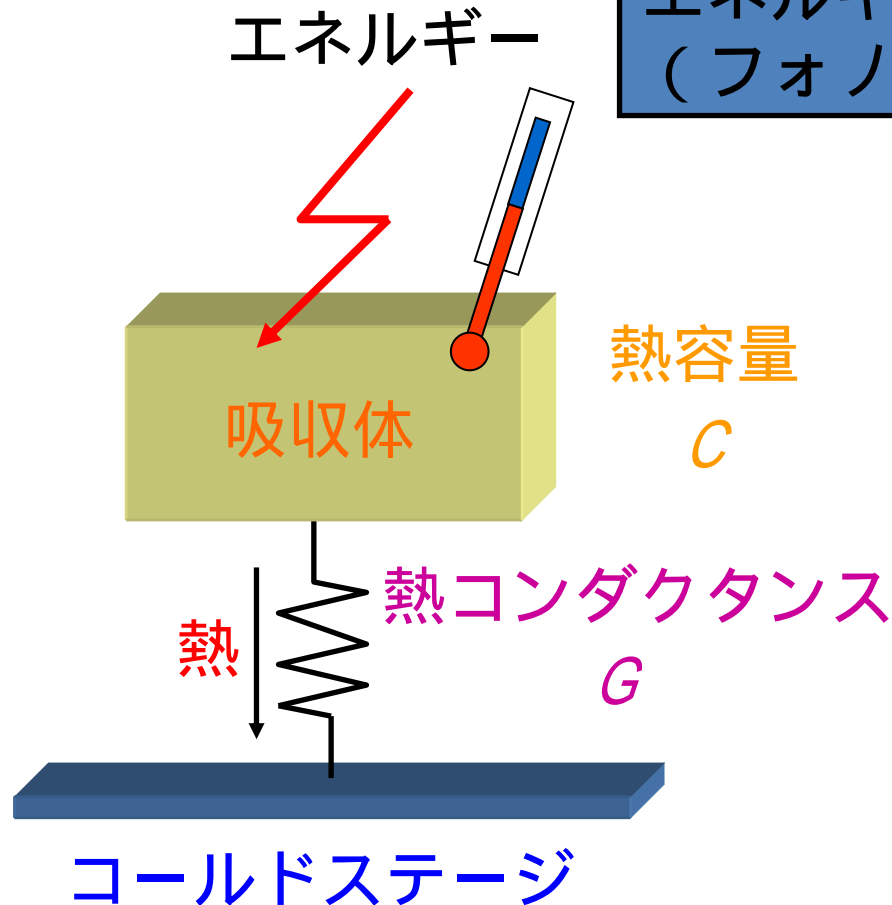


クーパー対の破壊により生じた電子のトンネル電流を検出するため、高速な応答 ~ μsec が特徴。理化学研究所でテラヘルツ光応用、産業技術総合研究所で質量分析装置向けの100ピクセルの検出器の開発研究がおこなわれている。



