

JAERI-Conf
96-004



第43回基礎科学セミナー
— 超伝導放射線検出器の開発 —
論文集

1995年11月20日、日本原子力研究所、東京

1996年3月

量子計測研究グループ

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11. Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷㈱

第43回基礎科学セミナー
—超伝導放射線検出器の開発—
論文集

1995年11月20日、日本原子力研究所、東京

日本原子力研究所先端基礎研究センター
量子計測研究グループ

(1996年1月31日受理)

超伝導を利用した放射線検出器、特に超伝導トンネル接合放射線検出器の研究は、これまでの半導体検出器にくらべてX線に対するエネルギー分解能が一桁半以上良くなる可能性があることから最近精力的に研究が進められている。

日本原子力研究所先端基礎研究センター量子計測研究グループでは、量子効果を用いた放射線計測法としてレーザー、光ファイバーと並ぶ主要な研究課題としてこの超伝導トンネル接合放射線検出器を取り上げています。また、研究の目標と質を向上させるため、広く所内外の研究者と討論を進める体制で研究の展開を図っています。

この趣旨にもとづき、1995年11月20日に「超伝導放射線検出器の開発」と題するセミナーを文部省科研費グループと協力して開催しました。同セミナーでは、超伝導トンネル接合放射線検出素子の作製、特性及びその応用に関する研究成果とこれに関連するボロメータ及び準安定超伝導粒子放射線検出器に関して、国内の主要な研究者の最新研究内容の講演を行い、これを基に議論を深めました。

本稿は、同セミナーでの講演内容を論文集としてまとめたものであり、所内外での先端的な研究の現状を知ると共に、将来における研究の方向と展開を知る上で重要な内容を含むものである。

JAERI-Conf 96-004

Proceedings of the 43rd Basic Science Seminar on Development of
Superconducting Radiation Detectors
November 20, 1995, JAERI, Tokyo

Research Group for Quantum Radiation Measurement

Advanced Science Research Center
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 31, 1996)

Recently, research of superconducting radiation detectors, especially superconducting tunnel junction radiation detectors has been extensively carried out because of their excellent energy resolution for X-ray detection.

"Superconducting tunnel junction radiation detector" is one of main key words for new radiation measuring methods by quantum effects in our research group for quantum radiation measurement of the advanced science research center of JAERI. It is very important to have discussion with many researchers inside and/or outside JAERI in order to improve our quality of study.

Based on the object, the seminar "Development of superconducting radiation detectors" was held on 20th of November 1995. There were many presentations concerning fabrication, characteristics and applications of the superconducting radiation detectors. The participants had a good opportunity for exchanging relating research information.

This proceedings includes all papers of the presentations. It is not only useful to know the present status of advanced study but also the research direction and evolution in the future.

Keywords: Superconducting, Radiation Detector, X-ray, Low Temperature, Tunnel Junction, Josephson, Bolometer, Granule

目 次

1. 巻頭言	1
中澤正治 (原研/東大)	
2. 基礎科学セミナー「超伝導放射線検出器の開発」プログラム	2
3. 講演論文	3
3.1 開発の現状と目標	3
倉門雅彦 (新日鐵)	
3.2 ボロメータの開発	8
袁輪 眞 (東大)	
3.3 準安定超伝導粒子検出器の開発	10
戎 健男 (神戸大)、渡辺 正 (東京情報大)	
3.4 極低温放射線検出器の国際的な開発動向	26
片桐政樹 (原研)	
3.5 超伝導トンネル接合の諸問題	32
赤穂博司 (電総研)	
3.6 超伝導トンネル接合素子のX線天文学への応用	37
大橋隆哉、山崎典子、菊池健一 (都立大)	
倉門雅彦 (新日鐵)、村上敏夫 (宇宙研)	
3.7 トンネル接合検出器の放射光実験への応用	43
石橋健二、前畑京介、野田孝浩 (九大)	
仲川 博、赤穂博司、高田 進 (電総研)	
中島哲夫 (高エネ研)、清水祐彦 (理研)	
片桐政樹 (原研)	
3.8 S T Jの集積回路への応用	48
黒沢 格 (電総研)	

Contents

1. Foreword	1
2. Seminar Program	2
3. Table of Contents	3
3.1 Superconducting Radiation Detector - Present State and Targets -	3
3.2 Development of Bolometer	8
3.3 R & D of a Low Temperature Detector using Superheated Superconducting Granules	10
3.4 International Topics of Low Temperature Radiation Detectors	26
3.5 Some Issues of Superconducting Tunnel Junction for Radiation Detector	32
3.6 Superconducting Tunnel Junction Detectors for X-ray Astronomy	37
3.7 Application of Tunnel-Junction Detectors to Synchrotron-Radiation Experiment	43
3.8 Josephson Integrated Circuits	48

1. 巻頭言

超伝導を用いた新しい放射線検出器は、今、革命前夜の状況にあります。例えば、5.9 keV エックス線に対するシリコン (Si) 検出器のエネルギー分解能は、理論値で半値巾 100 eV ですが、超伝導のジョセフソン素子では 3 eV になる可能性があります。従って、この超伝導型検出器の開発研究は、国際的にも先陣争いの激しい競争をしています。現在、目標値 3 eV に対して 30 eV 程度が実現されています。国内での最高値は 73 eV です。

原研、先端基礎研究センター (伊達宗行センター長) の量子計測研究グループでは、三つの主要テーマの一つとして、超伝導放射線検出器を取り上げています。同センターでは、単に先端的な研究に取り組むのではなく、所内外の研究者と広く討論し、そのことを通じてさらに研究目標を高め、研究の質を向上させるという「開かれた研究体制」の推進も図っております。

この趣旨にもとづき、平成 8 年度に本研究をスターとした文部省科学研究費グループと協力して標記テーマで第 43 回基礎科学セミナーを企画したところ、本研究の関連分野及び宇宙線等の利用分野の約 45 名の研究者に参加していただきました。セミナーでは、参加者と深い議論、検討を進めることができ、本研究の将来についてかなり具体的なイメージを参加者と共有できたことが大きな成果でありました。

今後、本論文集が開発に参加して頂ける方々や予想される利用分野の方々の御参考になれば誠に幸甚に存ずる次第です。

量子計測研究グループリーダー
中澤 正治

2. 基礎科学セミナー「超伝導放射線検出器の開発」プログラム

1. 日時：平成7年11月20日（月）10：00から17：00
2. 場所：日本原子力研究所東京本部第3会議室（Tel: 03-3592-2143）
東京都千代田区内幸町2丁目2番2号 富国生命ビル14階
3. 主催：日本原子力研究所先端基礎研究センター
後援：科学研究費「超伝導を用いた放射線検出器の試作」グループ
日本原子力学会 放射線工学部会
応用物理学会 放射線分科会

4. プログラム

- | | | | |
|----------------|--------------------|--------|-------|
| 1) 10:00～10:10 | 開会挨拶 | 原研 | 永井 士郎 |
| 2) 10:10～10:20 | 研究会の主旨紹介 | 原研（東大） | 中沢 正治 |
| 3) 10:20～10:50 | 開発の現状と目標 | 新日鐵 | 倉門 雅彦 |
| 4) 10:50～11:20 | ボロメータの開発 | 東大 | 箕輪 眞 |
| 5) 11:20～11:50 | 準安定超伝導粒子検出器
の開発 | 神戸大 | 戎 健男 |

昼休み 11:50～13:00

- | | | | |
|-----------------|---------------|-----|-------|
| 6) 13:00～13:30 | 国際的な開発動向 | 原研 | 片桐 政樹 |
| 7) 13:30～14:00 | 超伝導トンネル接合の諸問題 | 電総研 | 赤穂 博司 |
| 8) 14:00～14:30 | エックス線天文学への利用 | 都立大 | 大橋 隆哉 |
| 9) 14:30～15:00 | 放射光実験への利用 | 九大 | 石橋 健二 |
| 10) 15:00～15:30 | STJの集積回路への応用 | 電総研 | 黒沢 格 |

コーヒーブレイク 15:30～15:45

- | | | | |
|-----------------|------------------------------------|----|--------|
| 11) 15:45～16:45 | パネル討論
「低エネルギーX線の高分解能検出法としてのSTJ」 | 京大 | 五十棲 秦人 |
|-----------------|------------------------------------|----|--------|

3. 講演論文

3.1 開発の現状と目標

Superconducting Radiation Detector Present State and Targets

新日本製鐵(株)・先端研 倉門 雅彦
Kurakado Masahiko

1. はじめに

低温と室温間の熱サイクルおよび室温保存で特性が殆ど変化しないために実用化に適していると考えられているNb系のトンネル接合を用いた超伝導放射線検出器について、開発の現状と実用化を図るための当面の目標について述べる。

2. 素子 (素子開発の現状と目標)

a. 熱サイクルおよび室温保存耐性

185×185 μm^2 のNb系接合を440個直列に接続した試料で熱サイクルテストが行われた。この試料の4.2Kでのサブギャップ電流は約0.8mAである。4.2Kから0.4Kに温度を下げることで180mVでの電流が約20nAに減少しており、大部分の接合でリーク電流が小さい。

この試料を室温・大気中で1年間保存し、さらに室温と4.2Kの間で100回の熱サイクルを行った後で、0.4Kでの電流-電圧 ($I-V$) 特性が再測定されたが、リーク電流の増加は認められていない。

b. 単接合素子でのエネルギー分解能/面積/膜厚

	単接合素子	
	現状	目標
エネルギー分解能	73 eV @5.9 keV ノイズ: 62 eV 178×178 μm^2 4並列初段FET前置増幅器 での測定 [原研]	30 eV @5.9 keV ノイズ: 20 eV 178×178 μm^2
面積	~178×178 μm^2	100×100 μm^2 ~250×250 μm^2
厚さ (超伝導体)	200 nm Nb	2 μm Nb、Ta [トラップ効果利用]

c. 直列接合素子でのエネルギー分解能/面積/膜厚

基板の表面に多数の接合を直列に設置した直列接合素子では、基板で放射線を吸収してそのエネルギーをフォノンに変換し、直列接合でフォノンを検知することによって、放射線信号を取り出すことができる。そのため、基板が検出器の一部となり、検出器としての厚みを大きくすることができる。また、接合総面積に応じて直列接合数を最適化することにより、素子の実効静電容量を小さくすることができ、単接合素子に比べて大面積化が可能である。

しかしながら、従来はノイズが大きい、信号の大きさが放射線の入射位置に大きく依存してしまう、といった問題があった。

[X線用直列接合の研究開発]

- ・有感面積 $1.5 \times 1.5 \text{ m}^2$ の素子の中心 $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ で約3%の入射位置依存性による広がり
- ・入射位置分解能を付与した直列接合検出器で信号の大きさの入射位置依存性を1/5程度に補正できることを実証 (入射位置分解能 $< 0.1 \text{ mm}$ ($\approx 50 \mu\text{m}$))

	直列接合素子	
	現状	目標
エネルギー分解能	ノイズ: 600 eV (95.11) (← 1 keV (95.9) ; 5 keV (94) ; 約 30 keV (93))	50 eV @ 5.9 keV ノイズ: 40 eV
面積	$500 \times 500 \mu\text{m}^2$	$1 \times 1 \text{ mm}^2$ for 5.9 keV
厚さ (基板)	$400 \mu\text{m}$ Al_2O_3	$200 \sim 400 \mu\text{m}$ Al_2O_3 Si for $< 20 \text{ keV}$ $200 \mu\text{m} \sim 2 \text{ mm}$ InSb GaAs for $> 20 \text{ keV}$
入射位置分解能	$< 0.1 \text{ mm}$	$< 0.05 \text{ mm}$

3. クライオスタット

超伝導トンネル接合を用いた放射線検出器では、熱による電子の励起を抑制するために、素子を充分冷却しておく必要がある ($T < (\text{または} \sim) T_c / 10$)。Nb系接合では簡便なヘリウム3クライオスタットでの充分な冷却が可能である。

クライオスタット本体から突き出たコールドフィンガー先端で0.35 Kを約4日間連続保持できる簡便なヘリウム3クライオスタットを開発した。

ヘリウム3クライオスタット

液体He (^4He) の使用量 [103 k ¥ /100リッター]	現状	目標
ヘリウム3クライオスタット形状	直径25 cm、 高50 cm	直径25 cm、 高50 cm
初期冷却 (77 Kからの冷却と ヘリウム3の作動、 作動直後の注ぎ足し)	13リッター	13リッター
使用時の自然蒸発	2リッター/日	2リッター/日
1回の連続運転時間 (0.35 K保持時間)	90時間	96時間
液体ヘリウム補給	5リッター/1.5日	7リッター/65 Hr (金夜-月朝)
中断時間	2時間 (/90時間)	2時間 (/96時間)
ヘリウム3再起動 (液体ヘリウム補給・減圧、 ヘリウム3液化・減圧、 ヘリウム3作動直後の注ぎ足し)	8リッター	10リッター
1.5日のみの使用	13リッター	13リッター
4日間の連続使用	23リッター	20リッター
1カ月の連続使用	130リッター (2時間の中断7回)	110リッター

その他にも、循環方式He3クライオスタットやHe3-He4希釈冷凍機などの連続液化冷却方式の簡便なクライオスタットの開発も重要であろう。

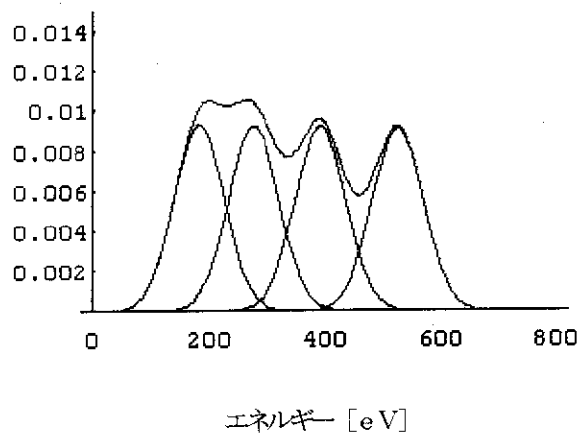
4. 参考 硼素 (B)、炭素 (C)、窒素 (N)、酸素 (O)
 に対するK α 線スペクトル [単純なガウス分布での計算による]

【従来半導体検出器による軽元素X線スペクトル】

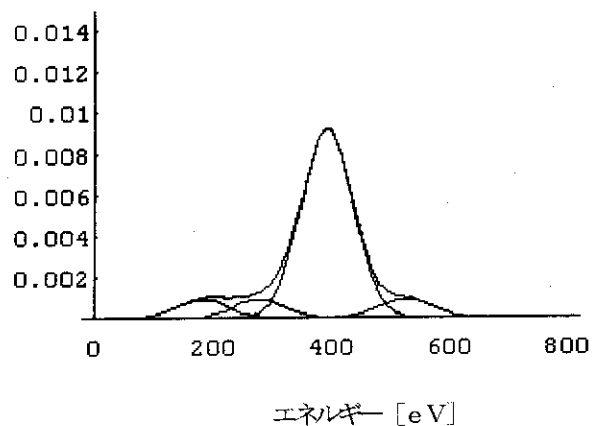
5900 eV (Mn K α) でのエネルギー分解能: 130 eV

ノイズ: 100 eV の場合、

(X線強度)
 B:C:N:O
 =1:1:1:1
 のとき



B:C:N:O
 =1:1:10:1
 のとき

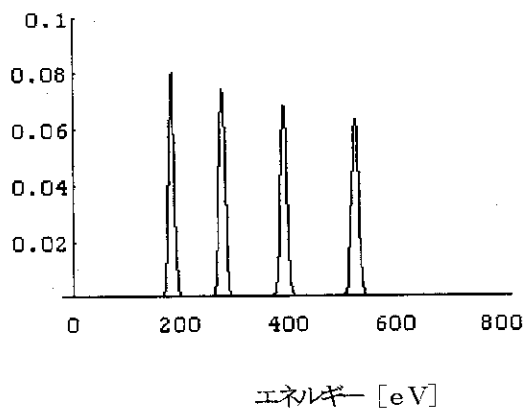


【超伝導トンネル接合検出器による軽元素X線スペクトル】

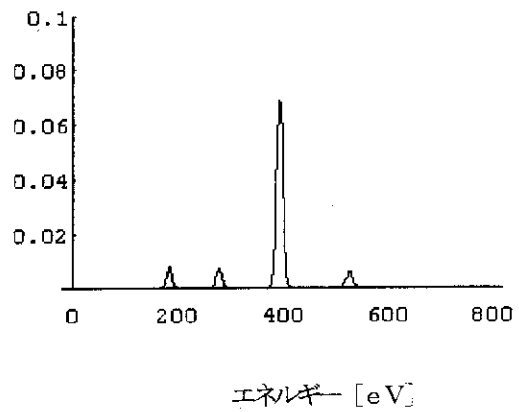
277 eV (C K α) でのエネルギー分解能: 12.6 eV

ノイズ: 9.6 eV の場合、

B:C:N:O
 =1:1:1:1
 のとき



B:C:N:O
=1:1:10:1
のとき



3.2 ボロメータの開発

東京大学大学院理学系研究科 養輪 眞

ボロメータ (bolometer) とは語義的には「熱量計」のことである。放射線と物質の相互作用によって物質に与えられたエネルギーはその温度の上昇をもたらす。その温度上昇を知ることによって放射線を検出しようというのがボロメータの原理である。わずかなエネルギーで検出可能な温度上昇を起こさせるにはエネルギーを吸収させるべき吸収体の比熱を小さくする必要がある。絶縁体などの電子比熱の無視できるものでは比熱 C はデバイ温度 Θ_D により $C \propto (T/\Theta_D)^3$ となり、絶対温度 T を下げるに従ってどんどん小さくなってゆく。実際のボロメータは極低温装置を使って数百 mK ないし数十 mK に冷却して使用される。

通常の放射線検出器と比較して、ボロメータにはいくつかの質的に異なる特徴がある。まず、通常の検出器では放射線によって付与されたエネルギーのごく一部が電荷キャリアの発生に使われるのでポアソン統計によるキャリア数の揺らぎによって分解能が制限されるが、ボロメータではこの制限がない。もうひとつの特徴は、比熱の小さいものであればどんなものでもボロメータの吸収体として利用できるということである。これは、従来の検出器では検出器を構成する物質はシンチレータや、半導体、特殊なガスなどの特定の物質に限られていたことと比べると検出器材料の多様性がひろがったことになる。

これらの特徴を生かして、多方面での応用が考えられ、また実際に用いられている。まず、もっとも古くから使われているのは宇宙物理学のマイクロ波背景輻射や赤外線計測分野である。ただし、これらは光子を一個ずつ検出するのではなくエネルギーを時間的に積分して直流的に計測しているので狭義の放射線検出器とはいえないかも知れない。

比較的新しいのは、X線天文学、原子核物理学、生物学、表面科学等の分野での高分解能 X線計測への利用である。有感面積は比較的小さくて 1 mm^2 からせいぜい 1 cm^2 程度に過ぎないが、エネルギー分解能 10 eV 以下を達成するものが出来ている。

もっと大きなものでは、稀にしか起きない事象を検出するために質量が数グラムから、数百グラムのものが開発されている。この方面の応用では、多様な物質を検出吸収体に使えるという特徴が生かされている。ニュートリノの質量を間接的に測定する二重ベータ崩壊の半減期測定実験では二重ベータ崩壊をする可能性のある元素を含む物質でボロメータを作っている。また、宇宙の質量の大部分を占める暗黒物質の直接探索実験では、暗黒物質の有力候補である超対称性粒子に対して反応断面積の大きい、核スピンをもつ原子核を含む物質を吸収体に使っている。後者の場合、複数のボロメータを使って総質量 1 kg 程度のものが必要とされている。

多少変わったものでは、従来から使われている半導体ゲルマニウム検出器を極低温に冷却して同時にボロメータとして使うことが成功している。半導体ゲルマニウム検出器では、 γ 線や電子に対する応答と α 線などの重粒子線に対する応答が異なっていた。すなわち、後者の場合には重粒子クエンチングのせいで単位エネルギー当たりの電荷出力が前者の場合よ

りも小さい。これに対してボロメータではこのような応答の違いがないので、両方の情報を同時にとることによって粒子識別が可能になるというわけである。

ボロメータを作る際に重要な要素は温度変化を検出する温度センサーである。良く使われるのは半導体サーミスタであるが、溶かし込みによる不純物ドーピングの方法は均一性が悪くて極低温ではあまりうまく働かない。そこでイオン注入によるドーピングや、原子炉での熱中性子照射による Neutron Transmutation Doping (NTD) 法が行なわれている。また、常伝導 - 超伝導転移点の近傍では抵抗値が温度によって急峻に変化することを利用した転移温度計も使われている。この場合には温度計として使用する物質によって決まる臨界温度近傍でボロメータを使わなければならないという制約があるが、近接効果を利用して臨界温度を調整することも行なわれている。

ボロメータ自体は超伝導とは関係ないが、極低温環境を利用した新しい特徴を持つ放射線検出器として今後応用がひろがるものと期待されている。

3.3 準安定超伝導粒子検出器の開発

R&D of a Low Temperature Detector using Superheated Superconducting Granules

神戸大学	戎 健男
Kobe University	Ebisu Takeo
東京情報大学	渡辺 正
Tokyo University of Information Sciences	Watanabe Tadashi

§1.はじめに

素粒子的宇宙物理学においては、暗黒物質、太陽ニュートリノ、モノポールなどの検出が焦眉のこととなっており、型にはまらない新しい原理に基づいた検出器の開発が刺激されている。従来使われてきた検出装置よりもエネルギー感度の良いものが要求され、新しい検出器では1eV~1000eV領域のエネルギーの測定が念頭におかれている。このような低エネルギーの領域(<1keV)では、検出部を横切る粒子によって失われるエネルギーを熱エネルギーに変換して観測する手段がとられることが多い。この場合、検出器中には $\Delta T = \Delta E / C$ だけの温度上昇が生じる。 ΔE は粒子のエネルギー損失、 C は検出部の熱容量である。低温では熱容量が非常に小さくなるので、小さいエネルギー損失でも超伝導現象やボロメータ的方法で十分測定しうる信号になる。通常の物質内のイオン化(~20eV)や半導体内の励起(~1eV)と比較してクーバー対を壊すエネルギーが~1meVと非常に小さいので、超伝導を利用する粒子検出器は特に注目されている。必然的にそのようなデバイスで極端に低いエネルギーしきい値やエネルギーの高分解能が期待される。¹⁾

Superheated superconducting granules (SSG)²⁾、Superconducting strip、Superconducting tunnel junctions、Transition-edge detectors、Bolometer、Rotons in superfluid heliumのような多くの異なるデバイスが活発に研究されている。この分野の進歩は過去6回のInternational Workshop on Low Temperature Detectors for Neutrinos and Dark Matter (LTD)のproceedingsに詳しく述べられている。³⁻⁵⁾

SSGの開発研究の現状を最近の開催されたLTD6の結果も踏まえて述べる。以下SSGの検出原理(§2)、 γ 線、中性子線に対する応答(§3)、SSGのフリップフロップ(§4)、暗黒物質検出器(§5)の順に述べる。

§2. 準安定超伝導粒子による暗黒物質検出の原理⁶⁾

準安定超伝導相にある金属粒子に外部から適当な刺激を与えると、非可逆的に常伝導相へ移行する。その過程としては「磁氣的」、「熱的」の二つが可能である。以下では熱的過程だけをとりあげる。金属微粒子内の原子と入射粒子との相互作用が金属粒子の温度変化 ΔT を引き起こし、微粒子は超伝導状態から常伝導状態へ相転移する。微粒子の温度変化 ΔT は

$3\Delta E/4\pi C\rho R^3$ で与えられる。ここで ΔE は微粒子内での入射粒子のエネルギー損失、 C は比熱、 ρ は密度、 R は微粒子の半径。相転移に伴うマイスナー効果の消失による磁束変化をピックアップコイルで検出する。外部磁場を H 、ピックアップコイルの直径を D とすれば磁束変化 $\Delta\phi$ は HR^3/D で与えられるから、信号電圧 ΔV は $\Delta\phi/\tau$ となる。 τ は微粒子の転移時間で外部磁場が微粒子の中心まで侵入するのに要する時間である。この侵入時間は微粒子表面に流れる渦電流の減衰時間と関係しており、 R^2/ρ で与えられる¹⁰⁾。ここでは ρ は微粒子の常伝導状態での抵抗率である。典型的な転移時間は直径数十ミクロンの微粒子の場合、数十ナノ秒である。第1種超伝導体はsuperheating (Hsh)、supercooling (Hsc) の二つの性質があり(図1)¹¹⁾、HshとHscとの間の領域で微粒子は準安定状態にある。微粒子自体は入射粒子に対する標的であると、同時に検出器でもある。微粒子の相転移に必要な蓄積エネルギーは微粒子の大きさ、物質、動作温度、外部磁場等によって決まる。

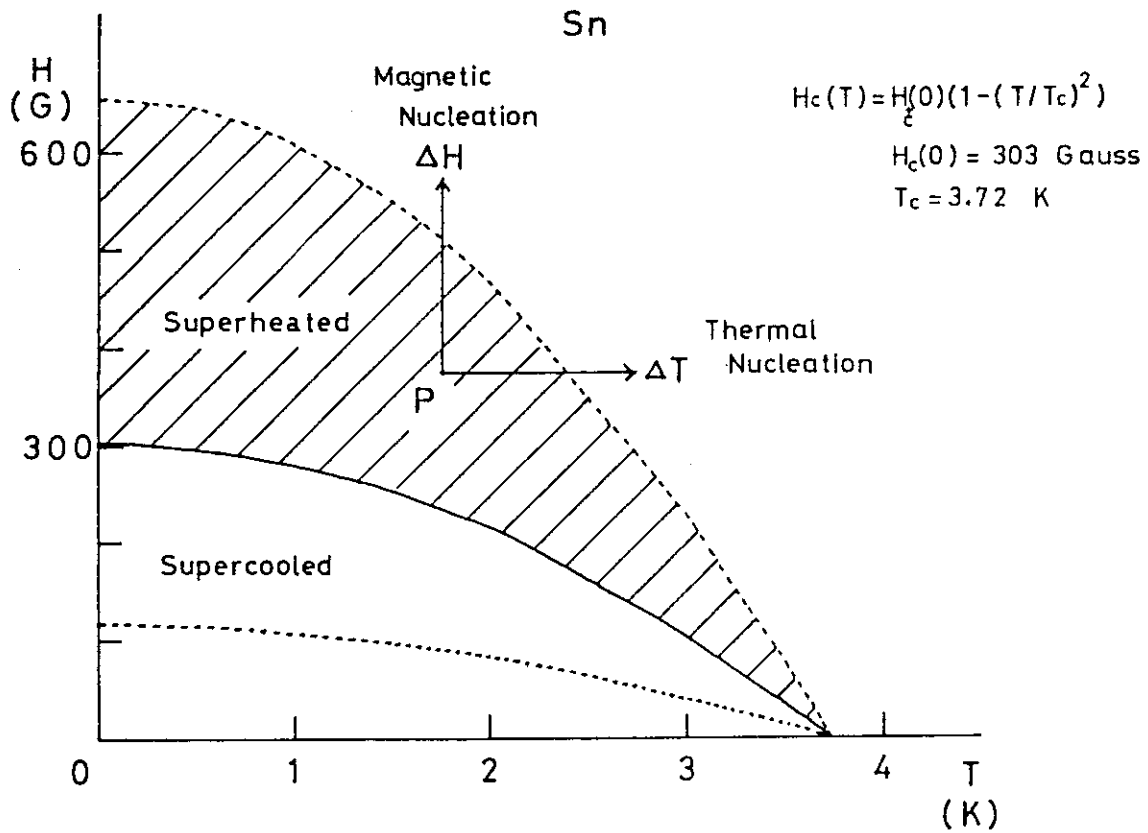


図1. 錫の温度-磁場相図の模式図

原理的にSSG検出器は、蓄積エネルギーがある設定されたエネルギー値を越えるときのみ相転移をおこし、それを信号としてとらえる。即ち設定エネルギーが5keVならば、10keVでも50keVでも同じ信号が得られる。しかし微粒子に蓄積されたエネルギーの大きさを直接的に測定する可能な機構はフリップ・フロップである¹²⁾。微粒子が温度 $T < T_c$ 、外部磁場 $H < H_{sc}$ の相図内に置かれているならば、十分なエネルギーの蓄積によって、粒は加熱され、準安定状態

になり、そして遂には常伝導状態へフリップする。相転移後、粒は周辺の物質に熱を放出し、自からは冷える。粒が初めの動作温度まで冷却されるとき、超伝導状態にフロップするであろう。粒のフリップとフロップとの信号の間の経過時間が粒に蓄積されたエネルギーの目安を与える。最近の進展については後で述べる。

ニュートリノあるいは暗黒物質候補（いわゆるWIMPs）に対して考えられている検出の原理は金属粒の原子核とのコヒーレントな中性カレント相互作用（coherent neutrino-nucleus scattering）に基づいている¹²⁾。核の反跳エネルギーは熱になり、粒の相転移を引き起こし、ピックアップコイルに信号を生み出す。暗黒物質などは一つの粒をフリップするが、荷電粒子は多数の粒のフリップを引き起こすので両者の信号は識別される。このような特徴は宇宙線、コンプトン散乱、取り囲む材料内に含まれる放射線物質などによるバックグラウンドを排除するために有効に使い得る。

コヒーレント・ニュートリノ-核子散乱（coherent neutrino-nucleus scattering）の断面積は標準電弱モデルから計算される¹³⁾。微分断面積は $d\sigma/d(\cos\theta) = G_F^2/8\pi \cdot [Z(4\sin^2\theta_w - 1) + N]^2 E^2 (1 + \cos\theta)$ と与えられ、 Z は原子核中の陽子の数、 N は中性子の数である。パラメータ $\sin^2\theta_w \sim 0.22$ (θ_w は弱い相互作用のWeinberg角)と $G_F = 1.166 \times 10^{-5} \text{GeV}^{-2}$ (弱い相互作用のFermi結合定数)とに対して、その断面積は $\sigma \sim 0.42 \times 10^{-44} N^2 E^2$ (cm^2)となる。これは N^2 と E^2 とに比例していて、 E はMeVで測った入射ニュートリノのエネルギーである。コヒーレント散乱の条件 $R_A \times \Delta \leq 1$ は、 S_n までの原子と30MeV以下の入射ニュートリノ・エネルギーに対して満たされている。ここで R_A は原子核の半径であり、 Δ はニュートリノから原子核へ移された運動量である。

コヒーレント因子 N^2 の為に、ニュートリノの散乱断面積は例えば太陽ニュートリノ検出で、提案されている逆ベータ崩壊反応の断面積よりも 10^3 、 10^4 ぐらい大きい。かくして、数キログラムの有効質量のSSG検出器は、逆ベータ崩壊に基づく数トンの標的重量の検出器と同程度の頻度で太陽ニュートリノ信号を測れる。SSG検出器のエネルギーしきい値を変えることによって、太陽ニュートリノのエネルギースペクトルが調べられる。基礎におく相互作用が中性カレントである為に、SSG検出器は3種類のニュートリノすべてに感応し、いわゆるニュートリノの振動現象には関係しない。この点でSSG検出器は太陽ニュートリノについて興味深い補足的情報を与えるであろう。太陽ニュートリノ、WIMPsに対するSSGのキログラム当たり、年間期待されるイベント数を表1に示す。

表1. 種々の物質のSSG検出器の1キログラム当りの年間のイベント数

		Al	Sn	Pb
太陽 ν	($E_\nu = 0.3 \text{MeV}$)	2	10	19
WIMPs	($m_\chi = 100 \text{GeV}$)	4×10^{-4}	1.7×10^6	2.2×10^6

この方法の原理的な困難は、原子核が示す小さい反跳エネルギーの検出である。その平均の値は $0.7E^2/A$ (keV) で、 E はMeVで測ったニュートリノのエネルギー、 A は粒の物質の原子質量である。典型的な反跳エネルギーは1eVから1000eVまでにわたっている。またWIMPsにたいする最大の核反跳エネルギー Q_{max} は $2m_x^2Mv^2/(m_x+M)^2$ であり、ここで M は粒の核の質量であり、 m_x はWIMPの質量で、 v はWIMPの速度である。我々の銀河中の目的物とSnの粒との典型的な相対速度として $v/c \sim 10^{-3}$ を仮定すると、1GeVと100GeVとの間の質量の粒子に対して反跳エネルギーは15eVから50keVの範囲にある。

§3. γ 線、中性子線に対する応答

SSG開発の初期には、 α 線(~ 5 MeV)に対する応答が多くの研究で調べられたが、暗黒物質などの検出には数keVの感度が必要である。 α 線に対する応答についてここでは触れないので、LTDの文献を参照してほしい。

(I) γ 線に対する応答¹⁴⁾

(1) 実験装置

実験装置全体の配置の写真を図2に示す。真空容器 (Vacuum can) の中に混合室があり、検出部分の詳細は図3に示してある。直径60 μ mの銅線の20回巻き検出コイルの真中に直径30 μ mの錫粒子1個がワニスGE7031で固定されている。この検出コイルはスタイキャスト1266製の試料ホルダーにセットされている。

試料ホルダーはステンレスパイプで稀釈冷凍機の混合室に接続され、錫試料は液体ヘリウムにつかり、冷却が保証されている。試料ホルダーには超伝導線が4層巻かれており、磁場を印可出来るようになっている。この超伝導磁石に3つの γ 線源 ^{241}Am (各強度0.5 μ Ci \pm 10%) が試料ホルダー内の錫粒子と同一レベルに取り付けられている。図が煩雑になるので、1個の γ 線源 ^{241}Am だけを図3には描いている。この超伝導磁石は600ガウスまで磁場を発生でき、精度は0.1ガウスである。実験に使った手作りの稀釈冷凍機の冷却能力は100mKでは約70 μ Wである。混合室内の温度は挿入してあるカーボン抵抗で計測されている。稀釈冷凍機は連続モード運転したときは、温度20mK以下に安定して保持でき、one shot運転では温度10mK以下が得られる。図2の上部にある2台のSQUIDプローベは標的質量1グラムの検出に用いるために用意されている。

信号を検出する際のブロックダイアグラムを図4に示す。検出コイルに誘起された信号は広帯域増幅器で増幅され、デジタル・ストレージ・スコープに送られ、コンピューターに取り込まれる。得られた典型的な信号を図5に示す。信号の時間的応答は70nsecと早い。