マイクロカロリメータ

エネルギー入射による**吸収体**の温度上昇
(フォノンの励起)を検出



- エネルギー分解能

$$\Delta E_{\text{FWHM}} \propto \sqrt{k_B T^2 C}$$

- 時定数 $\tau_0 = C/G$

吸収体の熱緩和時間によって
制限されており、 $\sim 100\text{msec}$

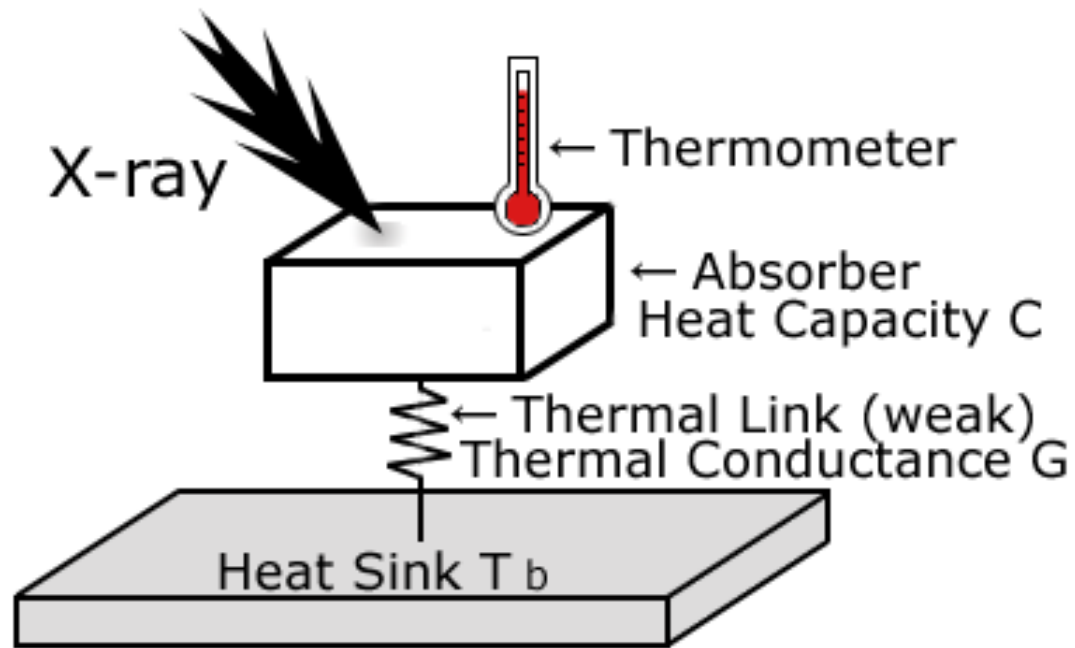
応用上の障壁

吸収体 として使う物質

半導体サーミスタ、磁気マイクロカロリメータ、誘電体カロリメータ

マイクロカロリメータ

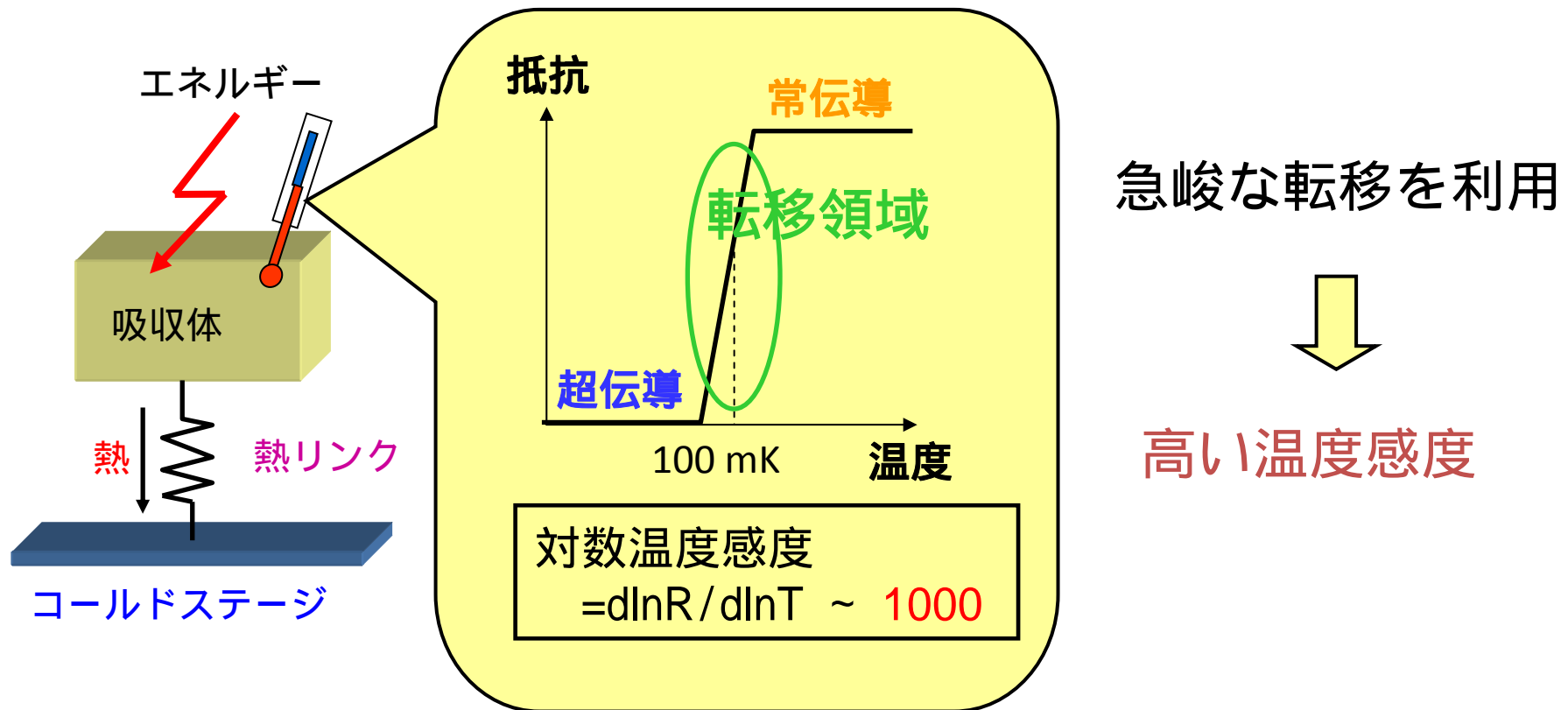
マイクロカロリメータ… Photonが一個吸収された時の温度上昇を検出



極低温での動作により高いエネルギー分解能を実現

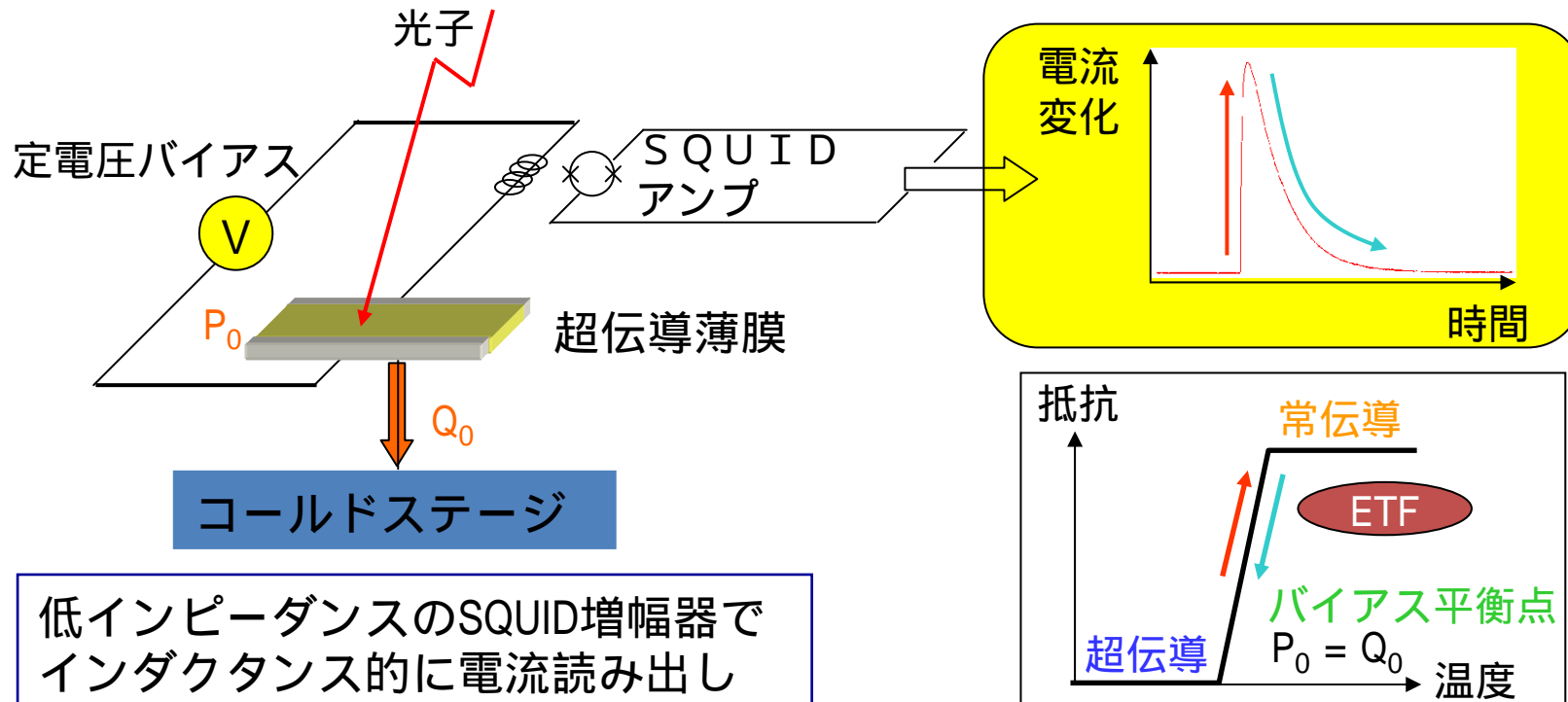
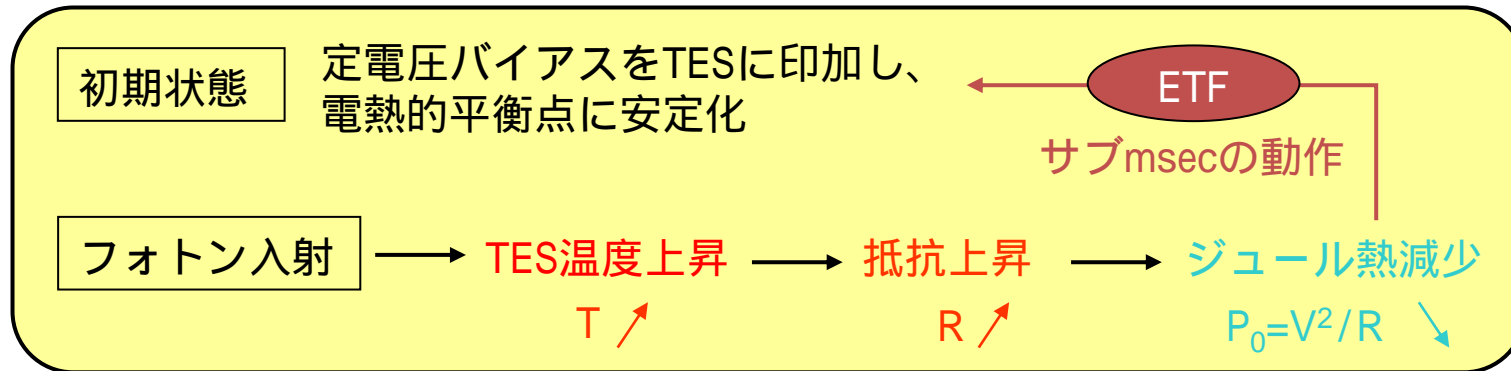
TES (Transition Edge Sensor) マイクロカロリメータ