Gas handling system

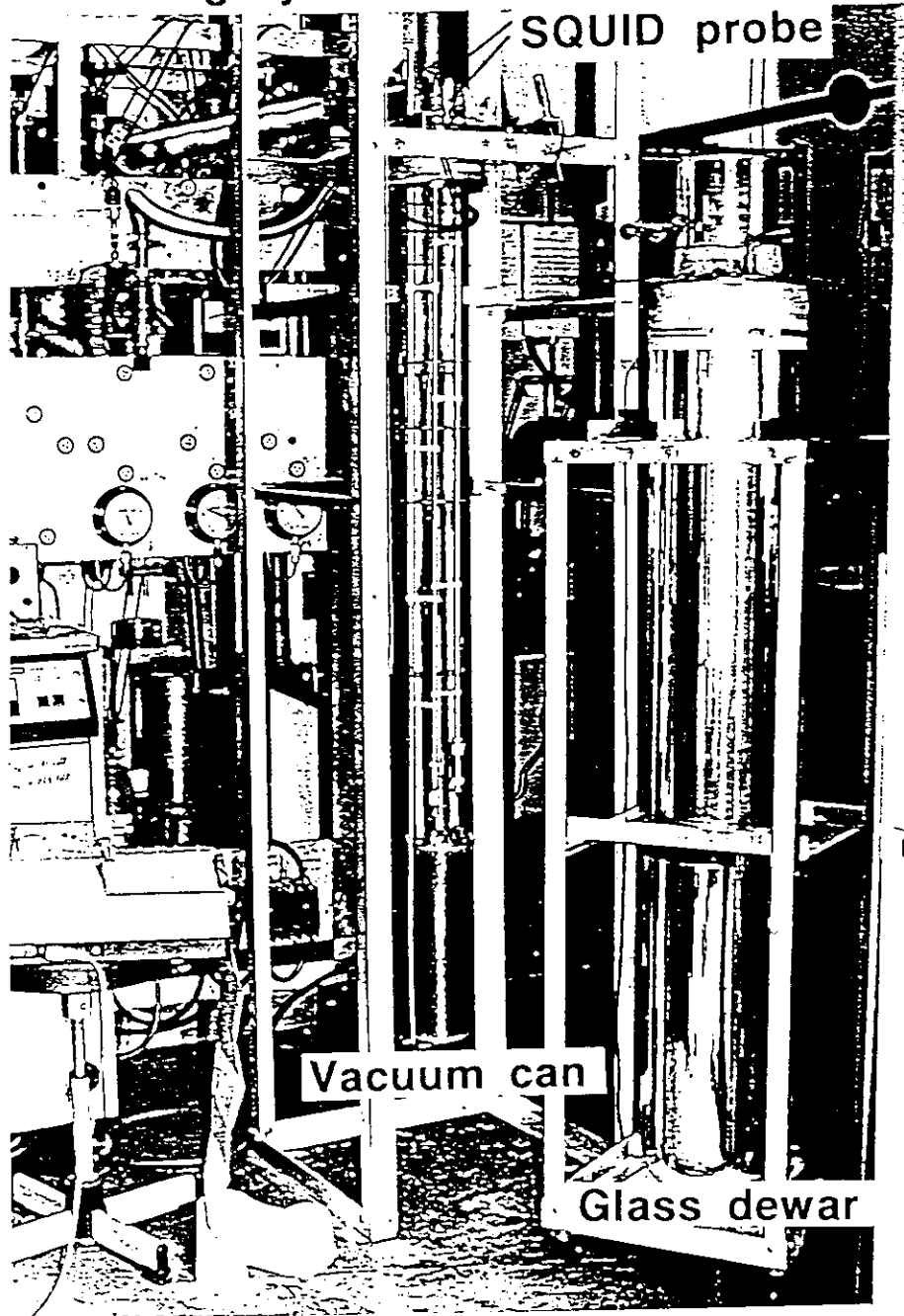


図2. 稀釈冷凍機と実験装置の全体写真

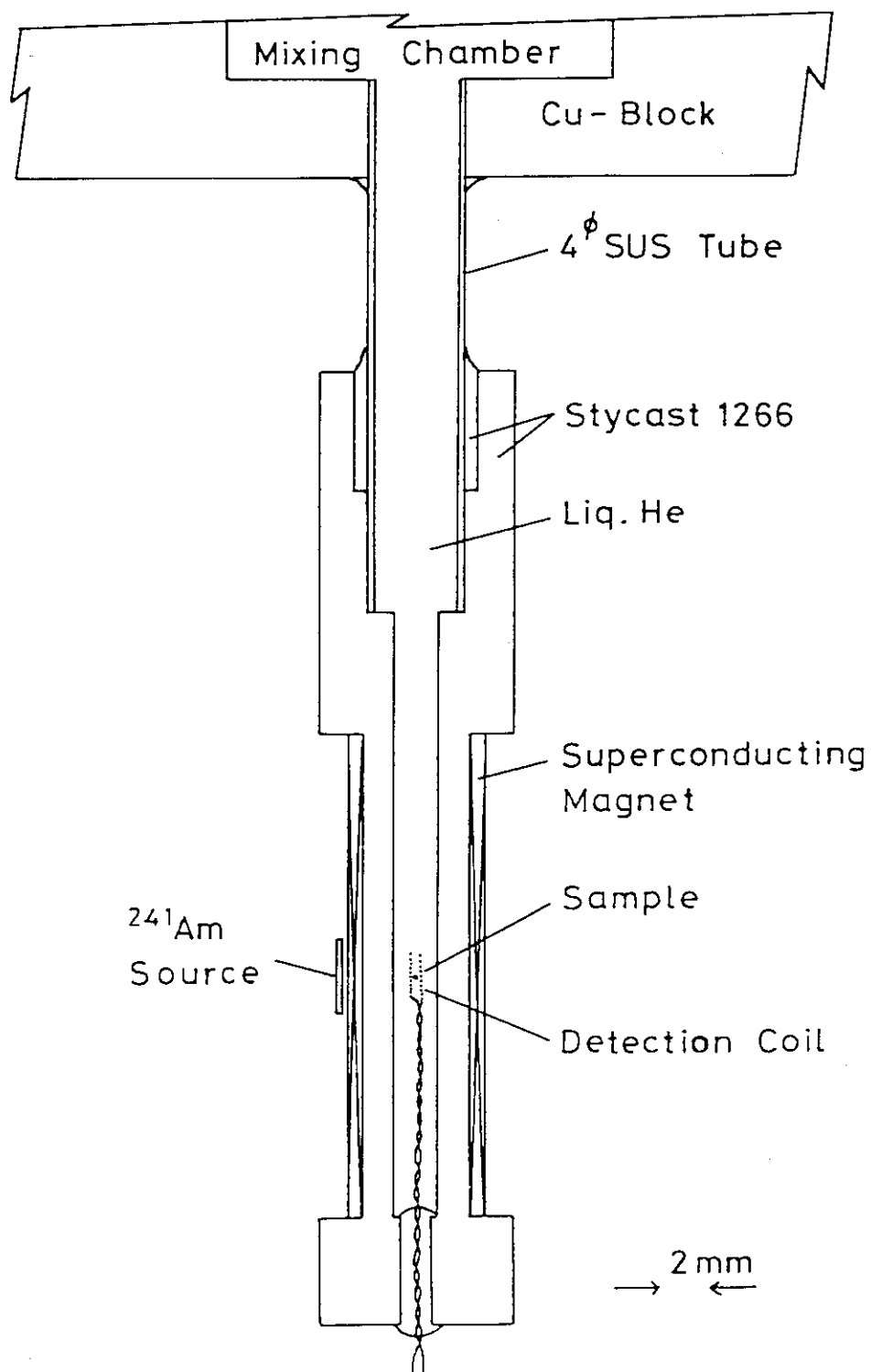


図3. 感度実験の測定装置内部

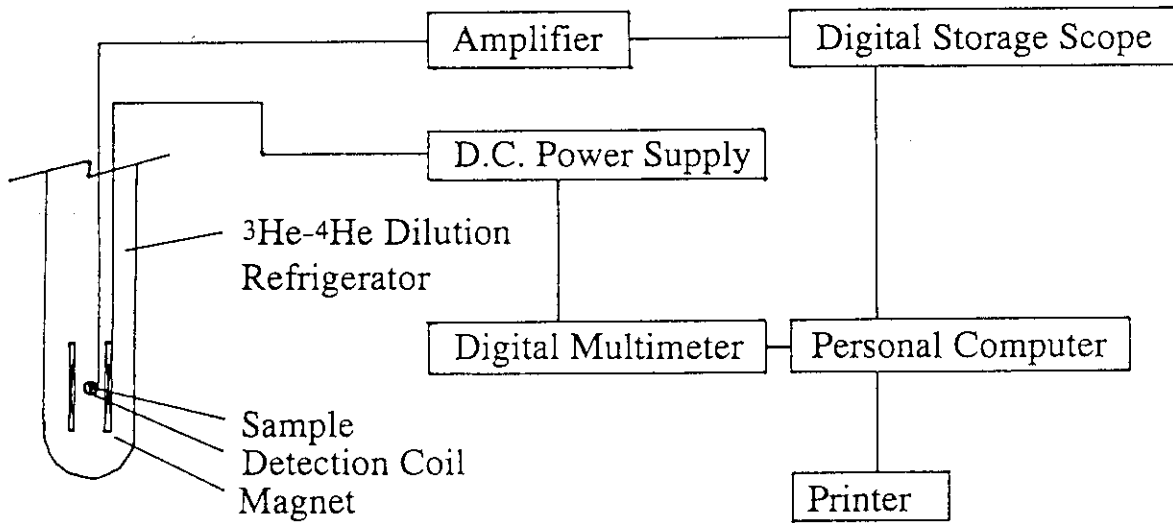


図4. 相変化信号測定のためのブロックダイアグラム

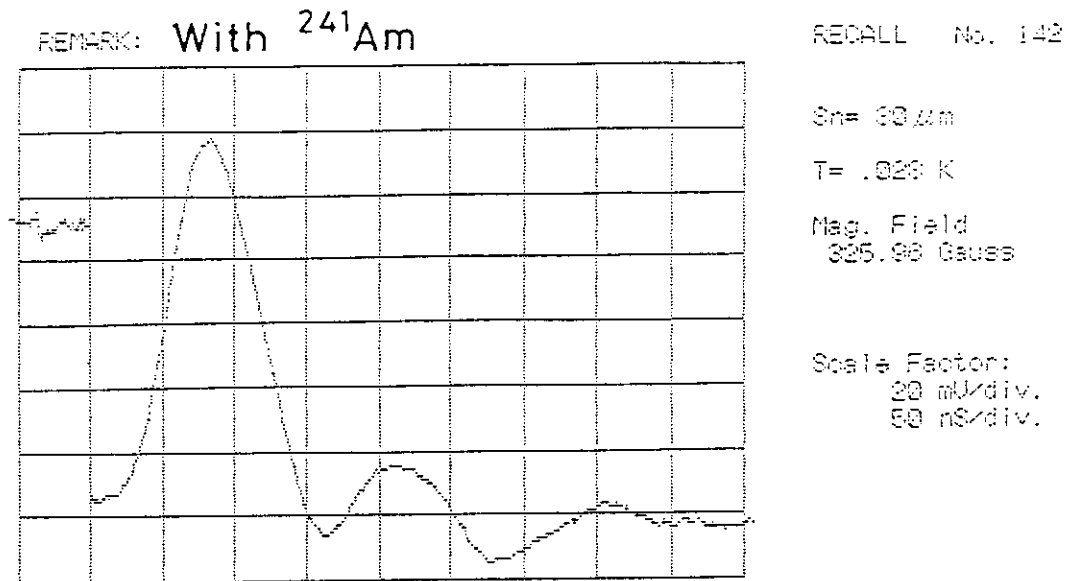


図5. 相変化時に得られた典型的な信号例

(2) 感度実験

初めに、温度30mKから3.0Kの範囲でsuperheating superconducting field $H_{sh}(T)$ を測定した。この場合 γ 線源は取り除いてある。印可磁場が $H_{sh}(T)$ を越える際に記録された信号の典型例は、既に図5に示してある。各温度で数回測定し得られたデータは、よく使われる曲線 $H_{sh}(T) = H_{sh0} [1 - (T/T_c)^2]$ 、 $T_c = 3.72K$ で再現できる。磁場 $H_{sh0} = H_{sh}(30mK)$ の最大値は327.5ガウスで、 γ 線源で照射しているときには約2ガウスだけ小さい値が得られた。

次に、60keVの γ 線に対する応答は温度30mKで臨界磁場 $H_{sh}(30mK)$ より低い10点の磁場で調べた。1時間の間に転移する回数を数えた。つまり、6分間で転移しないときには、印可磁場をリセットし、次の6分間の転移を観測する。リセットする前に一度磁場を325-326ガウスまで上げ、錫粒子が相転移を起こすことを確かめている。このような測定を10点の磁場で行った。1時間に転移した回数を図6に示した。

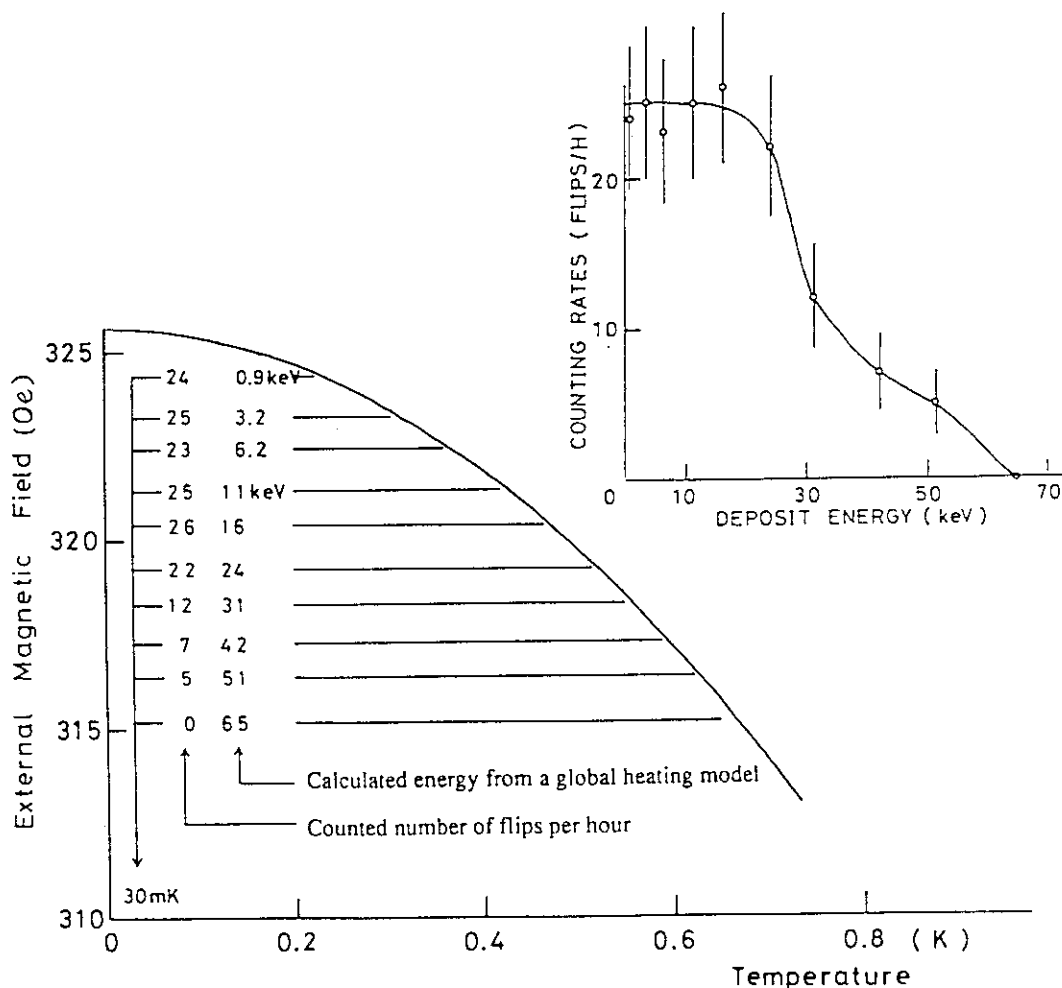


図6. 1時間に転移した回数

(3) 結果と議論

この実験で用いられた放射性同位元素 ^{241}Am は α 線(5.5MeV)と γ 線(11.9keV, 0.78%; 13.9keV, 13.2%; 17.8keV, 18.1%; 20.8keV, 4.9%; 26.3keV, 2.5%; 59.5keV, 35.3%)とを放射している。元々の各線源の強度(0.5 μCi)と放射線が通過していく物質による放射線の吸収とを考慮すると、二次X-線を除き59.5keVの γ 線のみが試料の錫粒子に到達する事が分かる(表2)。このエネルギーの γ 線の初めの強度として、1時間当たり1380個の光子が評価されるが、錫粒子の直径を通過する間に1時間当たりたった32個だけの光子が吸収されることが期待される。59.5keVのエネルギー蓄積で錫粒子の超伝導状態をフリップさせることが出来る限界磁場315ガウスを越えると、フリップの回数は磁場の増加と共に増え、期待されるように最大値に収束する。限界の磁場では相転移を引き起こすには640mKの温度上昇が必要である。超伝導状態の電子、フォノン両方の比熱を用いると、640mKの温度上昇が65keVのエネルギー蓄積に換算され、おおまかに入射光子のエネルギーと一致する。実験結果をうまく説明するためには、吸収されたエネルギーに関するモデル計算で電子、フォノン両方の比熱を取り入れる必要がある。このプロセスのために温度上昇600mKで1桁、200mKの温度上昇では3桁以上感度が悪くなっている。我々の取り扱いSingsaasらの取り扱いと同じである。¹⁵⁾ 図7にこの状況を示している。

表2. 6種類の γ 線の強度

線源 ^{241}Am (0.5 μCi)の初めの強度と実験装置の幾何学的構造を考慮すると、 γ 線の初めの強度(I_0)は23光子/分と算定される。 γ 線は表に示したように6つのエネルギーE (keV)と殻相対強度(%)をもつ。 I_1 (1/min)は、 γ 線が超伝導磁石のソレノイドコイル(Nb-Ti-Cu)、筒型容器(エポキシレジン)、検出コイル(Cu)を通過したあとの強度を表わしている。 I_2 (1/min)は、直径30 μm の錫粒子を横切ったあとの強度を表わしている。 I ($=I_1 - I_2$)は、その錫試料の中で吸収される光子数の期待値である。

E (keV)	11.8	13.9	17.8	20.8	26.35	59.54
%	0.78	13.2	18.1	4.87	2.47	35.3
I_1 (1/min)	2.7E-21	1.0E-10	2.2E-9	9.8E-7	3.0E-4	4.23
I_2 (1/min)	5.3E-22	3.8E-11	1.3E-9	7.0E-7	2.5E-4	3.69
$I=I_1-I_2$	2.2E-21	6.2E-11	0.9E-9	2.8E-7	0.5E-4	0.54

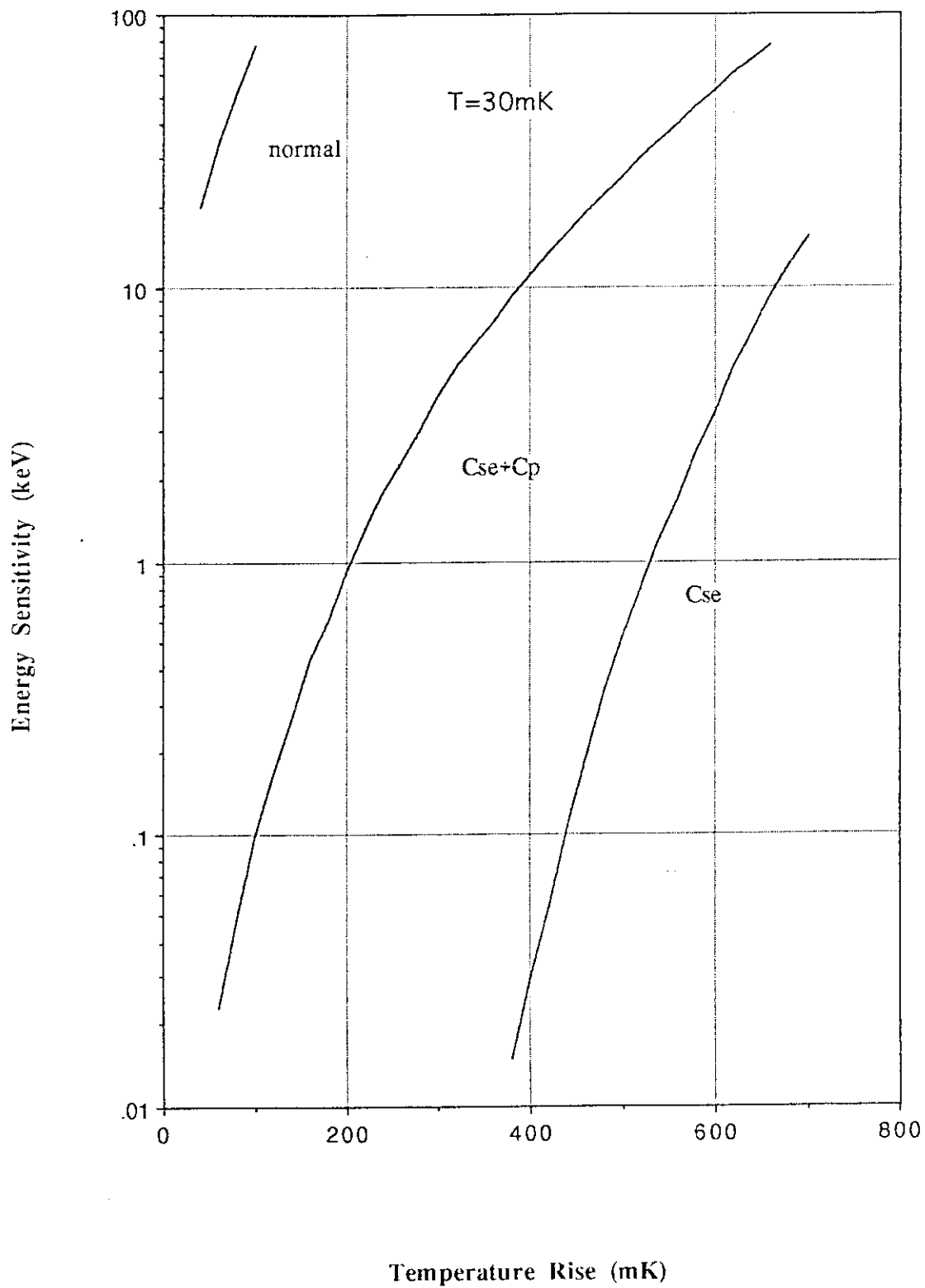


図7. 直径30 μ mの錫球の温度上昇と感度

上述の方法で算出したエネルギー蓄積を横軸にプロットしたのが図6である。得られた結果は、励起エネルギー準位を越えるエネルギーを獲得した種々の電子からの加算的な寄与から成っていると考えられる。1時間当りに吸収される60keVの光子数は32個と期待されるが、測定された回数は25が最大値である。統計が若干不足してはいるが、5keV当りの蓄積に対する回数を計算した結果を図8に示す。二つのピークを有していて、一つは60keV前後、もう一つは約30keVである。

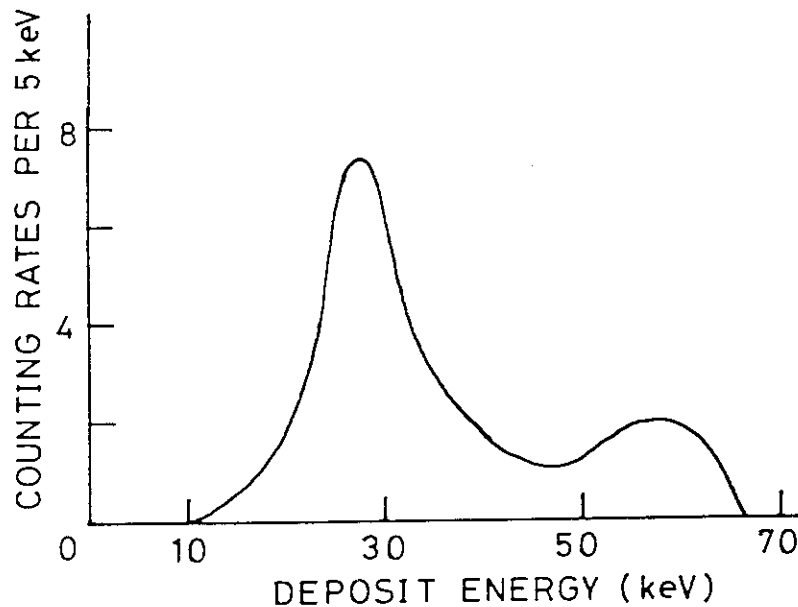


図8. γ 線照射による5keV当りの転移粒子数

γ 線の吸収過程としては、第一近似ではK殻とL殻の光電効果のみを考慮すれば充分である。L殻の空孔を埋める際に生じる二次X線(4keV)は励起されたL殻電子と共に60keVピークに寄与する。一方、K殻の空孔を埋める際に生じる二次X線(25keV)の20%はL殻電子を励起し、最終的には60keVピークに寄与する。残りの80%は錫粒子には吸収されずに通過してしまうであろう。従って、後のピーク(30keV)はK殻から励起された電子が25keV以上のエネルギーをもって、抜けていくような過程でつくられる。二つのピークに対応する回数の割合は、60keVの光子に対するK殻とL殻の吸収係数を用いると2対1と計算される。測定された割合は3対1程度である。統計精度を上げることによって、この食い違いは是正されることと考えられる。

ここで得られたもう一つの重要なことは、30 μ m粒径の錫粒子で1keV(図6)のエネルギーを測定できることを確認したことである。

(II)中性子に対する応答¹⁶⁾

暗黒物質の検出に重要な中性子にたいする応答はスイスのベルン大学のPretzlらのグループによる実験を簡単に紹介する。

SSG検出器は直径4mm、長さ10mmの円筒形である。使用されている錫粒子は大きさが20~

25 μm で、5~50 μm の Al_2O_3 の粉末に混ぜ合わされている。動作温度は120mKである。信号の検出はピックアップコイル方式で、室温の増幅器で処理している。プロトンビームをBe標的に当てて、平均エネルギー70MeVの中性子ビームを発生させ、SSG検出器に入射している。SSGで散乱された中性子は中性子ホドスコープで測定され、SSGの信号とホドスコープの信号とのコインシデンスを測定し、中性子による信号を明確に示している。中性子の強度は $\sim 3 \times 10^5$ 個/cm²secと強く、唯1個の錫粒子の転移の信号以外にも2、3個の錫粒子が転移した信号も観測されている。核の反跳エネルギーによるSSGの転移の検出を確立した重要な仕事である。

§4 フリップ・フロップ現象に関する実験¹⁷⁾

この現象の実験的確立はSSGにとってリアルタイムで入射粒子のエネルギーを決定できる途を開くので非常に重要な事である。我々は結果的に成功しなかったが、スイスのベルン大学のグループはその検証に成功した。我々の実験を述べた後、ベルン大学で行われた実験について述べる。

(1) 実験装置

フリップ・フロップ現象を利用して、蓄積されたエネルギーをオンラインで測定する原理は既に§2に述べてある。実験に用いた試料の大きさは20 μm で、得られた相図を図9に示してある。相図から分かるように、温度を下げればエネルギーの大きな放射線源が必要になる。我々は²⁴¹Amの α 線を用いるので、実験温度としては液体ヘリウム温度で充分である。 α 線源はガスヘリウム中に置かれ、試料との距離を変えることによって、 α 線のエネルギーを制御している⁹⁾。今回実験での α 線のエネルギーは約4.7MeVで、試料と α 線源との距離は約300 μm である。信号の検出部分は図4と同様である。ただ稀積冷凍機の部分が、通常の液体ヘリウム用のガラス容器になっている点が異なるだけである。

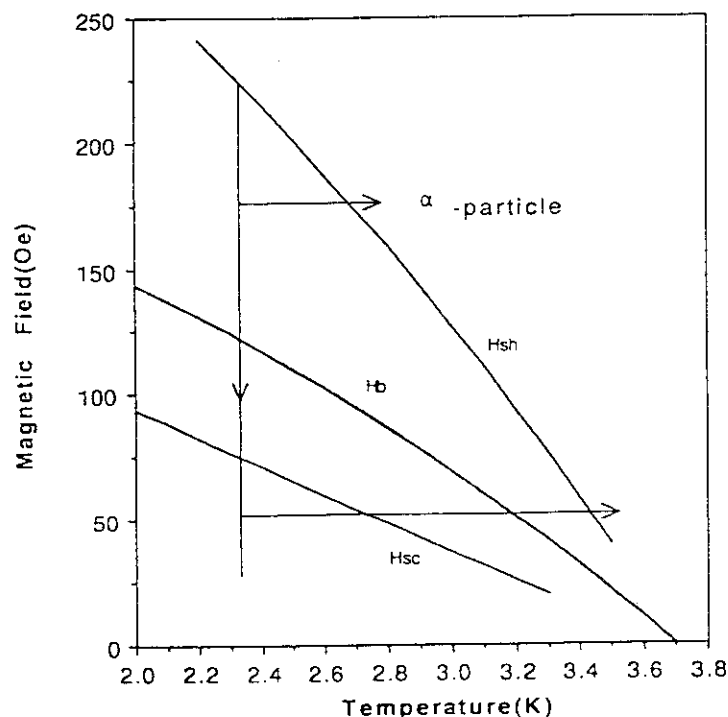


図9. 粒径20 μm の錫粒子の温度-磁場相図

(2) 結果と議論

図9のsuperheatの曲線(Hsh)を実験的に定める方法は、温度を一定にしたまま、磁場を徐々に増やしていき、錫試料が超伝導状態から常伝導状態へ転移する磁場の値を測定する。同じことを温度を変えて実施すれば得られる。supercoolの曲線(Hsc)は、一度試料を転移させた後、徐々に磁場を下げて行き常伝導状態から超伝導状態へ転移する磁場の値を測定し、このことを温度を変えて行うことで得られる。曲線Hbはバルクの臨界磁場の温度変化を示している。

次に温度(2.317K)を一定にして、磁場をある値(175ガウス)に固定して、 α 線を錫試料に照射すると、錫試料が温度2.68Kまで加熱されて曲線Hshを越えるところで常伝導状態へ転移する。この時に得られる信号の大きさを図10に示してある。 α 線を照射せずに、磁場だけで転移させたときに得られた信号の大きさも併せて載せてある。この磁場だけの場合には、例えば温度2.68Kにセットしておき、低い磁場から175ガウスまで増強したときに得られる信号である。従って本来この二つの信号の大きさは同じである筈のものである。ところが得られた信号の大きさに相違がある。これは試料が加熱される過程が異なるためと考えられる。

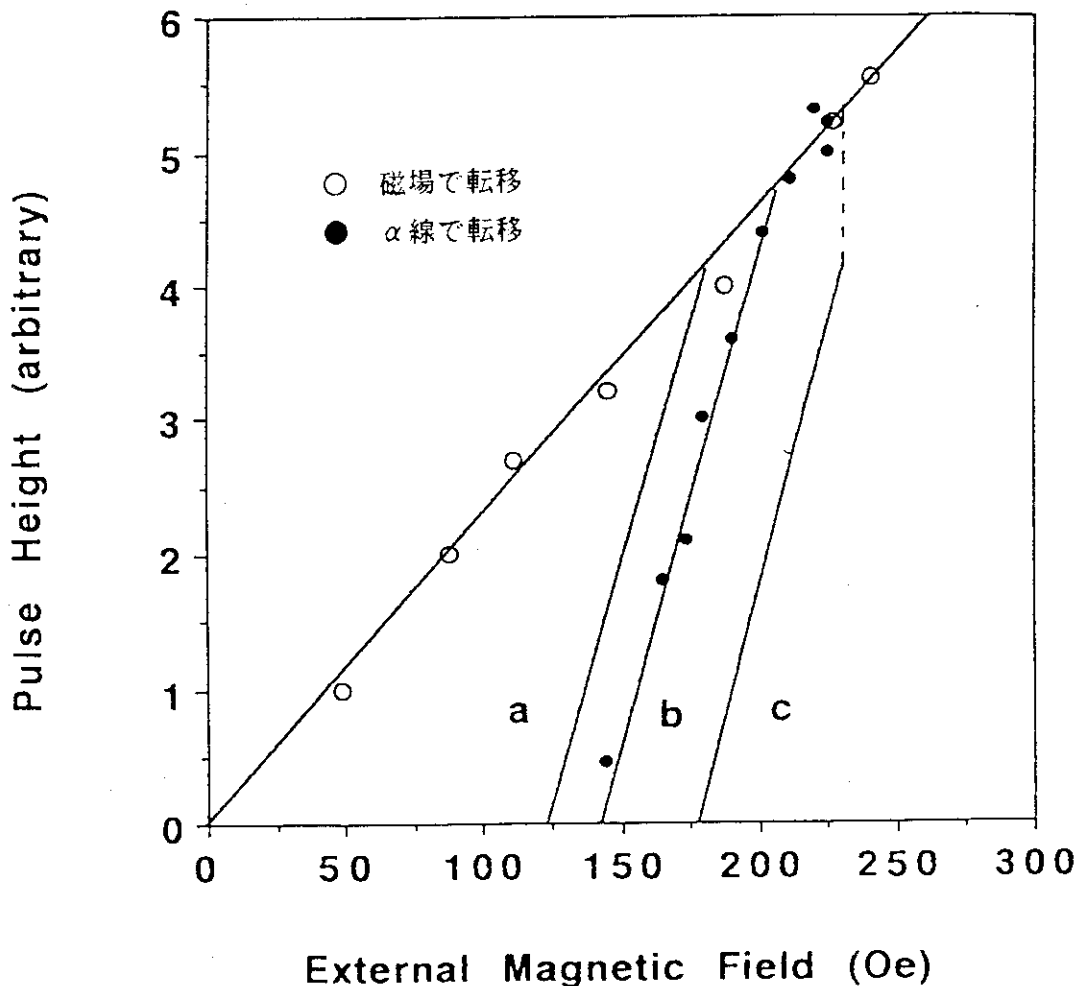


図10. 磁場だけで転移させた場合の信号の大きさと
 α 線照射で転移させた場合の信号の大きさの比較

磁場を増やして行って得られる信号は、試料全体が加熱されて転移する場合に対応し、転移時の錫試料全体の温度は2.68Kと考えられる。一方、 α 線を照射して得られる信号は試料が局部的に加熱されて転移する場合の信号に対応する。つまり、錫試料の表面の一部が温度2.68Kになり、一部分が常伝導状態へ転移し、試料が準安定超伝導相であるために結局試料全体が常伝導状態へ転移する。この時、試料全体の温度は2.317Kの近傍の値に留まる。

もしもそうであれば、図11に示すように試料の磁化曲線に大きな違いが生じる。温度2.317Kの磁化曲線（ α 線照射）と温度2.68Kの磁化曲線（磁場だけ）とから、常伝導状態へ転移する際に得られる信号の大きさに差が出るのが理解できる。図11からまた、 α 線照射の場合には、ある磁場の値以下では信号が出ないことも理解できる。フリップ・フロップの信号の最初のフリップの信号さえも出ない事が判明した。

以上の議論は α 線が試料の赤道部分に入射した場合に対応している。 α 線源と試料との距離は300 μ mで、且つ線源の表面が金箔で覆われていることから、最高エネルギー（4.7MeV）近傍の α 線は試料に対して並行ビームと考えられる。この場合には、磁場方向からの角度（天頂角）が45度の部分に入射する確立が大きい。図10に示すa,b,cの直線はそれぞれ90度（赤道部分）、60度、45度に対応している。実験結果は約60度を示している。局所加熱で45度からのズレは完全な局所的加熱ではなく、試料のかなりの部分が加熱されていたと解釈している。

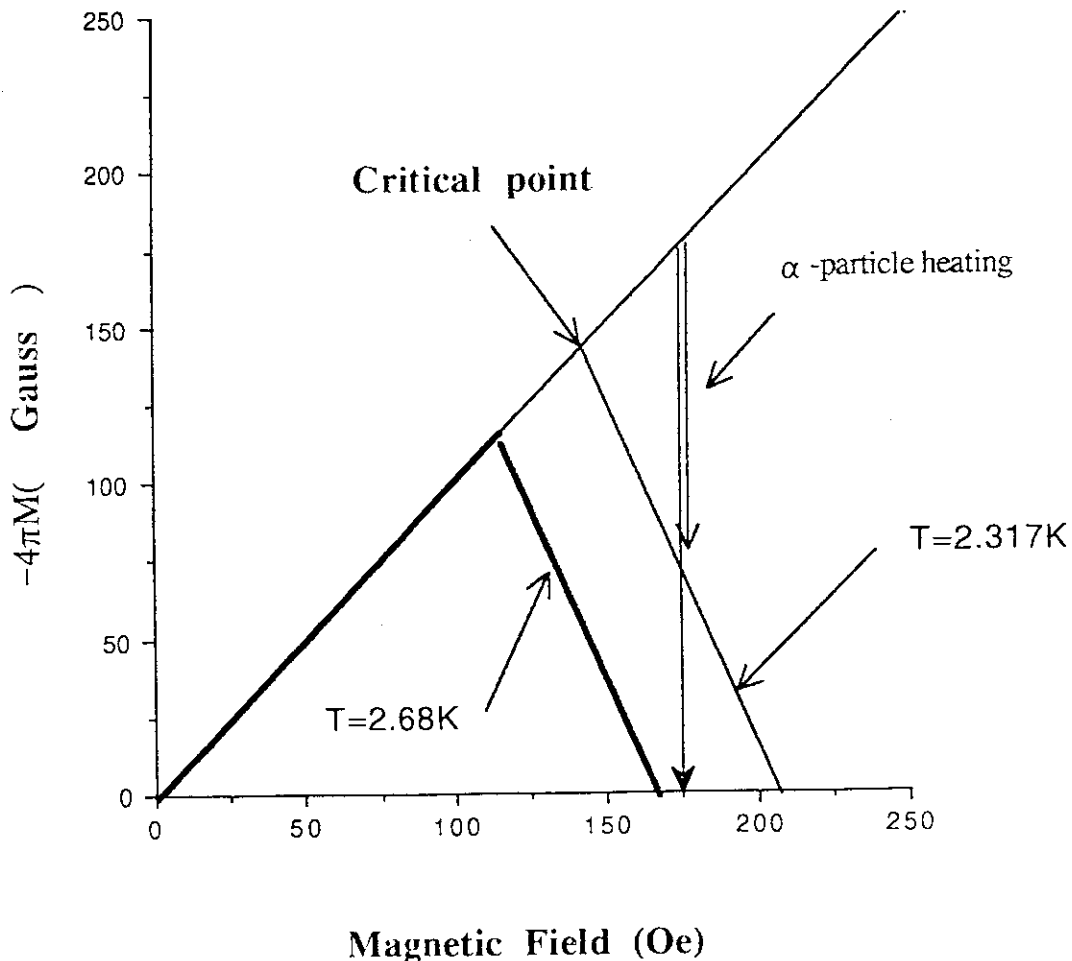


図11. 二つの温度（2.317、2.68K）での磁化曲線

図9からは推測出来ないことだが、フリップ・フロップ現象を利用してリアルタイムにエネルギーを決めるには、局所的な加熱で転移する性質を有する試料は不適當である。全体的加熱か局所的加熱かは試料の物性で決まる。一般的にはクーパ-ペアーの電子が入射粒子によって励起され、励起された電子がフォノンを励起する。励起されたフォノンが励起された電子より早く試料中を伝搬すれば、結果として試料全体が加熱されることになる。これまでの多くの研究によれば、アルミニウム、亜鉛は全体加熱の特徴を示し、錫、インジウムは局所的加熱の特徴を示すことが分かっている。

20 μm より小さい試料でフリップ・フロップ現象が観測できる可能性がある。また全体加熱で転移する物質の一つであるアルミニウムで再度実験を行い、フリップ・フロップ効果を検証する必要がある。これが我々の結論である。

(3) ベルン大学の実験¹⁸⁾

α 線のエネルギーは線源をガス中に置きガス圧を変えることによって制御している。錫試料の大きさは直径11 μm である。フリップ・フロップの見事な逆位相の信号を得ている。 α 線のエネルギー2.5MeV、4.6MeVのとき、フリップ・フロップの時間間隔25 μs 、35 μs を得ている。我々は20 μm での結果から錫よりもアルミニウムで調べるべきだと判断し、アルミニウムでの実験準備に切り替えた。11 μm で全体的加熱が局所的加熱を上回るとは思えなかった。恐らくスイスの連中も同じ考えであったと思うが、11 μm で実験を行い検出に成功した。

フリップ・フロップの検証がなされた訳で、よりエネルギーの小さい領域(γ 線)への発展が期待できる。これからのフリップ・フロップに関する研究はアルミニウムを用いた実験が中心になると考えている。

§5. 暗黒物質検出器

粒径30 μm の錫球試料の感度が約1keVであること、中性子にたいする応答が確認されたことで、暗黒物質を検出するための計画が立案、実行される状況になっている。我々の標的質量は1グラムで、まだ暗黒物質の検出器の製作には至っていないが、LTD-6で発表された暗黒物質検出器に付いて簡単に紹介する。

(1) The Lisbon-Zaragoza-Paris Dark Matter Search¹⁹⁾

ポルトガル、スペイン、フランスのグループの計画である。重量は100グラムで、直径0.5cm、高さ5cmの円筒形をユニットとして、77modulesからなる。使用粒径は6 μm で、温度100mKで動作させ、GaAsのFETを使用して、検出感度として100eVを想定している。装置をCanfranc Underground Laboratory(2400mwe depth)に設置。まだ計画段階で、稼動するまでに相当の時間がかかる印象を受けた。

(2) The ORPHEUS Dark Matter Experiment²⁰⁾

ベルン大学を中心とするスイスのグループの計画である。重量は1.2~1.6キログラムで、直径~3cm、高さ~15cmの円筒形をユニットとして、~20modulesからなる。使用粒径は10 μm で、温度50mKで動作させ、Phase Iでは通常のエレクトロニクス、Phase IIではSQUIDを使用する。装置をBern University Underground Laboratory(70mwe depth)に設置。既に希釈

冷凍機は設置されており、準備は順調に進んでいる。このグループは既に13グラムのSSGを数週間稼動させた経験を有しており、1~2年の内に実験結果を発表するものと思われる。

参考文献

- 1) L.Stodolsky: Phys. Today Aug. (1991) 24.
- 2) K.P.Pretzl: Particle World 1 (1990) 153.
- 3) Low Temperature Detectors for Neutrinos and Dark Matter, edited by K.P.Pretzl, N.Schmitz and L.Stodolsky, Springer Verlag (1987).
- 4) Low Temperature Detectors for Neutrinos and Dark Matter II, edited by L.Gonzalez-Mestres and D.Perret-Gallix, Editions Frontieres (1989).
- 5) Low Temperature Detectors for Neutrinos and Dark Matter III, edited by L.Brogiato, D.V.Camin and E.Fiorini, Editions Frontieres (1990).
- 6) Low Temperature Detectors for Neutrinos and Dark Matter IV, edited by N.E.Booth and G.L.Salmon, Editions Frontieres (1992).
- 7) Proceedings of Fifth International Workshop on Low Temperature Detectors: J. Low Temp. Phys. 93 (1993) No.3/4.
- 8) Proceedings of Sixth International Workshop on Low Temperature Detectors, Nuclear Instruments and Methods to be published.
- 9) 戎 健男、渡辺 正: 日本物理学会誌 46 (1991) 106.
- 10) T.E.Faber: Proc. R. Soc. London A241 (1957) 531.
- 11) V.L.Ginzburg: J. Exp. Theor. Phys. (USSR) 34 (1958) 113.
- 12) A.K.Drukier and L.Stodolsky: Phys. Rev. D30 (1984) 2295.
- 13) M.W.Goodman and E.Witten: Phys. Rev. D31 (1985) 3059.
R.A.Flores: in ref.(4) p.103.
- 14) T.Ebisu and T.Watanabe: Physics and Astrophysics of Neutrinos, edited by M.Fukugita and A.Suzuki (1994) 720, Springer Verlag.
T.Ebisu and T.Watanabe: J. Low Temp. Phys. 93 (1993) 455.
- 15) A.Singsaas et al.: in ref.(6) p.83.
- 16) M.Abplanalp et al.: J. Low Temp. Phys. 93 (1993) 491.
- 17) T.Ebisu and T.Watanabe: NIM A to be published.
- 18) M.Abplanalp: NIM A to be published.
- 19) T.Girard et al.: NIM A to be published.
- 20) M.Abplanalp et al.: NIM A to be published.