超伝導転移を利用した高感度温度計を用いる

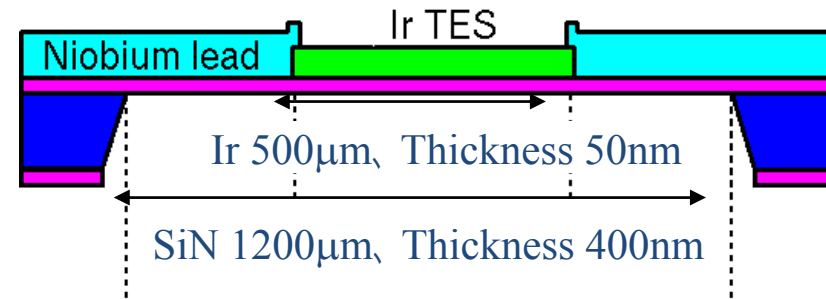
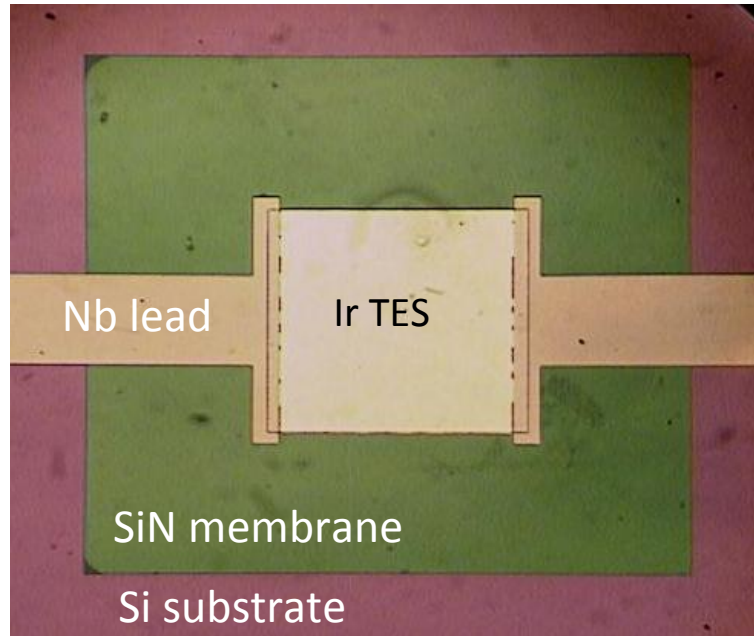


ETF-TESの動作原理

電熱フィードバック



Ir-TESの例



Heat capacity

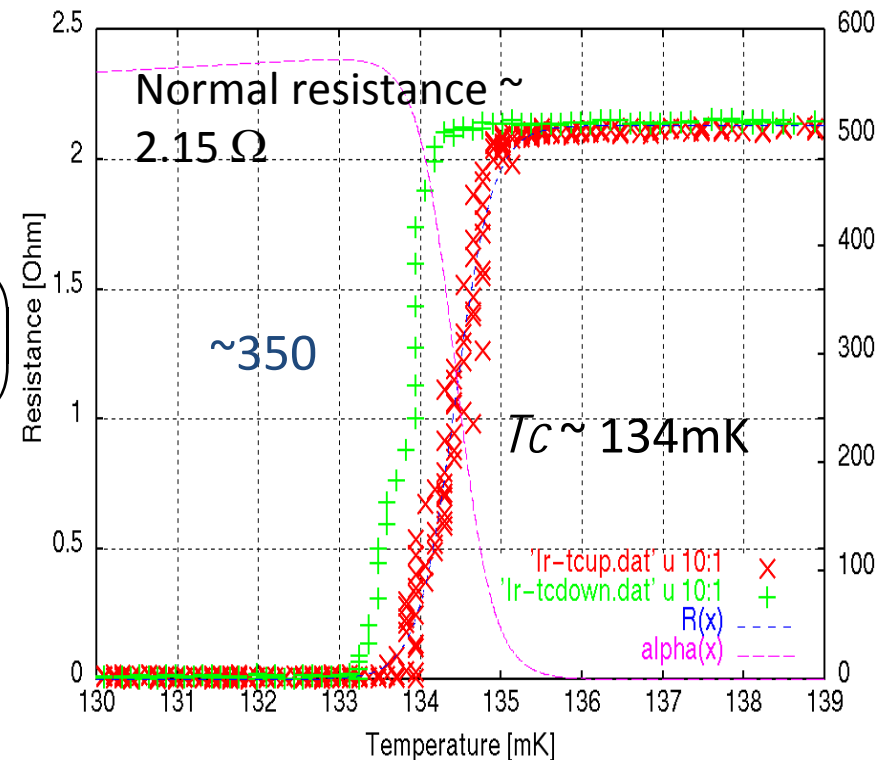
$$C = 1.48 \text{pJ/K} \times \left(\frac{S}{500 \mu\text{m}^2} \right) \times \left(\frac{d}{50 \text{nm}} \right)$$