3.4 極低温放射線検出器の国際的な開発動向 International Topics of Low Temperature Radiation Detectors

日本原子力研究所 片桐 政樹

JAERI Katagiri Masaki

1. はじめに

極低温放射線検出器に関する最新の国際的な研究成果がまとめて発表される第6回極低温検出器 (SIXTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON LOW TEMPERATURE DETECTORS) に関する国際会議に出席したので、会議中で発表された最新の研究成果について概略を報告いたします。なお、本国際会議のプロシーディングは Nuclear Instrument & Method Physics A として1996年のはじめ頃に公刊される予定ですので、詳細についてはプロシーディングを参照してください。¹⁾ また、本報告の最後に日本原子力研究所での超伝導トンネル接合放射線検出器に関する研究状況を簡単に紹介いたします。

第6回極低温検出器に関する国際会議は平成7年8月28日から9月1日までスイスの Beatenberg (Interlaken の近く) で開かれた。この会議は本研究分野で活躍している約20名の国際委員により運営されており今回の開催はベルン大学が担当した。本会議は1987年に第1回がドイツ・ミュンヘンで80名の参加者を得て開かれた後、約2年おきに開催され回を重ねるごとに参加者が増加し今回は170名であった。なお、次回は2年後にドイツ・ミュンヘンで開かれる予定である。

会議では3つのメインテーマであるグラニューウ型検出器、超伝導トンネル接合検出器及びカロリメータ型検出器の順で5日間の日程で発表が行われた。また、ポスター発表は28日及び29日の2日間にわたって発表が行われた。

2. グラニューウ型検出器

グラニューウ型検出器 (準安定超伝導粒子検出器) に関してはポスターを含め8件の発表が行われた。グラニューウ型は超伝導体例えば錫の微粒子を超伝導状態にしておき放射線が入射した際発生する熱により常伝導状態に変化することを利用して放射線検出を行う。開発課題は粒度の小さな粒子の状態変化を如何に検出するかであるが、今回ベルン大学が12 μ mの錫粒子を用い信号増幅系を改良することにより α 線の検出に成功した。Fig.1に本発表の概略を示す。

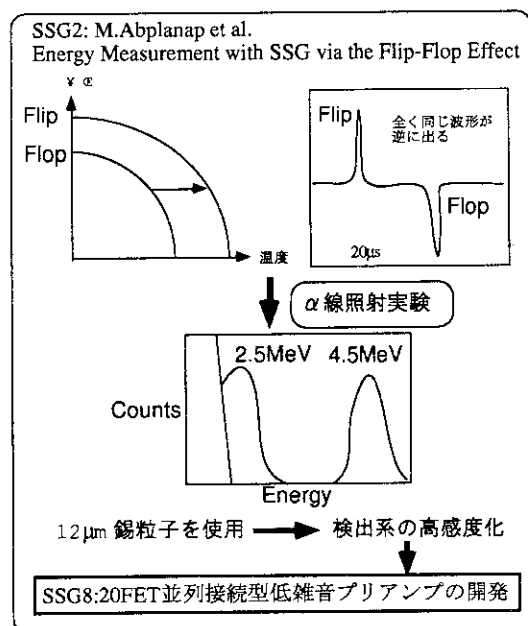


Fig.1 グラニューウ型検出器による α 線検出

日本からは本レポートに報告している神戸大学の戎氏等が発表しLocal heating のリップフロップ効果への影響に関する発表が行われた。

本セクションは回を重ねるごとに小さくなっているとのことである。

3. 超伝導トンネル接合 (STJ) 放射線検出器

超伝導トンネル接合 (STJ) 放射線検出器については口頭26件ポスター12件の発表が行われた。今回の本セクションでの大きなトピックスは米国ローレンスリバモアグループによる高エネルギー分解能STJ検出器に関する一連の発表(全部で5件)である。Al/Al_xO_y/Al層をフォノントラップとして用い信号電荷の増大を図ると共に高速SQUIDを信号検出に用いて低雑音での放射線検出を可能としている。5.9 keV X線に対して29 eV及びパルサーに対して10 eVのエネルギー分解能を得ておりトンネル接合検出器としてはベストデータである。Fig.2に素子構造を示すと共にFig.3に測定されたX線スペクトルを示す。このグループの製作するSTJの動的抵抗が低いことに合致したSQUIDを信号検出に利用したことが高分解能化に寄与している。Fig.4にSQUIDを信号検出に用いた増幅系の構成図を示す。なお、本増幅系については米国メーカーが市販化を図り一般に提供できるよう準備中とのことであった。

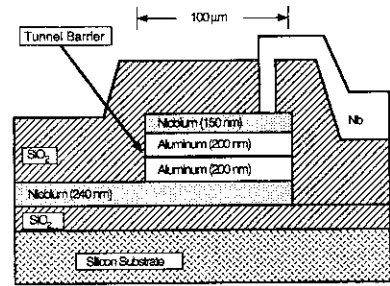


Fig.2 Nb/Al/Al_xO_y/Al/Nb 素子

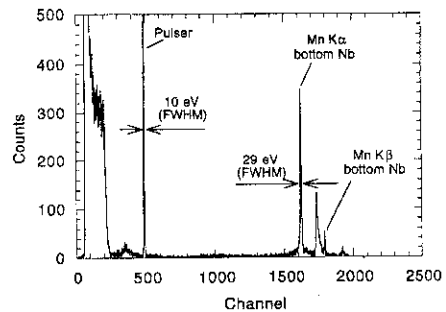


Fig.3 Fe-55のX線スペクトル

X線のアブソーバについてはここ数年 Nb が研究の主流となっていたが Ta の方が X 線に対する吸収効率が高いことから Ta/Al/Al_xO_y/Al/Ta の構造を持つトンネル接合の研究が主流となりつつある。また、トンネル接合の構造として SIS (超伝導体/絶縁体/超伝導体) が主流であったが研究の対象として N

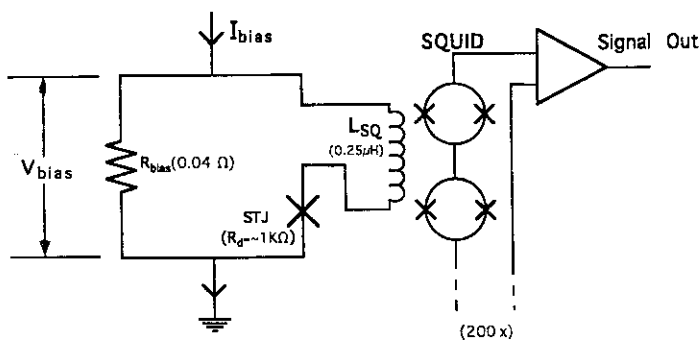


Fig. 4 SQUID 型前置増幅器の構成

IS (常伝導体/絶縁体/超伝導体) がかなり活発に行われ成功しつつある情勢である。Fig.5にNIS構造の超伝導トンネル接合素子の例を示す。新しい超伝導材料としてNbNを用いたNb/Al/Al_xO_y/Nb/NbN接合素子について、本レポートでも報告している電総研の赤穂氏等がナポリ大学との共同研究成果として発表している。

また、最初の会議プログラムにはのっていない
 かったミュンヘングループのバイアス電流により
 トンネル接合素子の出力信号が反転するという追加
 の研究成果の発表については会議出席者から大き
 な関心が寄せられた。Fig.6にその概要を示す。
 素子内のバックトンネリングがその理由と考えら
 れている。

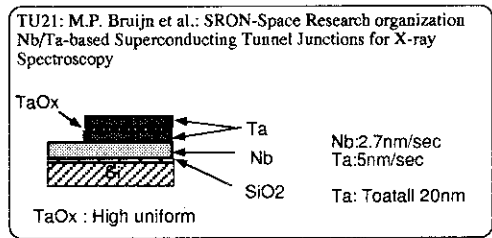


Fig.5 NIS トンネル接合素子

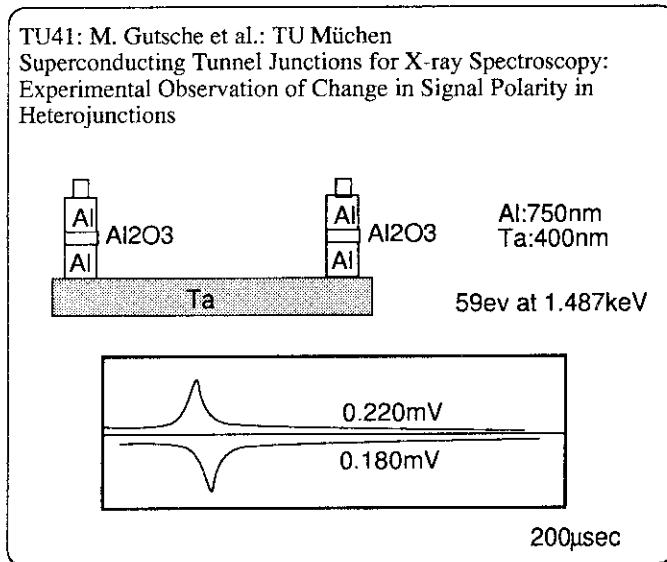


Fig. 6 バックトンネルによる信号逆転

原研での成果「High Resolution X-ray Detection by Nb-based STJ and 4-JFET Low Noise Amplifier」はポスターセッションで発表を行った。4つのJFETを平行に接続し130Kまで冷却した低雑音前置増幅器を開発しNb/Al/AlO2/Al/Nb素子(本レポートで報告している新日鐵・倉門氏製作)と組み合わせて5.9keV X線に対して73eVのエネルギー分解能(本構造の素子ではベストデータ)を得た成果を発表した。Fig.7に開発した前置増幅器のエネルギー分解能のシェーピングタイム依存性についての特性測定結果を示す。

2SK190というFETが最も良い性能を示すことが確認された。また、その理由を確認するため行った前置増幅器の雑音周波数解析結果をFig.8に示す。低周波数領域で良い雑音特性が得られることがわかった。

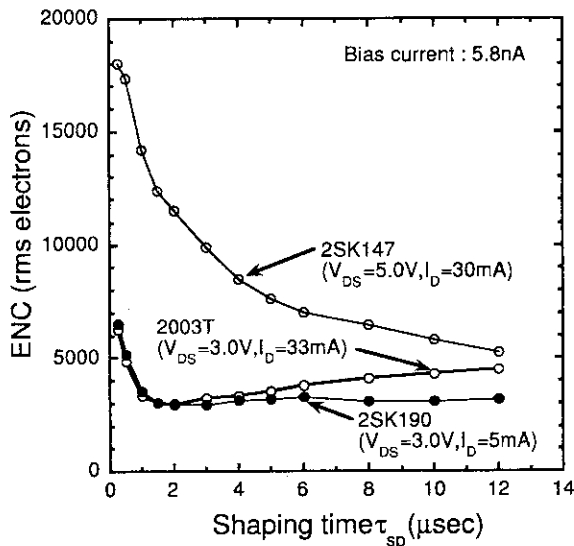


Fig.7 時定数依存性

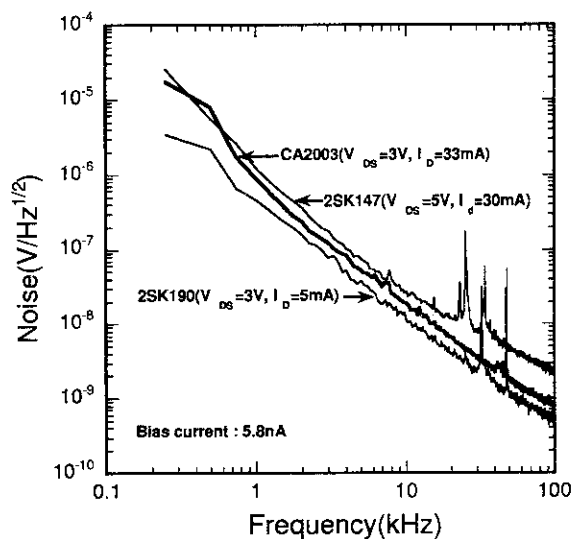


Fig.8 雑音周波数解析結果

4. カロリメータ型検出器

カロリメータ型検出器については、口頭18件ポスター8件の発表が行われた。本検出器については、放射線に対する吸収体の体積を大きくし Dark Matter 検出の実現を図る研究、吸収体の体積は小さいままでエネルギー分解能を改善する研究及び熱を電気信号に変換するサーミスタ素子の研究等が発表された。32gのサファイヤ吸収体とW超伝導膜サーミスタを組み合わせ、1.5keV X線に対して100eVの分解能を得るまで研究が進んでいる。Fig.9に研究成果の概要を示す。検出媒体が大きくなってもしっかり良いエネルギー分解能を確保することが可能な研究状況になってきている。

サーミスタ素子については従来NTD (Neutron Transmutation Doped) Geが使用さ

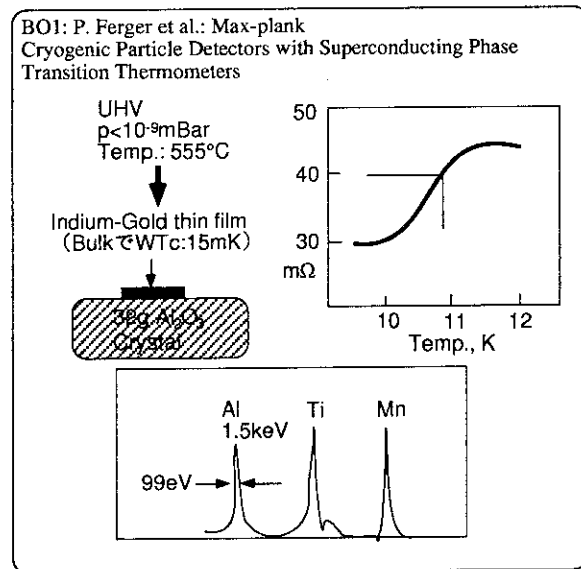


Fig.9 32g サファイヤ吸収体検出器

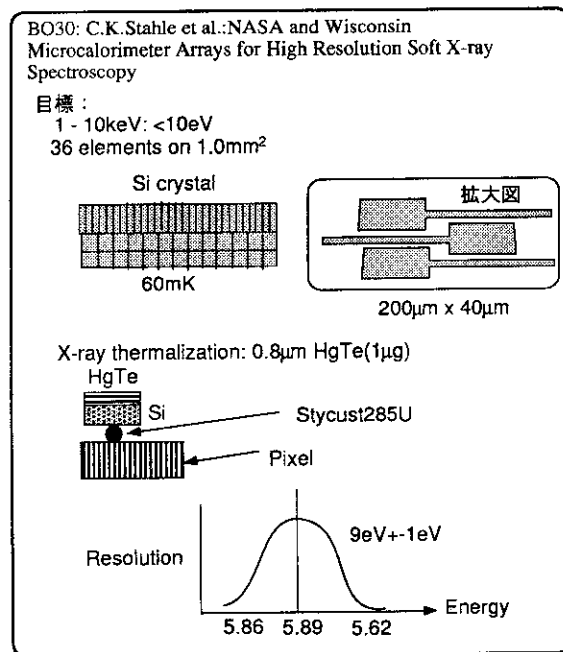


Fig.10 マイクロカロリメータのアレイ検出器

れてきたが、タングステン等の超伝導薄膜を利用した素子の研究が主流となった。薄膜であれば入射位置情報を知る上で不可欠なマルチ素子の製作も可能であるし、低抵抗のため SQUID を用いた低雑音信号増幅も可能なためと考えられる。

また、カロリメータ型検出器を高エネルギー分解能 X線スペクトロスコピーに用いた例としてマイクロカロリメータのアレイ検出器に関する研究成果が NASA 及び Wisconsin 大との共同で発表された。研究成果の概要を Fig.10 に示す。5.9keV X線を9eVの分解能で測定しており現在極低温放射線検出器としては最も分解能が良い成果(同種の検出器で7.3keVが最高)が得られている。

5. 原研での研究状況

原研においては約3年前から超伝導トンネル接合放射線検出素子を用いて実使用可能な高分解能 X線スペクトロメータの開発を進めている。ここで現在の研究状況の概要を簡単に紹介する。

1) 外部から放射線入射可能な検出器

実験現場で超伝導トンネル接合放射線検出素子を用いたX線スペクトロメータを使用するための不可欠な条件として外部からX線を入射できる検出器とすることがある。このため、Fig.11に示す外部入射型He 3クライオスタットを開発した。100 μmのベリリウム窓からX線を入射させることを可能とした構造である。本検出器は0.4 Kまでの冷却に約5時間の冷却操作が必要であり、冷却後約40時間の測定が可能である。

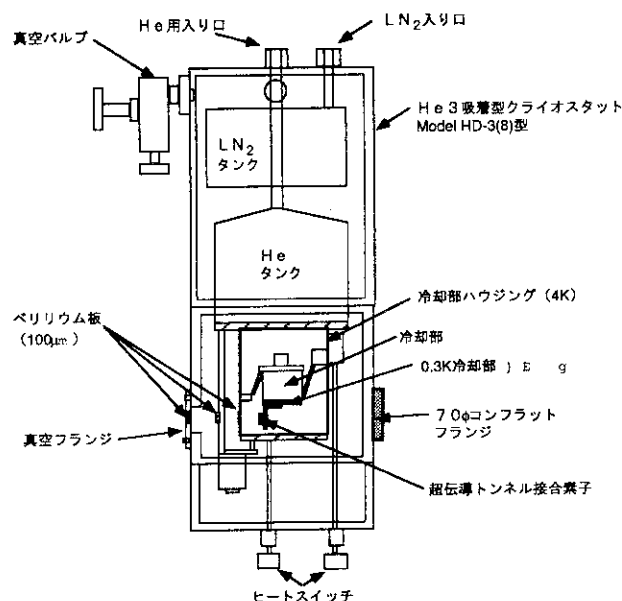


Fig.11 外部入射型He 3クライオスタット

2) 高エネルギー分解能化

本検出器のエネルギー分解能の向上には前置増幅器の最適化が不可欠である。これは、新日鐵製178 μm x 178 μm・Nb/AlxOy/Alトンネル接合素子のキャパシタンスが約2000 pFと非常に大きいためである。このため、上記で述べた前置増幅器により最適化しFig.12に示すように5.9 keV X線に対して73 eVのエネルギー分解能まで改善した。本性能はNbトンネル接合素子としてはベストデータである。また、トンネル接合素子に関連した特性を改善する研究として素子動作条件の最適化がある。詳細な検出特性を測定することにより微分抵抗dV/diが最大バイアス電圧の時に最大のピーク波高値を示しかつエネルギー分解能が最も良いことをなどを見出した。

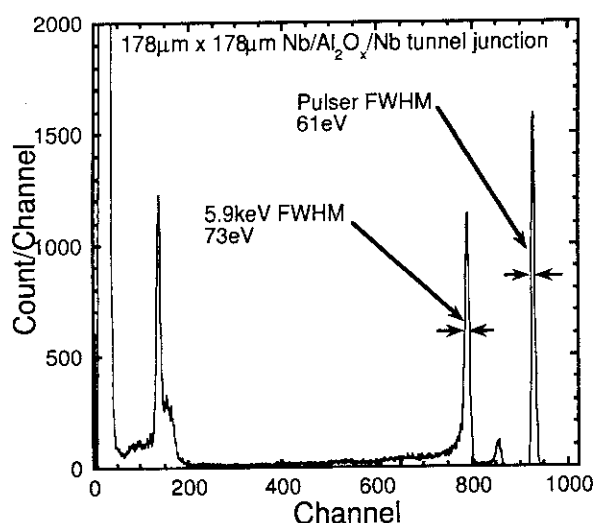


Fig.12 Nb/AlxOy/Al トンネル接合素子によるX線スペクトル

さらに高エネルギー分解能化を図るためには素子自身の検出特性を向上する必要があるため、今後はローレンスリバモアグループ等が採用しているAl trapping法を取り入れたトンネル接合素子の製作を進める必要がある。

3) 検出効率の決定

実験現場で本検出器をX線スペクトロメータとして用いるにはX線エネルギーに対する検出効率を決定する必要がある。このため、X線標準線源を用いた検出効率測定法を確立すると共にX線吸収等を取り入れた理論的検出効率との比較を行い約10%の精度で一致することなどを確認した。

また、本検出器の検出X線エネルギー範囲に関する評価を行うため、高エネルギー研究所の放射光施設を用いて本レポートでも報告している九大グループと協力して15keVのX線エネルギーまでの検出特性を測定した。この結果、15keVのX線を245eVの分解能で測定できることを確認した。この時のX線スペクトルをFig.13に示す。

今後、さらに検出効率を上げるためにはX線に対する吸収効率を上げるためTa等を用いたトンネル接合素子を開発する必要がある。

4) ガンマ線検出

トンネル接合素子をX線検出に用いる場合測定可能なX線エネルギーは限られる。従って、さらに高いエネルギーつまりガンマ線を検出するためには弾道フォノン型検出器を開発する必要がある。このため、今後トンネル接合素子をフォノン検出素子として用いた弾道フォノン型検出器の開発研究に着手する予定である。

以上述べたように原研での研究もやっと軌道に乗ったところであり、今後他の研究機関と協力しながら精力的に研究を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) LT6 proceedings : Nucl. Instr. & Meth., A印刷中

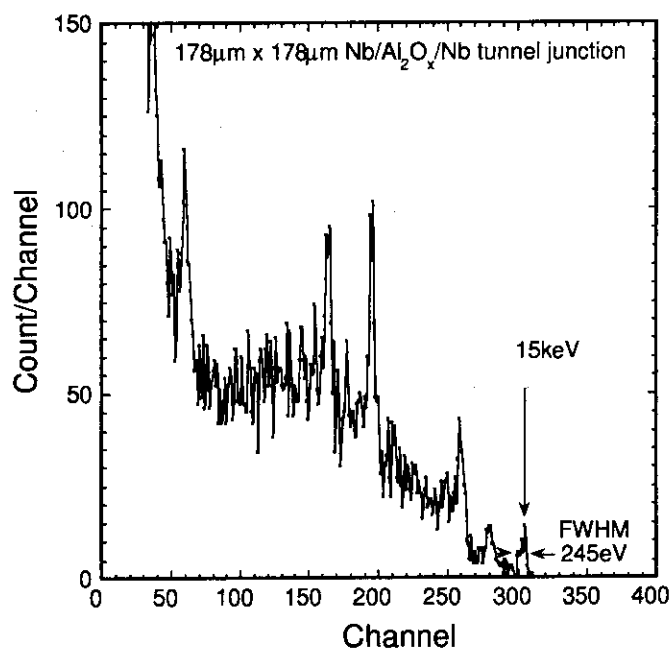


Fig.13 15keV X線スペクトル

3.5 超伝導トンネル接合の諸問題

Some Issues of Superconducting Tunnel Junction for Radiation Detector

電総研 赤穂 博司

ETL Akoh Hiroshi

1. はじめに

超伝導トンネル接合をデバイスに応用する場合、大きくは、クーパー対のトンネル効果であるジョセフソン効果を利用したものと準粒子のトンネル効果を利用したものに分けられる。ジョセフソン効果のスイッチング特性の高速性からコンピュータ素子、アナログ信号処理、A/D変換器、サンプラーなどの開発が進められている。また、磁場に対する高感度性から、SQUID応用があり、高精度性から電圧標準、ポテンショメータなどに応用されている¹⁾。一方、準粒子トンネル効果を利用したデバイスとしては、その高感度性から本研究会のテーマである放射線検出器の開発や、その高速性および非平衡超伝導性²⁾からクイトロンと呼ばれる超伝導三端子素子の開発³⁾が進められ、その高周波性から受信機や増幅器応用に用いられている。