Thermal conductance

$$G = 750 \text{pW/K}$$

Intrinsic time constant

$$\tau_0 = 2 \text{msec}$$



測定系

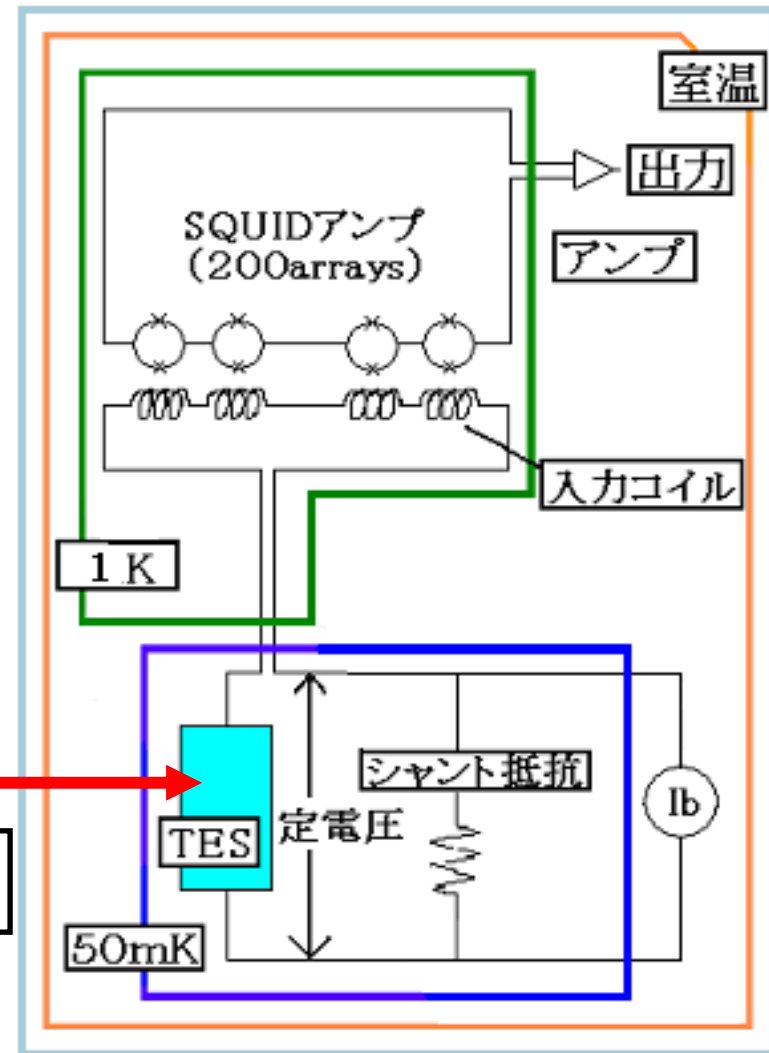
$^3\text{He}/^4\text{He}$ 希釈冷凍機



最低到達温度 50mK

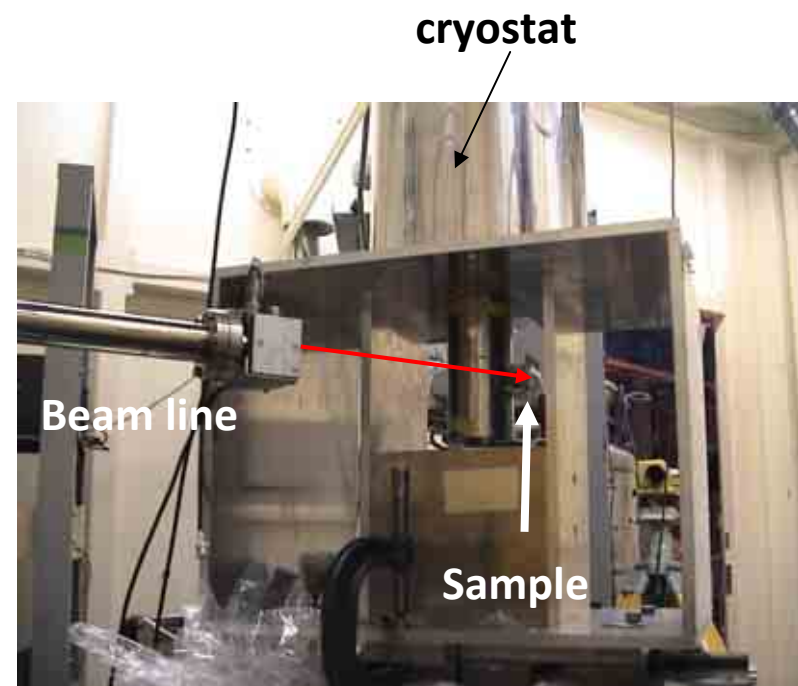
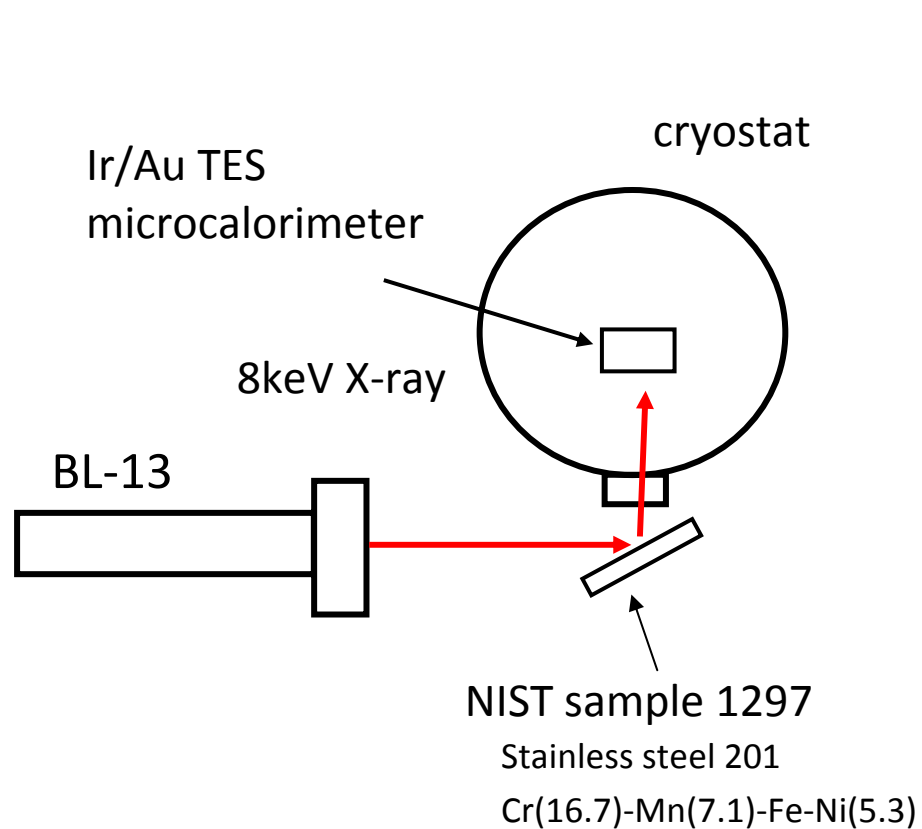
^{55}Fe 線源