これら種々のデバイスにおいて、その基本要素である超伝導トンネル接合に対して求められる性能は、共通する部分もあるが、異なる点も多い。ここでは、これら求められる性能について述べるとともに、放射線検出器用として研究を進めている超伝導トンネル接合について最近得られた結果を紹介する。

2. 超伝導トンネル接合に対する一般的性能

超伝導トンネル接合に求められる一般的な性能としては、大きなギャップ電圧、大きな V_m 値 (V_m 値は、通常、2mVでの抵抗値にジョセフソン電流を乗じた値であり、接合の品質を表すパラメータとして使われる)、機械的な強度、熱サイクルに対する安定性、臨界電流の制御性や再現性、作製プロセスの柔軟性などが挙げられる。

当初、超伝導トンネル接合の電極材料にはPb合金⁴⁾を用いたものが主流であったが、Pb合金は機械的強度と化学的安定性に乏しいため、LSIレベルの集積回路技術が容易に得られなかった。その後、Pb合金の欠点を克服するため、新たにNbやNbNを電極材料とするトンネル接合の研究が進められた。中でも、Nb/AlO_x/Nb接合⁵⁾は、サブギャップ電圧領域におけるリーク電流が小さいこと (V_m 値が大きい) や、ギャップ電圧における鋭い立ち上がり特性など優れた特性を持つ。因みに、Nb接合の V_m 値は、4.2Kにおいて90mV、Pb合金接合では20mV程度である。

また、制御性や再現性においても、Nb系トンネル接合は、Pb接合に比べて優れた性能を持っている。例えば、ジョセフソン臨界電流 I_c のバラツキに関して、Nb系接合は5%以下であるのに対し、Pb合金接合では20%以上も大きくなる。この素子特性の均一性は、コンピュータ素子などのデジタル応用のみならず、放射線検出器の

アレー化あるいは集積化にとって極めて重要である。以上のような観点から、Nb系トンネル接合が現在、最も信頼できる超伝導トンネル接合として研究開発が進められている。

3. 放射線検出器用トンネル接合

現在、6KeVのX線に対して、Nb/AlO_x/Nb接合を用いた検出器において、エネルギー分解能として88eV⁶⁾が得られており、また、X線を接合の中心部のみに照射することにより、53eV⁷⁾の分解能が達成されている。さらに、準粒子トラッピング層として厚いAl膜をバリアの両面に持つ接合を用いた場合、29eV⁸⁾の分解能(但し、動作温度は0.1K)が得られている。しかし、理論的には、Nb系接合は4eVのエネルギー分解能を持つと期待されており、この分解能はまだ実現していない。

高いエネルギー分解能を持つ放射線検出器用の超伝導トンネル接合に対する性能としては、上で述べた一般的な性能に加えて、(1)ノイズ低減のため、バイアス電流近傍での低リーク電流、言い換えれば、高いダイナミック抵抗をもつこと、(2)放射線照射により励起された準粒子を効率よくトンネルさせるため、高い臨界電流密度を持つこと、(3)接合周辺部における準粒子の再結合や拡散を減少させるため、大きな接合面積を持つこと、(4)動作電圧の安定性のため、ジョセフソン電流やフィスケ共振モードを効果的に減少させる接合形状を持つこと、さらに、(5)より準粒子のトンネル確率を増加させるため、トンネルバリア近傍において準粒子トラッピング構造を持つこと、などが挙げられる。

我々のグループでは、比較的簡便な³Heクライオスタットが使用できる0.3Kを動作温度として、(1),(2),(3)の要求性能を満たす接合の開発を行っている⁹⁾。図1に、作製したNb/AlO_x/Nbトンネル接合の断面模式図を示す。接合は、ジョセフソン集積回路技術に用いている方法に少し修正を加え、作製した¹⁰⁾。簡単に作製方法を述べると、まず、エッチングストッパーのMgO膜を堆積後、Nb膜のストレスの緩和のためのアンダーレイヤー(150nm)を形成する。この上にNb/AlO_x/Nb積層膜を基板全面に作製後、エッチングにより接合部を形成した。接合の下部Nb電極、Alバリア、上部電極のそれぞれの厚さは50nm、10nm、150nmである。層間絶縁膜としてSiO₂膜を用い、配線にはNb膜(450nm)を用いている。接合の臨界電流密度J_cは、酸素圧と酸化時間を制御することにより、50から500A/cm²まで変化させた。

図2に、典型的なNb接合に対する、規格化したサブギャップ電流I_{sg}の温度依存性を示す。接合は、比較的高い臨界電流密度(J_c=200A/cm²)と大きな面積(200×200μm²)を持つ。I_{sg}の測定電圧は0.5mVであり、4.2Kでの値で規格化している。実線はBCS理論に従うI_{sg}の温度依存性である。図から明らかなように、I_{sg}は1.2KまでBCS理論に従い、0.3Kでは飽和する傾向があるが、6桁オーダーのI_{sg}の減少が得られている。実際、準粒子電流の絶対値としては、4nA(電流密度としては、0.1pA/μm²に相当する)であり、ダイナミック抵抗値としては170kΩが達成されている。これら

の値は、高い J_c を持ち、かつ大面積の接合にもかかわらず、現在報告されている最高値^{6-8, 11)}に匹敵する。

トンネル接合を放射線検出器として動作させるには、できるだけ弱い磁場を印加し、ジョセフソン電流 I_c を抑圧する必要がある。 I_c の磁場依存性は、干渉パターンを示し、その特性は接合の形状に強く依存する。この(3)の性能を調べるため、正方形およびダイヤモンド形状のNb接合を作製した^{1,2)}。図3(a),(b)に、正方形およびダイヤモンド形状の接合に対するジョセフソン臨界電流の磁場依存性を示す。実線は理論曲線を示す。この図から分かるように、ダイヤモンド形状の接合の方が正方形の接合より弱い磁場で I_c が減少する。すなわち、放射線検出器としてはダイヤモンド形接合の方が適していると言える。しかし、フィスケ共振モードの抑制のためには、その接合形状の最適化を図る必要がある。

(4)の性能に関しては、現在、接合のNb配線の代わりに、 T_c の高いNbN配線¹³⁾を採用し、Nb層を準粒子トラッピング層とした接合の作製を試みている(図4)。図5に、NbN配線のNb接合に対する、規格化したサブギャップ電流 I_{sg} の温度依存性を示す。面積 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ の接合ではあるが、温度0.67Kにおいて、200pAという非常に小さなリーク電流になっていることが分かる。

4. おわりに

ここでは、超伝導トンネル接合の性能について述べるとともに、最近得られた結果を紹介した。放射線検出器としてのトンネル接合の性能に関しては、集積化など今後もまだ多くの研究課題が残っているが、着実に解決されてきていると感じている。

参考文献

- 1) 電総研彙報 (特集=ジョセフソン集積回路技術) 53 (1989).
- 2) 赤穂、梶村、応用物理 53 (1984) 479.
- 3) Faris, S.I. Raider, W.J. Gallagher, and R.E. Drake, IEEE Trans. Magn. MAG-19 (1983) 1293.
- 4) IBM J. Res. Develop. 24 (1989).
- 5) M. Gurvitch, M.A. Washington, and H.A. Huggins, Appl. Phys. Lett. 42 (1983) 472.
- 6) A. Matsumura, T. Takahashi, and M. Kurakado, J. Appl. Phys. 76 (1994) 4761.
- 7) P. Verhoeve, N. Rando, P. Videler, A. Peacock, A. van Dordrecht, D.J. Goldie, J.M. Lumley, J. Howlett, M. Wallis, and R. Venn, Proceedings of the SPIE conference, San Diego, 1994.
- 8) C.A. Mears, S.E. Labov, M. Frank, M.A. Lindeman, L.H. Hiller, H. Netel, and A.T. Barfknecht, presented at 6th Conf. on Low Temperature Detectors, Beatenberg, Switzerland, 1995, to be published in Nucl. Instrum. & Methods A.

- 9) K. Joosse, H. Nakagawa, H. Akoh, S. Takada, K. Maehata, and K. Ishibashi, to be published in Appl. Phys. Lett.
- 10) H. Nakagawa, G. Pepe, H. Akoh, L. Frunzio, R. Cristiano, E. Esposito, S. Pagano, G. Peluso, A. Barone, and S. Takada, Jpn. J. Appl. Phys. 32 (1993) 4535.
- 11) N. Rando, P. Videler, A. Peacock, A. van Dordrecht, P. Verhoeve, R. Venn, A.C. Wright, and J. Lumley, J. Appl. Phys. 77 (1995) 4099 .
- 12) R.Cristiano, E. Esposito, L. Frunzio, S. Pagano, A. Barone, G. Peluso, G. Pepe, H. Akoh, H. Nakagawa, and S. Takada, J. Appl. Phys. 75 (1994) 5210.
- 13) R.Cristiano, E. Esposito, L. Frunzio, S. Pagano, L. Parlato, G. Peluso, G. Pepe, U. Scotti di Uccio, H. Nakagawa, M. Aoyagi, H. Akoh, and S. Takada, Appl. Phys. Lett. 67 (1995) 3340.

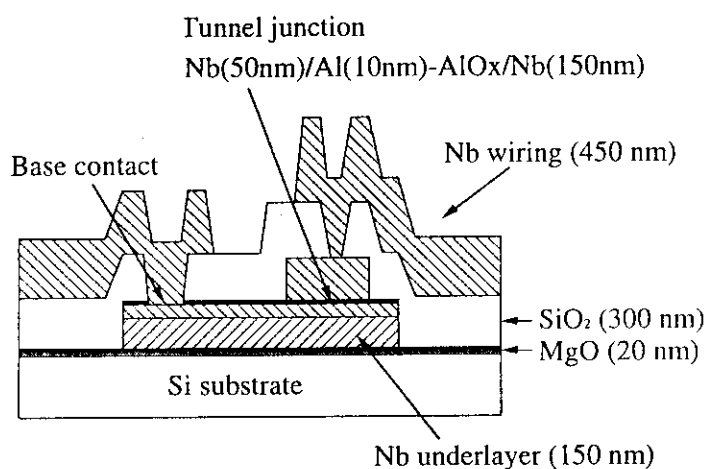


図1. Nbトンネル接合の断面模式図。

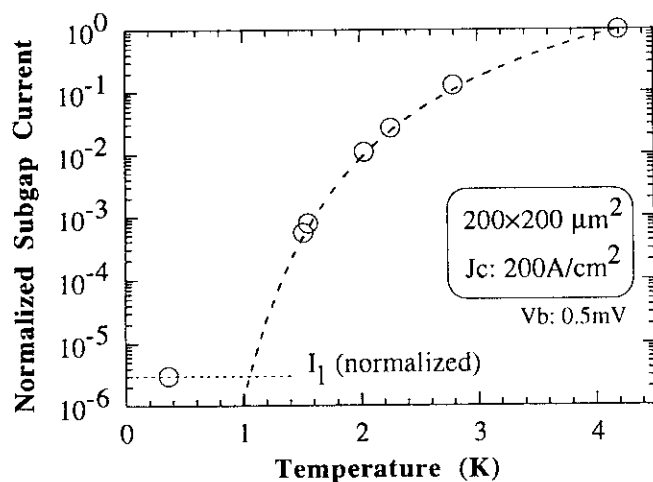
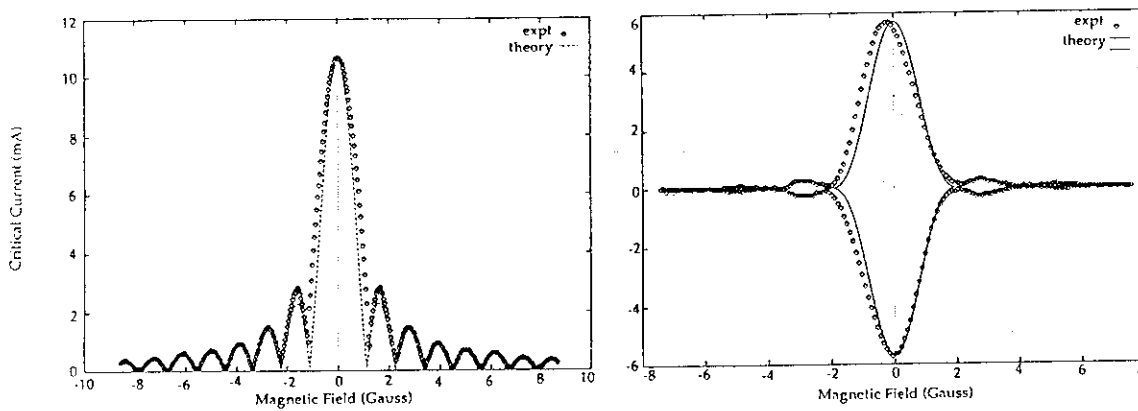


図2. 規格化したサブギャップ電流の温度依存性。



(a) 正方形接合

(b) ダイヤモンド形接合

図3. ジョセフソン電流の磁場依存性。

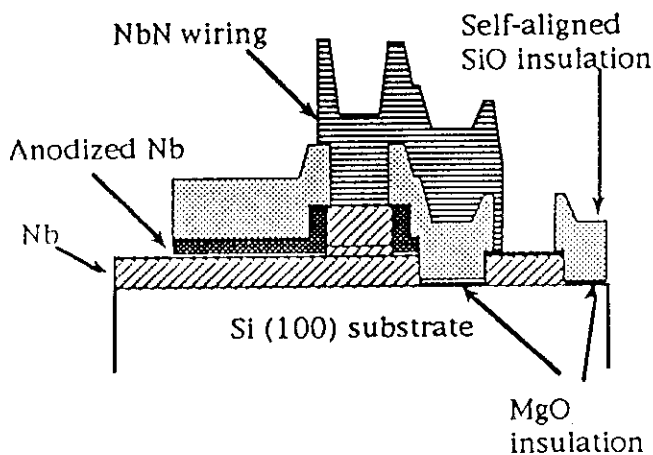


図4. NbN配線の接合の断面模式図。

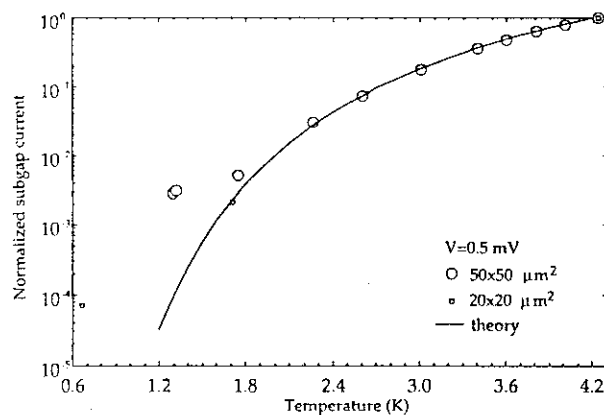


図5. NbN配線接合に対する規格化したサブギャップ電流の温度依存性。

3.6 超伝導トンネル接合素子のX線天文学への応用 Superconducting Tunnel Junction Detectors for X-ray Astronomy

大橋隆哉、山崎典子、菊池健一(都立大理)、倉門雅彦(新日鐵)、村上敏夫(宇宙研)
Takaya Ohashi, Noriko Yamasaki, Ken'ichi Kikuchi (Tokyo Metropolitan Univ.)
Masahiko Kurakado (Nippon Steel Corporation), and Toshio Murakami (ISAS)

1 はじめに

高いエネルギー分解能に合わせて、位置分解能をも持ちうるX線検出器として、超伝導トンネル接合検出器(以下STJと略)が注目され、わが国でも開発が進められている(例えば文献1)。ここでは、X線天文学の現状と将来を概観し、今後宇宙X線のスペクトロスコピーをわが国が進める上でSTJに期待される役割を述べ、最後に最近始まった都立大学における実験の現状について簡単に報告する。実験は新日鐵・倉門雅彦氏の協力の元に進められており、文部省科学研究費、試験研究B(代表者：大橋隆哉、平成7-9年度)の援助を得ている。

2 X線天文学の現状

X線天文学は1962年、アメリカのロケット実験によって始まった分野で、衛星やロケットの進歩によりこの30数年間に大きく発展した。X線では、可視光で見ることのできない高温(100万度～数億度)のガスや、強い磁場、相対論的な運動、強い重力などがある天体を調べるのに適している。中性子星やブラックホールといった、星の進化の最後に作られる高密度星は、光学的には暗いがX線で見ると非常に明るく輝いている。星の最期の超新星爆発は、星間空間にX線で輝く高温プラズマの泡を作り出す。また、誕生直後の原始星も温度が高いためX線で光っている。この他にも、銀河から流れ出した高温プラズマの様子や、銀河数100個を引きつけて銀河団という集団を作るダークマターの分布が、X線で光る高温プラズマの観測を元に調べられている。

X線天文学はこれまで順調に発展してきたが、その泣き所はロケットや科学衛星を使って大気圏の外へ出なければ宇宙観測ができないという点である。地球を包む大気は可視光や電波に対しては透明だが、X線や紫外線は通さない。このため衛星が上がらなくなるとX線天文学は存在できなくなる宿命にある。衛星一機の寿命は普通、軌道の寿命や姿勢制御燃料などのため5-6年である。このため、各国が協力して5-7年の間隔で新しいX線天文衛星を軌道に投入してきた。特に1986年のスペースシャトル、チャレンジャーの事故でアメリカの天文衛星計画が大幅に遅れ、独自に中小型衛星を上げ続けている日本が、この分野で世界をリードする状況となっている。

1993年2月に日本がアメリカと協力して製作し、宇宙科学研究所から打ち上げた「あすか」は、わが国では4番目のX線天文衛星にあたり、X線天体の撮像分光観測に大きな成果

を挙げつつある。X線の反射望遠鏡が4台搭載されており、焦点面のX線検出器としてはガス蛍光比例計数管 (GIS) と、X線 CCD(SIS) がある。エネルギー分解能 (FWHM) は6 keV でGISが450 eV、SISが150 eVである。この程度でも、0.5 keVから10 keVというエネルギー範囲で像とエネルギースペクトルとの両方が一度にとれるのが世界で初めてであること、SISのエネルギー分解能はこの分野としては画期的な値であるため、新発見が目白押しとなっている(論文集は文献2,3,4を、解説は文献5を参照)。カシオペア座などの超新星残骸では、星で合成され星間空間に放出された重元素の分布が測られたり、特性X線のエネルギーがドップラー効果でずれることを利用して、ガスが広がっていく運動の様子が始めて明らかにされている。参考のために図1にカシオペアA超新星残骸のSISでとったエネルギースペクトルを示す。いろいろな元素の出す特性X線が非常に強いこと、それらがSISでかなりよく分離観測されていることがわかる。この他にもケンタウルス座銀河団などでは、銀河団の中に分布する高温ガスが鉄などの元素を含んでいて、それらが銀河団の中心ほど濃くなっていることがわかった。