Mn特性X線



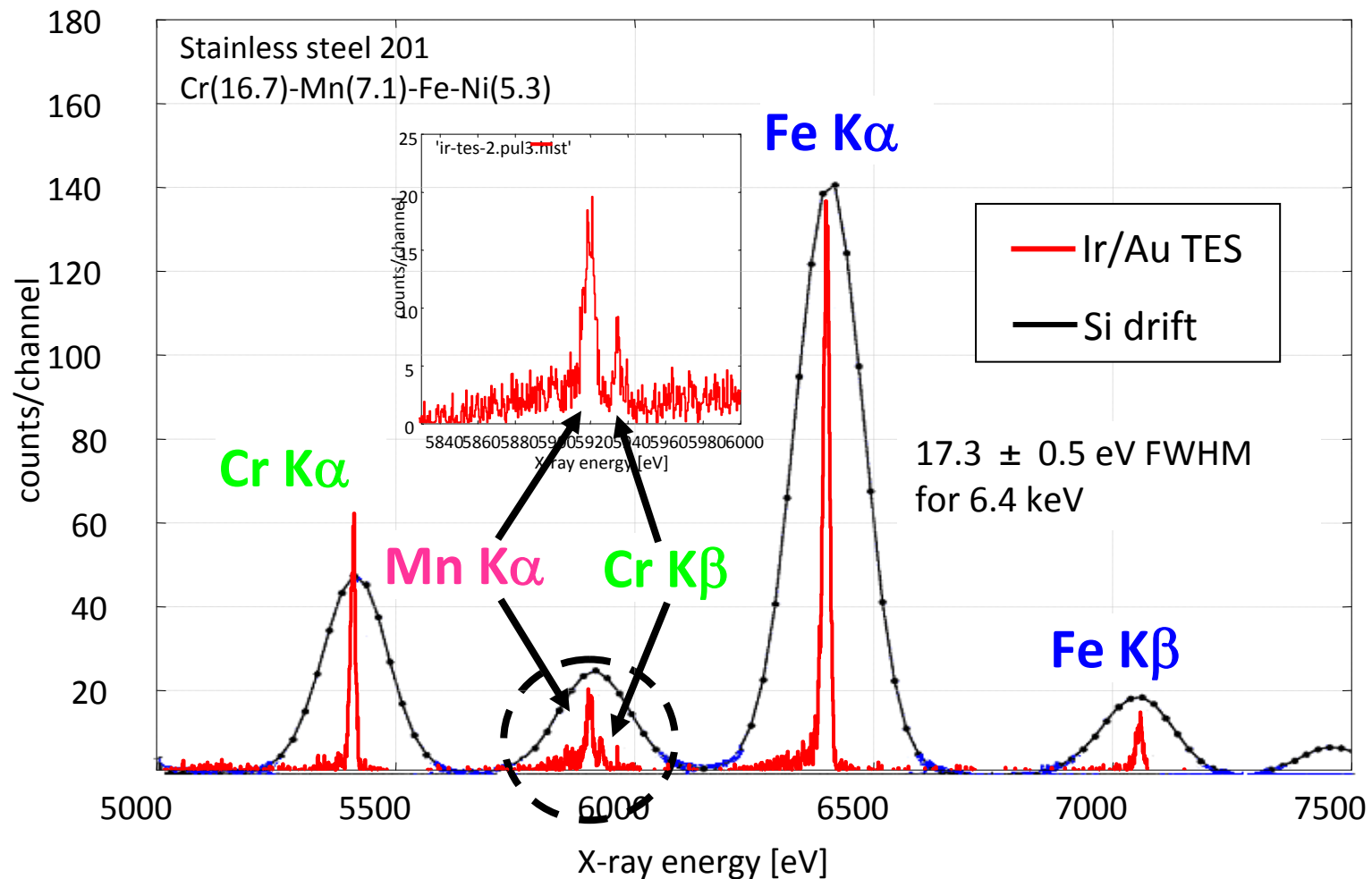
放射光による蛍光X線分析

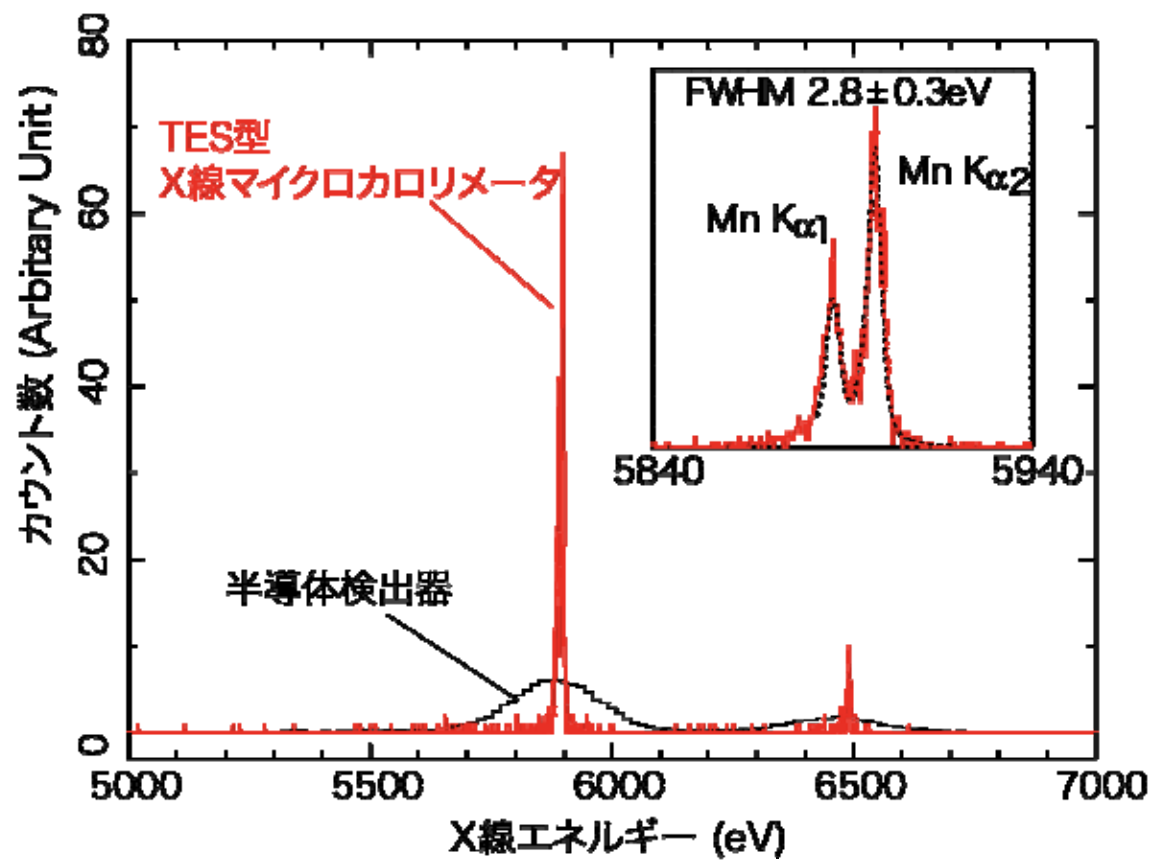
- BL-13B2 beam line at KEK photon factory
- Incident x-ray energy 8keV