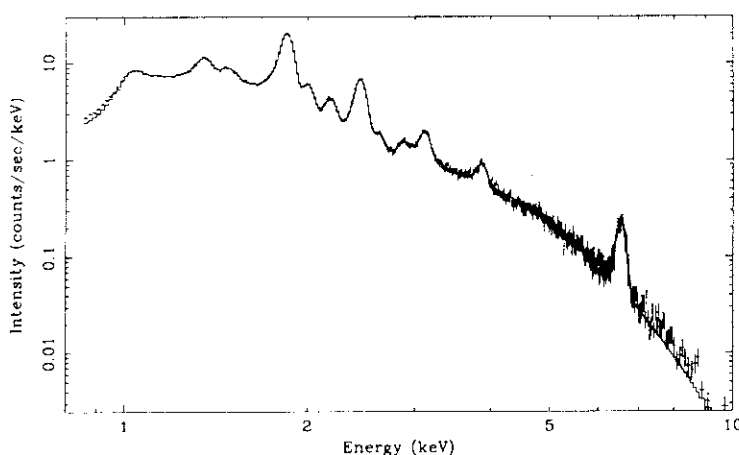


図1: カシオペア座A超新星残骸から「あすか」が観測したエネルギースペクトル。分解能は6 keVで約150 eV(文献2, L151, S. Holt et alより)。

3 ASTRO-E計画とその後

今後5-6年の間に、アメリカのAXAF、ヨーロッパのXMMという10トンクラスのX線天文衛星が上がる予定である。日本もこれに対抗して重さ1.6トンのASTRO-Eを2000年2月に打ち上げるようになっており、その製作がスタートしている。この計画の目玉はマイクロカロリメータという検出器である。検出器の原理などについては本集録、袁輪氏の稿を参照されたい。ASTRO-Eのカロリメータでは、HgTeの吸収体とSi温度計を組み合わせた素子32個からなるアレイを、65 mKに冷却しエネルギー分解能約12 eVを達成する予定である。素子はアメリカのWisconsin大と、NASA Goddard Space Flight Centerで開発されたものである(例えば文献6を参照)。クライオスタットとしては固体Ne、液体Heおよび断熱消磁が用いられる。冷却槽全体で約400kgの重量があり、軌道上での寿命は約2

年を予定している。ASTRO-Eの主目的は高いエネルギー分解能を用いたX線天体の分光観測である。

マイクロカロリメータは、現時点で衛星搭載が可能であると同時に、エネルギー 10 keV までで高感度の分光観測ができるという要件を満たす唯一の検出器であろう。ブラッグ結晶や、回折格子は検出効率が低く、エネルギー範囲も限られており広がった天体の分光が不可能である。従ってASTRO-Eではカロリメータにより $\Delta E = 10$ eV オーダーの分光を目指すのが最も成果の期待できる選択と考えられる。しかしその後の2005-6年以降にうち上がるミッションを考える場合には、いろいろな点でカロリメータの性能を上回る検出器を考える必要がある。カロリメータの問題点として今上がっているのは次のような点である。

1. 動作温度が低く、温度安定度に対する要求 ($\Delta T \leq 10\mu\text{K rms}$) も厳しい。これが寿命を2年と狭めてしまう主な原因である。
2. X線の計数率が $0.25\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ の素子当たり毎秒2カウントを越えると性能が劣化する。このため、明るいX線源を見るためには検出器の前にフィルターを置き、観測毎に出し入れする必要がある。
3. 出力パルスの時定数が数10 msecと遅いため、手間のかかった波形処理を行わなければならない。例えば他の検出器では問題にならない音響ノイズ等の影響を受けやすい。
4. カロリメータ素子は、吸収体と温度計の接合など一個一個手作りする必要がある。このため多数の素子をアレイにして像をとることが不可能。
5. X線以外の、可視光、赤外、荷電粒子などを効果的に除去する手段がなく、薄いフィルターを何重にも前に置く以外に非X線から逃げる方法がない。

STJはこうした問題点に関してカロリメータよりも有利な点が多く、将来のX線天文学の検出器として有望ではないかと考えられる。特に、X線に対する出力パルスが数 μsec 以下の立ち上がりで、数kcという計数率にも十分耐えられる点、また直列接合またはアレイを用いて位置検出能力を持たせ得る点はカロリメータに比べて大きく優れた要素である。

4 都立大の実験

都立大では新日鐵倉門氏にお借りした ^3He クライオスタットに、外部からX線を照射できるような突出構造を設けて実験を行なっている。15 μm 厚のアルミホイルが常温フランジに、2 μm 厚のアルミナイズドマイラーが液体窒素温度と、 ^4He 温度の2ヶ所のフランジについており、X線はこれらを通して素子に入射するようになっている。直径1 cmの銅のフィンガーが、クライオ本体から約10 cmつき出していて、素子はこの上にマウントされる。冷却実験を何度も繰り返しているが、フィンガーの先端は0.3 Kを30時間程度安定に保持できている。

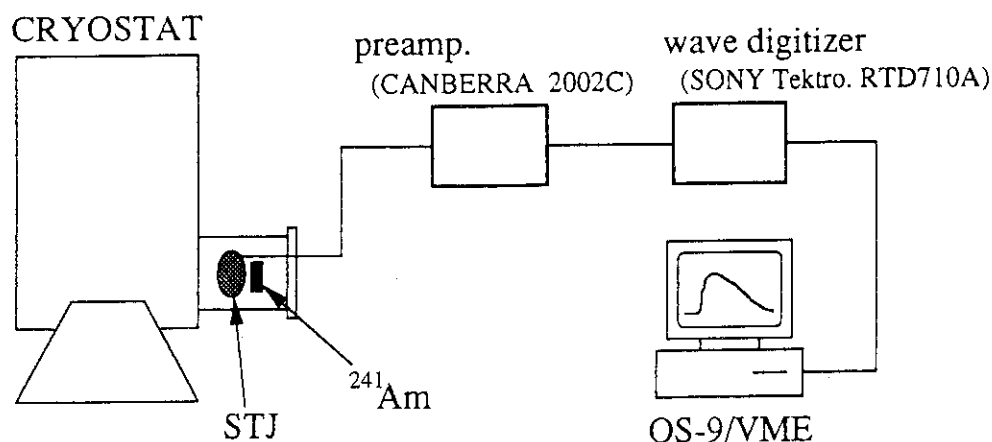


図 2: STJ の出力波形の測定系の概念図

STJ 内部の素過程を理解するとともに、位置検出能力やバックグラウンド除去など STJ のポテンシャルを引き出すためには、単なるパルスハイトだけでなく信号波形そのものをデジタル信号として取り出して、きめ細かく解析することが有効であると考えられる。ここでは波形デジタイザー (Tektronix RTD710A) を用いて、Charge sensitive アンプ (Canberra 2002C) の出力信号を解析することとした。単接合の STJ 素子に X 線を外から当てる実験を試みたが、フラックスが弱過ぎて検出できているかどうかの確認ができなかった。そこで検出効率のより高い直列接合素子に α 線源 ^{241}Am を直接当てる実験を行なって、信号波形を得ることに成功した。(但しデータが得られたのは本研究会の後であった。) 素子は新日鐵・倉門の製作したもので、一辺 2 cm の中に直径 200 μm の素子が 56 個直列に配置されている。セロテープに穴を空けてコリメートし、素子の上 3ヶ所に α 線を当てた結果を図 3 に示す。(詳細は文献 7 を参照)。当てる場所を約 1 mm 動かすと、パルスの立ち上がり時間が約 2 μsec 変化することがわかる。まだ X 線で信号を確認し、エネルギー分解能を調べるなどの必要があるが、0.2-0.3 mm 程度の位置分解能は現在の直列接合素子を持ちいても得ることができるだろうと考えられる。しかし立ち上がり時間が数 μsec というのは単接合素子に比べて数 10 倍長い。これは X 線が吸収されるサファイア基板の中でフォノンが多数回反射された後に STJ に捉えられるからと思われる。単接合素子とも比較しながら STJ 内部の素過程を実験的に調べ、性能向上の指針を得たいと考えている。

5 おわりに

STJ が ASTRO-E 以後の X 線天文学でどの程度主役を演じることになるかは、まだ不明であり、今後の開発努力の如何にかかっている。衛星観測に用いるという観点からは、カロリメータに匹敵する (たとえば 6 keV で 20 eV 以下の) エネルギー分解能プラス 0.1 mm 程度の位置分解能プラス 1 cm 平方程度の有効面積といった性能を同時に満足できる素子があ

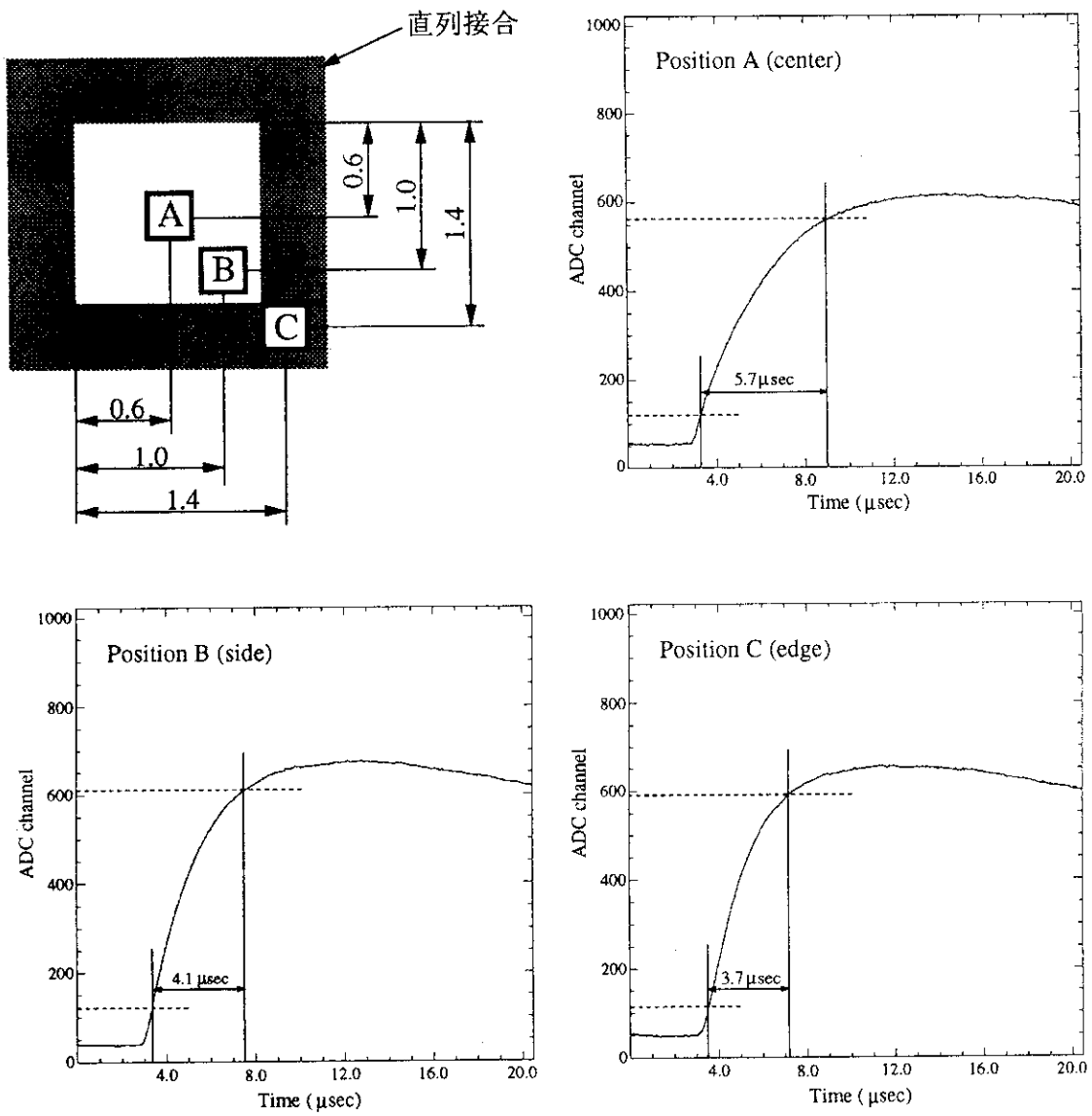


図 3: 直列接合素子に α 線を入射した実験の結果。 α 線の入射位置 A,B,C と出力波形。波形の縦軸は ADC チャンネル、横軸は μsec で示した時間。立ち上がり時間は 10-90% で定義。(文献 7 より)

れば、恐らくSTJを選択することになると考えられる。これらの中でも、X線スペクトロスコープを目指す立場からは、特にSTJがエネルギー分解能の面でカロリメータに対してどこまで対抗できるものになるかが焦点になっていくと考えられる。STJによる宇宙X線観測を実現すべく、今後の開発実験を協力に進める必要があると考えている。

参考文献

- 1 倉門雅彦 1994, Radioisotopes, 43, 354
- 2 Publ. Astron. Soc. Japan, 1994, 46, No. 3 & 4 の各論文
- 3 Astrophys. Journal Letters, 1994, 436, No. 1 の各論文
- 4 "New Horizon of X-ray Astronomy", ed. by F. Makino & T. Ohashi, 1994, (Universal Academy Press) の各論文
- 5 大橋隆哉 1994, 科学、64, No. 9, p. 552
- 6 Juda, M. et al. 1992, SPIE, 1743, 398
- 7 菊池健一 1996, 修士論文 (東京都立大学)

3.7 トンネル接合検出器の放射光実験への応用

Application of Tunnel-Junction Detectors to
Synchrotron-Radation Experiment

九大工	石橋健二、前畑京介、野田孝浩
Kyushu Univ	Ishibashi Kenji, Maehata Keisuke, Noda Takahiro
電総研	仲川 博、赤穂博司、高田 進
ETL	Nakagawa Hiroshi, Akoh Hiroshi, Takada Susumu
高エネ研	中島哲夫
KEK	Nakashima Tetsuo
理研	清水裕彦
RIKEN	Shimizu Hirohiko
原研	片桐正樹
JAERI	Katagiri Masaki

1. はじめに

高分解能X線検出器は、特性X線を利用した元素分析、天文物理学など、様々な分野で利用されている。分解能の高い検出器として半導体検出器が実用化されているが、そのエネルギー分解能は統計的揺らぎによる限界にまで近づいている。半導体よりも優れた分解能を得るためには、統計的揺らぎがより小さくなる物質を用いる必要がある。超伝導体は一つの電荷キャリアを作るのに必要なエネルギー ϵ がmeVのオーダーであり、超伝導体を放射線検出器として用いた場合、現在実用化されている半導体検出器と比較して1桁以上よいエネルギー分解能が期待できる。

電総研と九大・工の研究グループでも、Nbを用いた超伝導トンネル接合検出器を試作し、1989年に初めてX線を検出¹⁾した。最近では、世界的に超伝導トンネル接合によるX線計測の研究が活発になり、半導体検出器よりも優れたエネルギー分解能^{2,3)}も得られるようになってきた。しかし、超伝導トンネル接合検出器の応答はそのほとんどが6keV以下の特性X線を用いたものがほとんどであり、その他のエネルギーの領域で超伝導トンネル接合検出器がどのような応答をするかは調べられていない。本研究では、シンクロトロン放射光を用いて4~15keVのX線に対する超伝導トンネル接合検出器の応答を調べたので報告する。

2. 超伝導トンネル接合

測定に用いたトンネル接合の断面を図1に模式的に示す。寸法等の概要を表1に示す。単位面積当たり常電導抵抗は、 $4 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ である。トンネル接合はフォトリソグラフィで製作⁴⁾した。シリコン基板の上に150nm厚のNbアンダーレイヤをスパッタ蒸着したあと、50nm厚のNbベース電極を敷き、さらに10nm厚のAl層をつけた後、Al層の酸化を行い、最後に200nm厚のNb上層電極を成膜した。その後、下層電極及び上層電極は、それぞれ反応性イオンエッチング(RIE)での形を形成した。続いて、基板を電解質溶液に浸し、Si基板を通してNb電極に電流を流して陽極酸化を行った。最後に、Nbで配線を行った。下層Nbの全体の厚さは200nmであるが、上層Nbの方は全厚さが50nmとかなり厚くなっている。また、下層Nbは陽極酸化をしやすくするために、直接、Si基板の上に作成した。

表1 超伝導トンネル接合の概要

Structure	Nb/Al/AIOx/Nb
Junction size	100 x 100 μm^2 , 30 x 30 μm^2
Nb thickness	650 (200+450) nm (top electrode) 200 (150+50) nm (base electrode)
Wiring lead width	4 μm
Normal resistance	$4 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$
Leakage current	0.13 μA at 0.5 mV for 100 x 100 μm^2 (0.4K, 15mT)
	0.005 μA at 0.5 mV for 30 x 30 μm^2

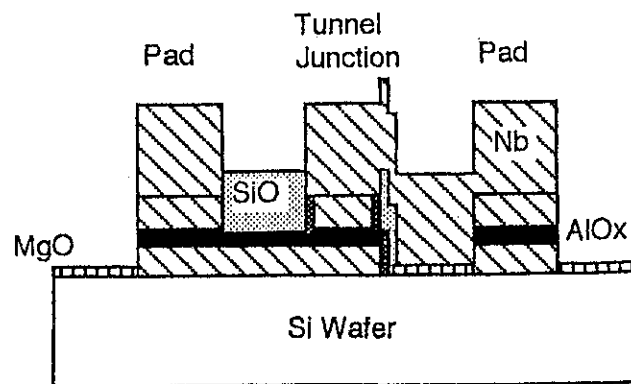


図1 超伝導トンネル接合の断面模式図

3. シンクロトロン放射光の測定

実験は高エネルギー物理学研究所の放射光実験施設BL6C1ビームラインで行った。このビームラインは本来、8~30keVの単色X線発生用である。しかし、トンネル接合検出器の実験ではSiモノクロメーターの角度を調節して、エネルギーを4~20keVに下げて測定を行った。放射光実験施設のノイズ環境は非常に悪く、その中で実験を行った。ノイズの周波数レンジは、電源ラインの50Hzから50MHzまでであった。このノイズ環境の悪さは、大電力機器があることや、多くの異なったグループが同時に実験を行うことに起因するものである。本研究では、最終的に計測機器の接地方法等を工夫して、ノイズの影響をかなり低減できた。測定実験はX線入射用のBe窓のついた³Heクライオスタットを用いて0.4Kの温度で行った。

100×100 μm^2 のトンネル接合検出器の6keVのX線に対するスペクトルを図2に示す。プリアンプからの出力信号の立ち上がり時間は0.8 μs であった。100×100 μm^2 のトンネル接合検出器の動的抵抗値は2.5k Ω であった。6keVのX線に対するエネルギー分解能は半値幅で520eV、またパルサーの半値幅は160eVであった。図3に100×100 μm^2 のトンネル接合検出器の4~15keVのエネルギーのX線に対するスペクトルを示す。6keVではX線のピークが見られるが、エネルギーが大きくなるにつれて、ピークがはっきりしなくなっている。

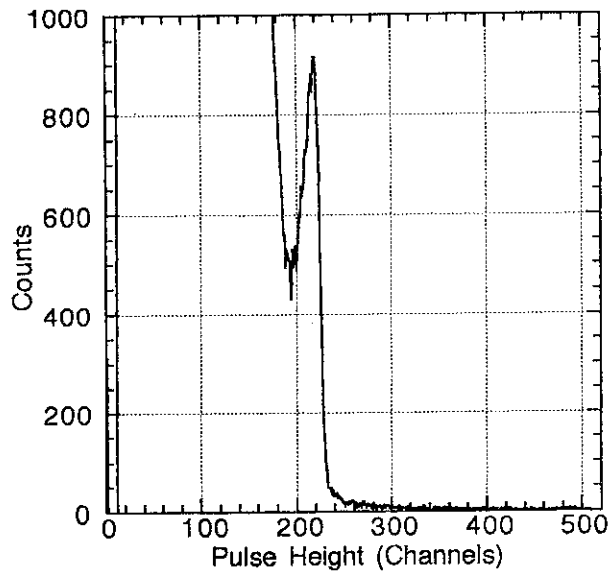


図2 6 keVのX線によるパルス波高スペクトル
($100 \times 100 \mu\text{m}^2$)