ステンレス試料の分析例

Spectrum of NIST sample 1297



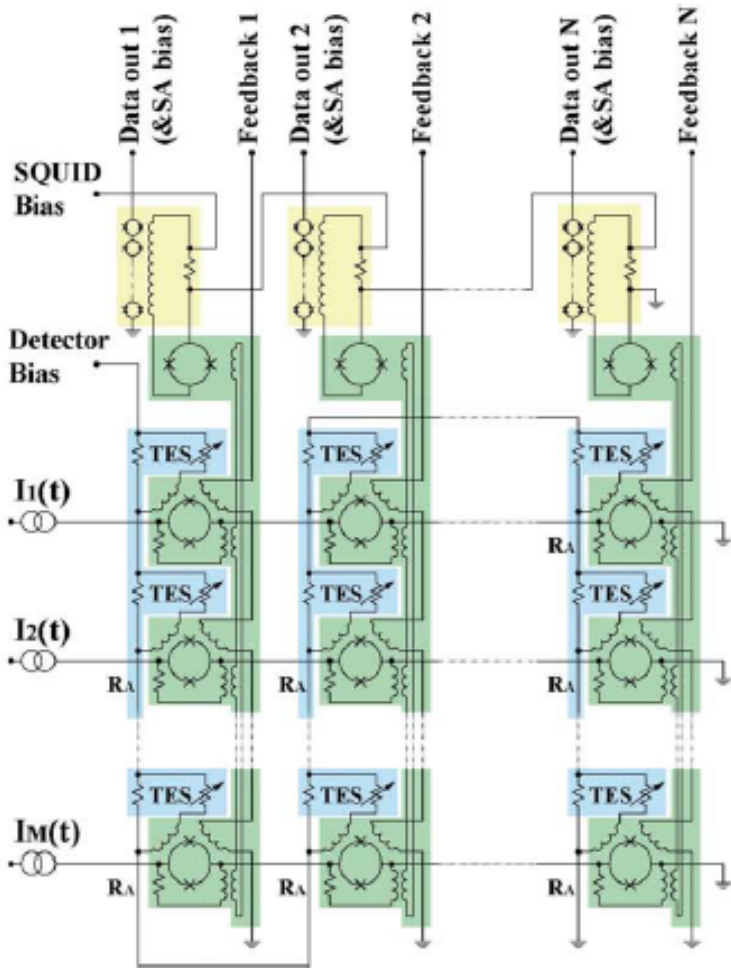
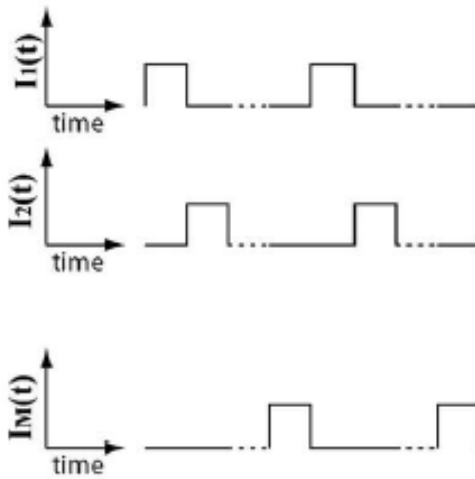


TES開発における課題

- エネルギー分解能
 - 転移領域が狭いので、非線形応答を示す。新しい信号処理法が必要。
- 検出効率の制約
 - 大面積化すると熱容量が大きくなり、エネルギー分解能に制限が加わるため、アレイ化の方向
 - アレイを効率的に読み出すためのエンコーディング手法
 - 時間領域マルチプレクシング
 - 周波数領域マルチプレクシング
 - その他

時間領域のマルチプレクシング

Boxcar Modulation Functions
(can be from Cryogenic CMOS MUX)

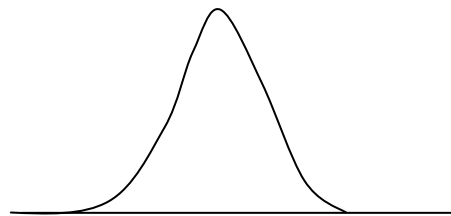
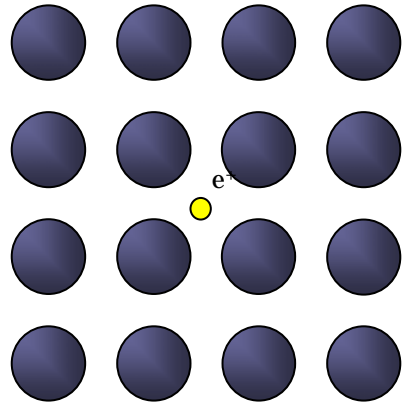


- Series Array SQUID (4K)
- Multiplexer chip(s)
- Detector chip(s)

線領域への新しい応用

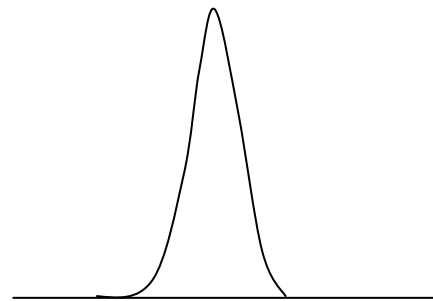
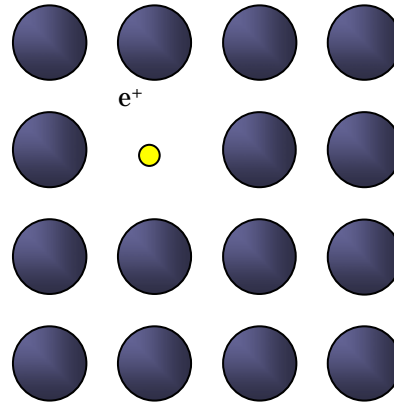
Positron Annihilation Spectroscopy

No defect



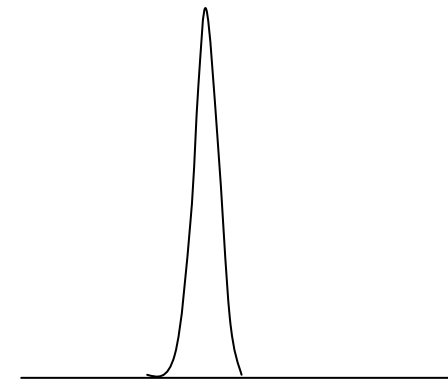
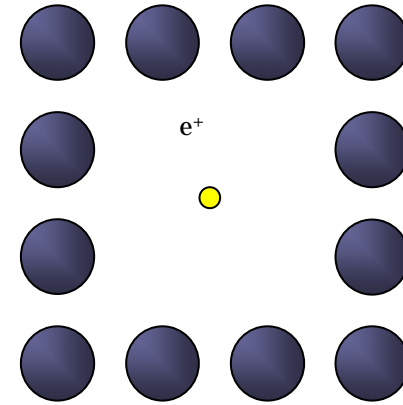
Energy spectrum

Lattice defect



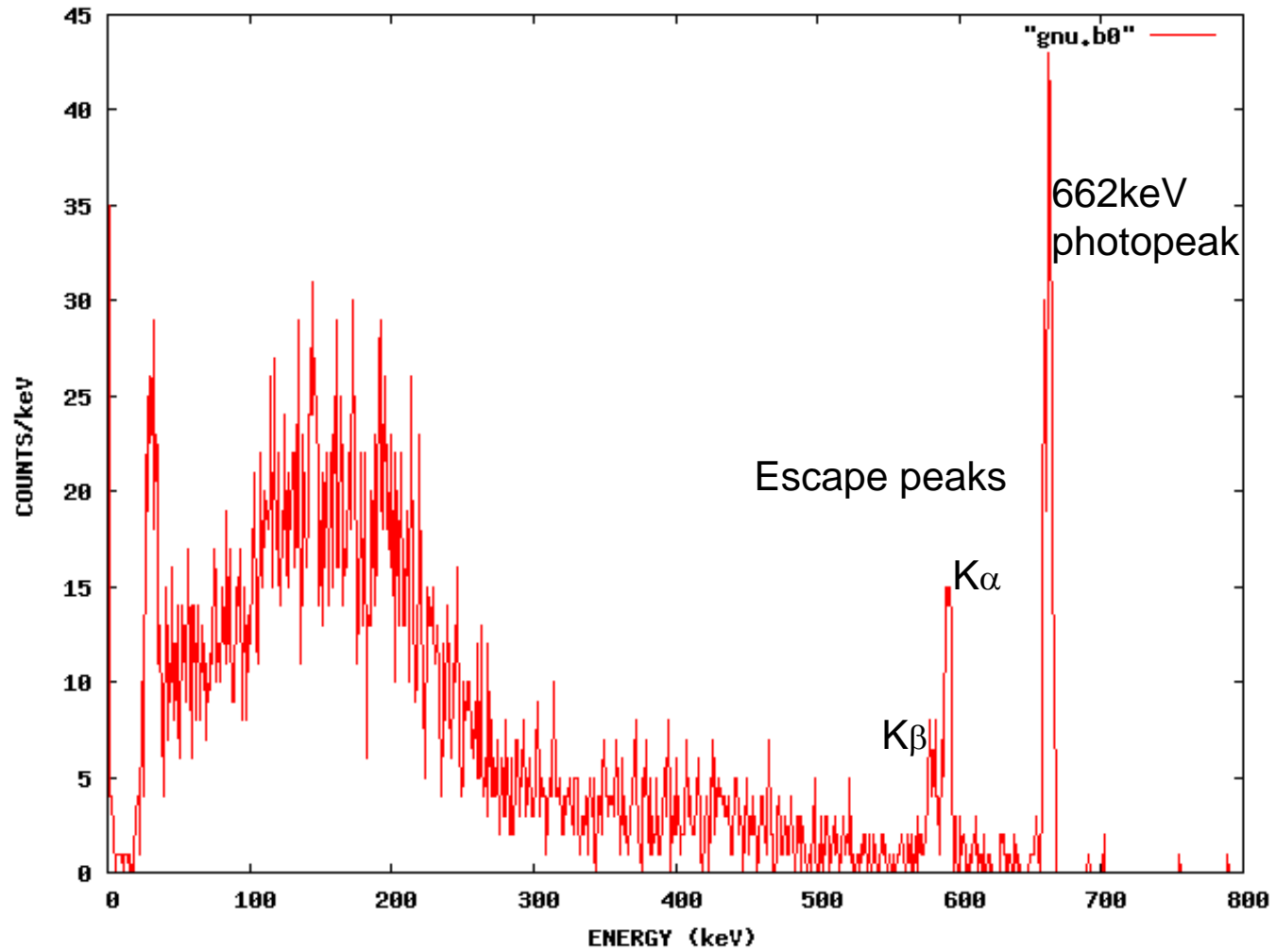
Energy spectrum

Lattice defect



Energy spectrum

Cs-137 Spectrum by Gamma-ray TES



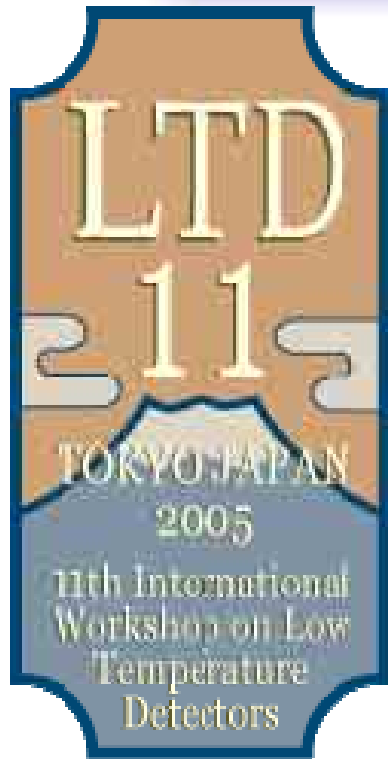
Pb K α : 75keV

Pb K β : 85keV

世界の情勢

- NIST 高い技術レベルと広い応用分野
- NASA X線天文に特化 エネルギー分解能 $1.8\text{eV}@5.9\text{keV}$
- UCB 周波数マルチプレクシング読み出し技術
- Heidelberg大学
 - 独自の磁気カロリメータ
- 東京大学
 - イリジウムを用いた安定なデバイス開発、線領域まで展開
- 宇宙科学研究所 / 首都大学
 - 宇宙応用
- 産業技術総合研究所
 - 質量分析、量子暗号通信
- 理化学研究所
 - テラヘルツ応用、宇宙背景放射
- 大阪府立大学
 - MgB_2 を用いた中性子応用

11th International Workshop on
Low Temperature Detectors (LTD-11)
Takeda Hall, University of Tokyo, JAPAN
31 July - 5 August, 2005



東京大学武田先端知ビル武田ホール

先端計測分析技術・機器開発事業「機器開発プログラム」重点開発領域案

(領域名)

高感度・高分解能超伝導分光技術開発

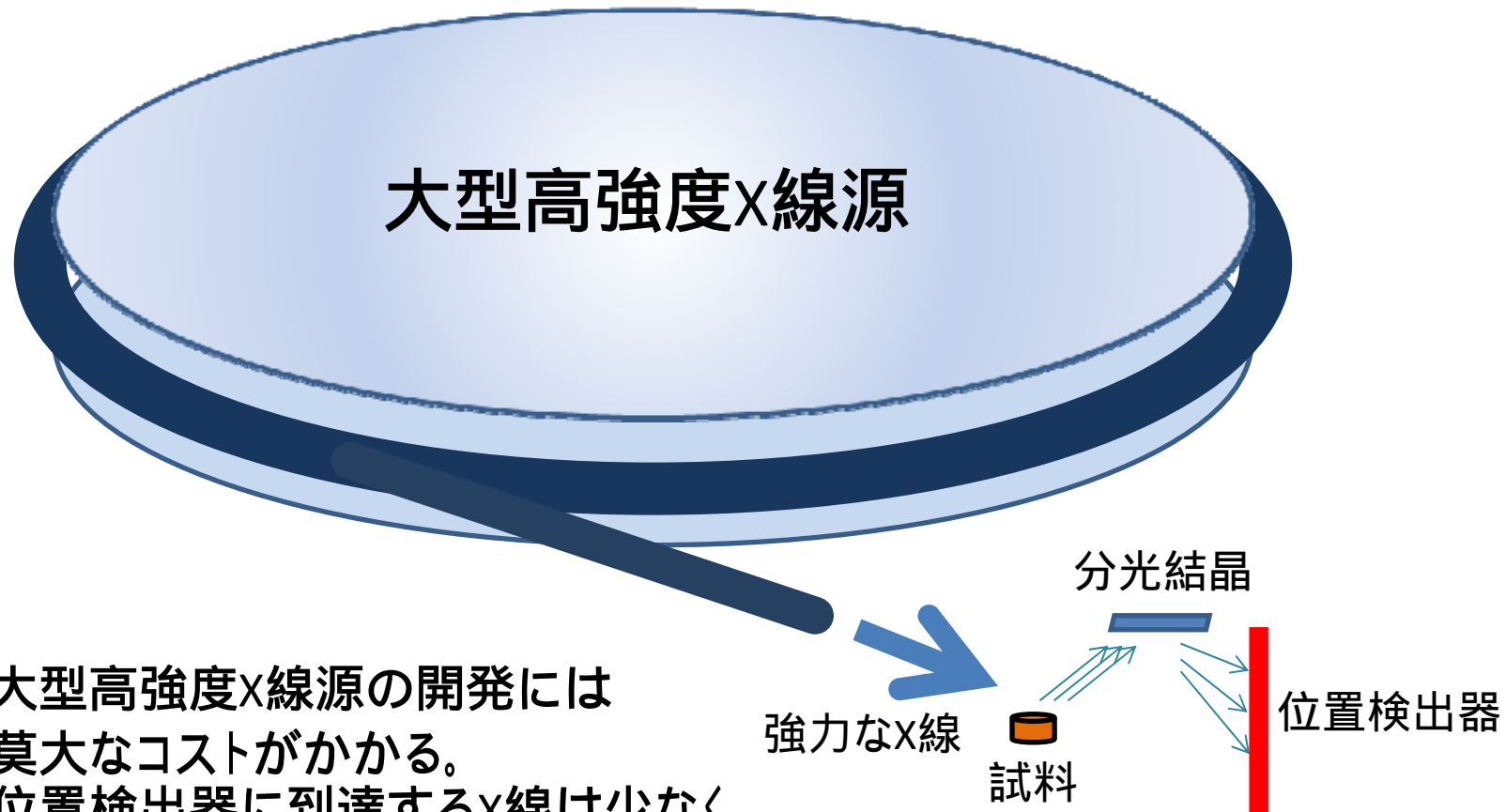
(概要)

X線、 γ 線、近赤外光、テラヘルツ光などに適用可能な高感度・高分解能の計測技術を開発する。特に、実験室で利用可能なX線顕微鏡装置、電子顕微鏡装置、材料欠陥を計測することのできる陽電子消滅分光装置の開発を行う。

(期待される効果の例)

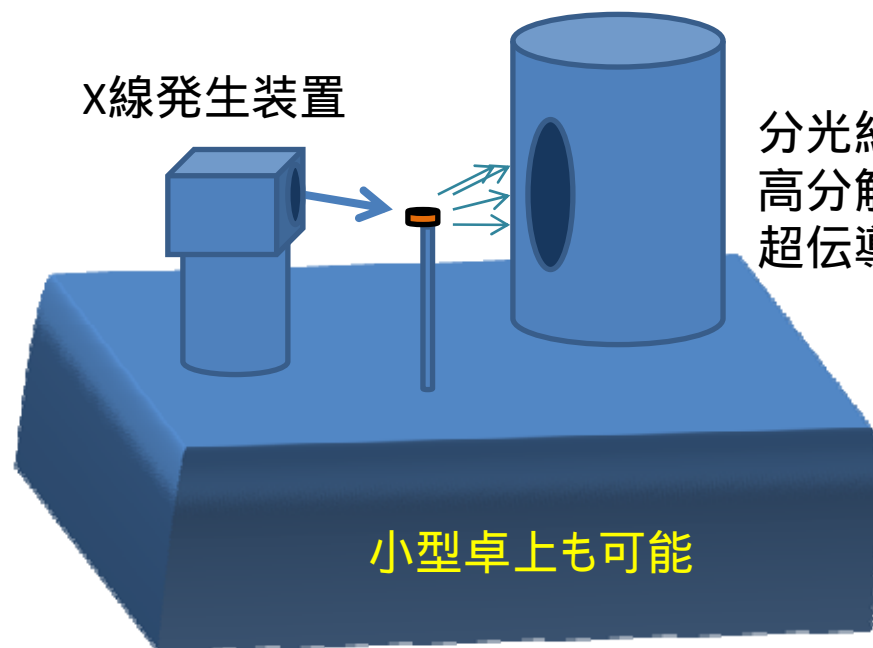
- ・X線顕微鏡の利用により、生体試料などの高感度かつ手軽な元素分布マッピングが可能になる。
- ・蛍光X線分析の高効率化し、環境中の重金属元素、ヒ素などの有害物質の計測を容易に達成できる。
- ・ γ 線領域の分光計測技術を飛躍的に進歩させ、陽電子消滅分析による材料欠陥診断技術を確立させる。また、微量の核物質等から放出される γ 線を同定し、セキュリティ確保に寄与する。
- ・近赤外光、テラヘルツ光など、従来の計測技術では、検出効率、検出感度が高くとれない領域への応用を展開する。

従来の代表的なX線分光手法



大型高強度X線源の開発には
莫大なコストがかかる。
位置検出器に到達するX線は少なく、
利用効率が悪い

超伝導検出器によるX線分光



高速・高分解能超
伝導検出器による
実験室で使えるX
線顕微鏡装置

TESマイクロカロリメータアレイ
マルチプレクシング読み出し技
術
小型極低温冷凍機技術

X線の利用効率が高く、低コスト・小型化可能・波及効果が大い。
日本の得意とする、小型高性能化技術が有効に機能する。
検出器開発は多くの分野に分散して並列して進行してきたため
これまで高性能検出器の開発研究に必要なだけのコストが
かけられていない。