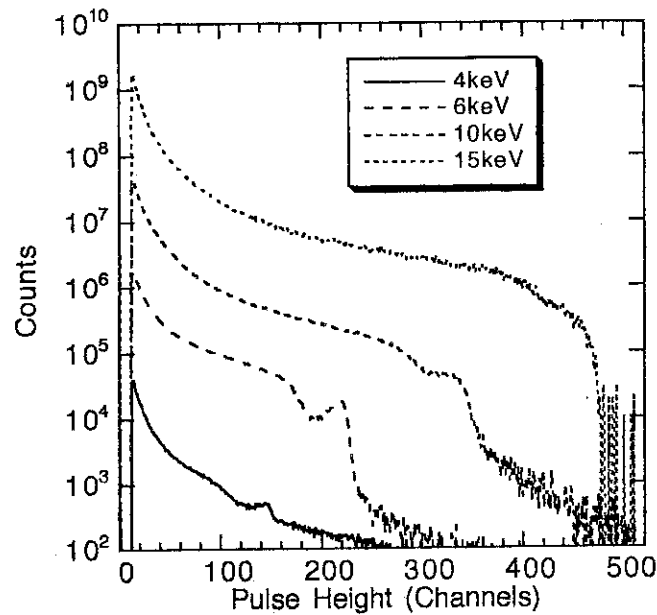


図3 6 keV~15 keVのX線によるパルス波高スペクトル
($100 \times 100 \mu\text{m}^2$)

$30 \times 30 \mu\text{m}^2$ のトンネル接合検出器の6 keV及び10 keVのX線に対するスペクトルを図4に示す。10 keVではピークが非常に分かりにくいものとなっている。サイズの小さなトンネル接合検出器はX線の測定には向かないことがわかる。

一つの信号電荷を作るのに必要なエネルギー ϵ は放射線検出器では重要なパラメーターである。エネルギー応答が理想的に線形である検出器の場合、 ϵ は放射線のエネルギーに依らない。図

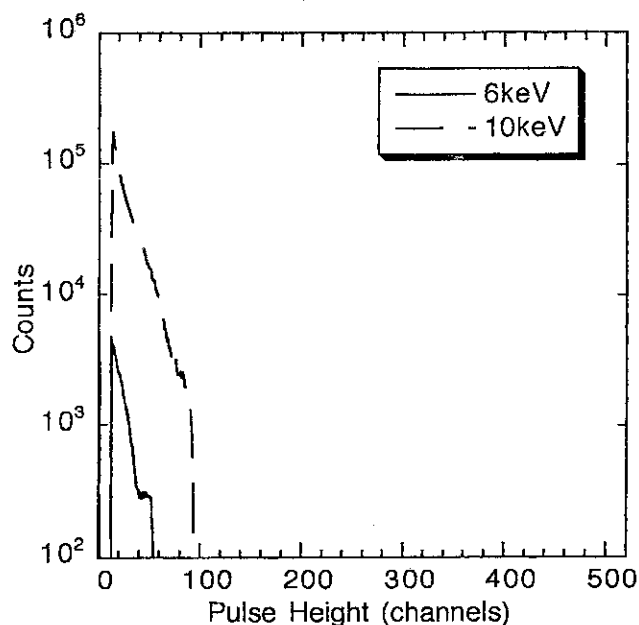


図4 6 keV及び10keVのX線によるパルス波高スペクトル (30×30 μm^2)

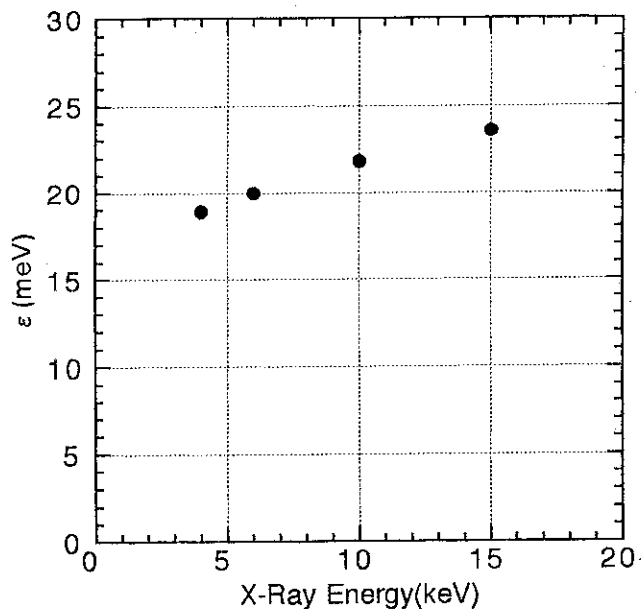


図5 信号電子1個あたりエネルギー ϵ のX線エネルギー依存性 (100×100 μm^2)

5に100×100 μm^2 のトンネル接合検出器の ϵ の値を示す。 ϵ の値は20meVであった。このトンネル接合検出器では、4~15keVの間で ϵ の値は20%増加した。図6には30×30 μm^2 のトンネル接合検出器の ϵ の値を示す。100×100 μm^2 のトンネル接合検出器のものに比べて ϵ の増加の割合が大きい。エネルギー応答の線形性はサイズの小さなトンネル接合検出器の方が悪いといえる。

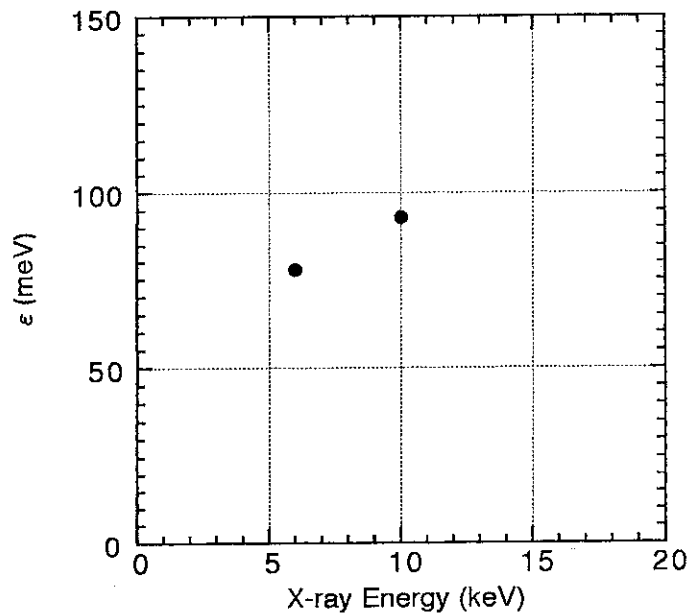


図6 信号電子1個あたりエネルギー ϵ のX線エネルギー依存性
($30 \times 30 \mu\text{m}^2$)

4. まとめ

放射光を使ってNb系超伝導トンネル接合検出器のX線エネルギー応答を調べた。100×100 μm^2 のトンネル接合では、エネルギーが高くなるにつれてX線信号が線形より下回るようになり、4～15keVの領域でその線形性のずれは20%であった。サイズの小さなトンネル接合検出器の方がサイズの大きなトンネル接合検出器よりもエネルギー応答の線形性が悪くなる傾向がある。

参考文献

- (1) K. Ishibashi, K. Mori, K. Takeno, T. Nagae, Y. Matsumoto, S. Takada, H. Nakagawa, H. Akoh: IEEE Trans. Magn. Vol.27, 2661(1991)
- (2) M. Kurakado, T. Takahashi, A. Matsumura: Proc. SPIE Vol.1743, 351(1992)
- (3) C. A. Mears, S. E. Labov, L. H. Hiller, M. Frank, H. Netel, F. Azgui, A. T. Barfknecht: IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.5 3069(1995)
- (4) H. Nakagawa, G. Pepe, H. Akoh, L. Frunzio, R. Cristiano, E. Esposito, S. Pagano, G. Peluso, A. Barone, S. Takada: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 32, 4535(1993)

3.8 S T J の集積回路への応用

Josephson Integrated Circuits

電子技術総合研究所 黒沢 格
Electrotechnical Laboratory Itaru Kurosawa

1. はじめに

ジョセフソン集積回路を利用する応用の一つの大きな目標は、ジョセフソンコンピュータに代表されるデジタルシステムである。ジョセフソンコンピュータは、ジョセフソン素子の持つ超高速スイッチ動作（<数ps）と低消費電力（約 $1\mu\text{W}/\text{ゲート}$ ）の両立という特性を生かす超高性能コンピュータを目指している。いうまでもなくデジタル素子のスイッチ動作が高速であることは、高速コンピュータの基礎である。しかしながら、素子の高速性だけではコンピュータシステムの高速度は得られない。現在のシステムでも、そのマシンサイクルの60~80%程度は信号の伝搬による遅延時間が占めているという。すなわち、たとえスイッチ時間が0の理想的な素子に置き換えたとしても、そのままではシステムの高速度は2倍にもならないことになる。このことから、信号伝搬による遅延時間をできるだけ小さくすることがシステムの高速度化にとって極めて重要であることが分かる。信号の伝搬速度を光の速度より速くすることはできない。したがって、伝搬時間を小さくするには信号の伝搬距離を短くする必要がある。この理由から、高速コンピュータシステムは必然的に小型でなければならない。ジョセフソン集積回路は、極めて高密度な実装が可能になると期待されている。ジョセフソン素子の消費電力が低く、発熱が小さいために熱放散の問題が軽減されるからである。半導体素子の性能が急速に向上した今日においても、ジョセフソン素子は消費電力×遅延時間の積で2桁以上の優れた性能を示している。

本稿では、最近のジョセフソン集積回路プロセスについての話題を述べることにする。

2. VLSI化を目指して

ジョセフソン集積回路にとって、集積度の向上は将来の発展に向けて極めて重要な課題である。高速度性、低消費電力性の実証された今日[1]、半導体との比較においても、ジョセフソン集積回路の高集積化は次の重要なステップであり、現状のLSIレベルから、VLSIレベルへと挑戦を進めていく必要がある。大容量のジョセフソンRAMは、高速ジョセフソンコンピュータの極めて重要な構成要素であるとともに、いわゆるテクノロジードライバとしてジョセフソン集積回路技術を将来のVLSIレベルへ引き上げる重要な役割を担っている。これまでに、1k~4kビットのジョセフソンRAMが試作され、そのうち1kビットの可変しきい値型RAMの全ビット動作[2]に続き、最近4kビットRAMの動作が確認された[3]。今後、より大容量のRAMの実現が期待される。図1は、現在試作を進めている16kビットのジョセフソンRAMのチップ写真である[4]。

このような高集積化を支える技術として、リソグラフィ技術と微細加工技術がある。リソグ

ラファイ技術については、従来の光源にg線(波長436nm)を用いた露光法に比べ、最新の半導体作製に用いられているi線(波長365nm)による露光法を採用することにより微小ジョセフソン素子の特性のばらつきが格段に改善されることが確認されている。2 μ m角のジョセフソン素子について、それまで臨界電流値のばらつき標準偏差が8.4%であったものが、半分以下の3.9%に低下した。さらに、最近のNECのデータでは1.4%にまで低下しており、少なくともこの点だけからはVLSIに対応できるものと思われる[5]。

微細加工技術についても、半導体DRAM生産ラインへの導入が進んでいるECR(Electron Cyclotron Resonance)プラズマエッチング法がNb等超伝導材料についても効果的であることが分かった。従来のドライエッチング法であるRIE(Reactive Ion Etching)法では試料空間とプラズマ発生空間が同一であるため、どうしても高ガス圧下での等方的なエッチングとなり微細化には適さない。一方、ECR法では高密度のプラズマを別空間で発生させているため、試料は低ガス圧下で垂直にエッチングされ微細化に適する。図2にNbのECR法によるエッチング断面を示す。側面が垂直に削れていることが分かる。また、図3はこのような作製法を用いたサブミクロンジョセフソン素子の電流電圧特性である。

ジョセフソン素子の微細化が進むとともに、臨界電流値を一定に保つために高い臨界電流密度が求められる。高い臨界電流密度を持つジョセフソン素子は、図4に示すようにプラズマ時定数、CR時定数ともに減少し極めて高速な動作が可能となることが期待される[6]。10kA/cm²を越えるようになれば、ゲート1段あたりの遅延時間が1pSを切ることも夢ではない。しかし、現状では10kA/cm²を越える臨界電流値を持つ良好な特性のジョセフソン素子は得られていない。もはや、そのような臨界電流値ではトンネル障壁の厚さが障壁材料であるアルミ酸化物の1原子層に近づいていることもあり、ジョセフソン素子の高電流密度化は今後の重要な課題である。

微細化にともない使用する露光機の焦点深度が浅くなることから、試料表面の平坦性が求められるようになる。また、微細化のための垂直なエッチングでは段差における絶縁層の被覆不足による絶縁不良や、段切れによる配線層の断線等も大いに問題となる。そこで、CMP(Chemical Mechanical Polishing)法を用いた新たな平坦化技術の導入が図られている。ジョセフソン集積回路プロセスにおける微細化の典型的な隘路は、ジョセフソン素子のいわゆる「頭だし」の工程である。図5に示すジョセフソン集積回路の断面図において、Nb/AlO_x/Nb Junctionと示したジョセフソン素子の上部電極とその上の配線層の接続のための目合わせ精度が微小ジョセフソン素子の寸法を律則する(図ではズレが無いように書いてある)。そのため自己整合型のプロセスが望まれ、これまでも用いられてきたが、従来の自己整合プロセスは絶縁層であるSiO₂のリフトオフや絶縁層を作るための陽極酸化を用いるため、さらなる微細化は困難であった。新しいCMPによる平坦化を用いた自己整合プロセスのプロセス断面図を図6に示す[7]。この方法では、ジョセフソン素子をエッチングし、その上全面に絶縁層を堆積した後、CMPによりジョセフソン素子の上部電極の表面まで機械的に研磨して配線層とのコンタクト面を出す(「頭だし」)。したがって、目合わせ精度に対する要求は軽減され微小ジョセフソン素子の集積化に適すると考えられる。

3. 今後の課題

ジョセフソン集積回路技術は80年代大いに進展し、他のジョセフソン素子の応用分野の発

展にも貢献してきた。しかし、ジョセフソンコンピュータに代表されるデジタル応用技術は、その後停滞の感が否めない。どのようなデジタル応用が望まれるのか、どのような場面で生かせるのか、明確になってはいない。現状を突破するための課題を挙げると、

1) ジョセフソン集積回路のVLSI化

ジョセフソンLSIはゲート速度、消費電力の点で期待通りの優れた性能を示しているが、高速半導体と比べても未だ集積度が十分とはいえない。上に述べたようなVLSI化を目指した技術開発が必要である。

2) 半導体とのハイブリッド化[8]

ジョセフソン集積回路の得意な点、不得意な点(大容量メモリなど)がはっきりしてきた。半導体システムとの間でそれらを補い合う、ハイブリッドシステムの考えを導入する必要がある。

3) 高速動作実現技術

素子レベルでの高速性は示されているが、1GHzを超える周波数の交流電源を回路に供給することは簡単ではない。また、psの信号をチップ間でやりとりするための実装技術[9]も未解決である。

4) 新回路方式

最近、特に米国において、RSFQ[10]などの単一磁束量子を利用した回路の研究が盛んである。非同期式回路方式[11]の採用など、アーキテクチャを含めて新しいシステムの実現する可能性がある。

5) デジタル応用分野の探索

コンピュータへの応用は、一つの典型的なデジタルシステムへの応用ととらえるべきであろう。最近では、通信やネットワークへの応用を目指したスイッチ回路の研究が盛んである。

参考文献

- [1]H. Nakagawa, I. Kurosawa, M. Aoyagi, S. Kosaka, Y. Hamazaki, Y. Okada, and S. Takada, IEEE Trans. Appl. Supercond., 1, pp.37-47 (1991).
- [2]I. Kurosawa, H. Nakagawa, M. Aoyagi, and S. Takada, IEEE J. Solid-State Circuits, 26, pp.572-577 (1991).
- [3]S. Nagasawa, Y. Hashimoto, H. Numata, and S. Tahara, IEEE Trans. Appl. Supercond., 5, pp.2447-2452 (1995).
- [4]I. Kurosawa, H. Nakagawa, M. Aoyagi, and S. Takada, Extended Abst. 4th Int. Superconductive Electronics Conf., pp.11-12 (1993).
- [5]H. Numata, S. Nagasawa, M. Koike, and S. Tahara, Extended Abst. 5th Int. Superconductive Electronics Conf., pp.201-203 (1995).
- [6]M. Maezawa, M. Aoyagi, H. Nakagawa, I. Kurosawa, and S. Takada, Appl. Phys. Lett., 66, pp.2134-2136(1995).
- [7]M. Bhushan, Z. Bao, B. Bi, M. Kamp, K. Lin, A. Oliva, R. Rouse, S. Han, and J. E. Lukens, Extended Abst. 5th Int. Superconductive Electronics Conf., pp.17-19 (1995).
- [8]H.Kroger and U.Ghoshal, IEEE Trans. Appl. Supercond., 3, pp.2307-2314 (1993).

- [9]S. Tanahashi, T. Kubo, R. Jikuhara, G. Kaji, M. Terasawa, M. Tacano, H. Nakagawa, M. Aoyagi, I. Kurosawa, and S. Takada, IEICE Trans. Electron., E77-C, pp.1157-1163(1994).
[10]K. K. Likharev and V. K. Semenov, IEEE Trans. Appl. Supercond., 1, pp.3-28(1991).
[11]I. Kurosawa, H. Nakagawa, M. Aoyagi, M. Maezawa, Y. Kameda, and T. Nanya, Extended Abst. 5th Int. Superconductive Electronics Conf., pp.204-206 (1995).

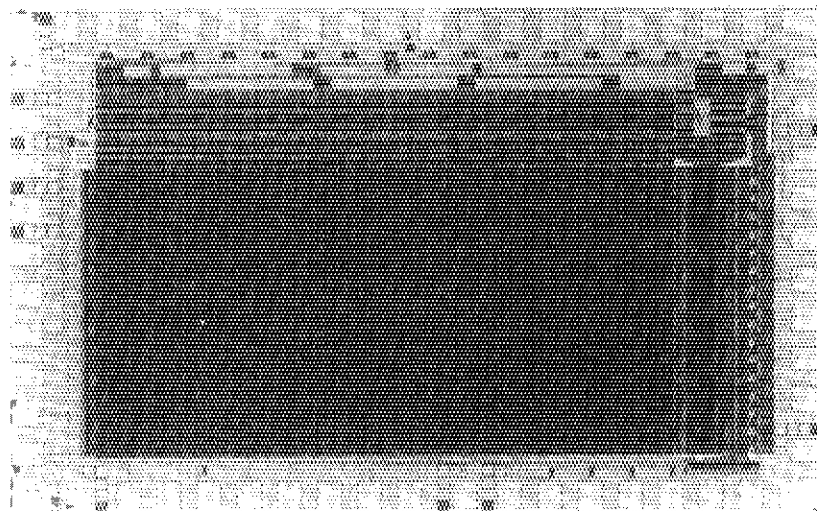
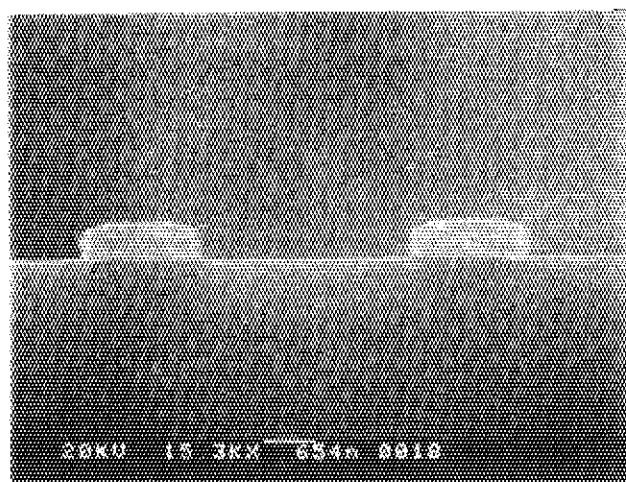
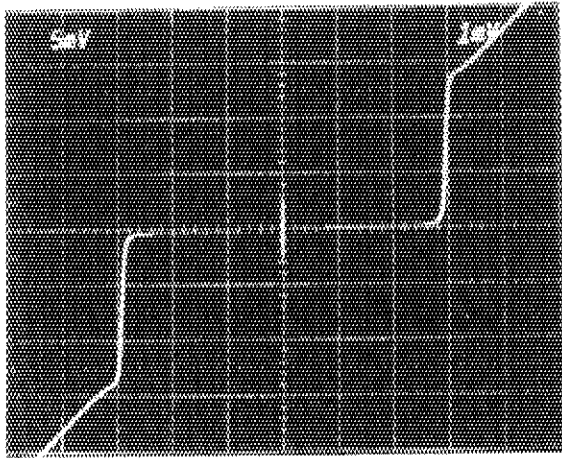


図1. 16kビットジョセフソンRAM試作



Nb:500nm
CF₄: 0.4 Pa
μ-Wave Power: 360 W
rf Bias Power: 5 W

図2. ECRエッチングによるNbの断面



x: 1 mV/div.
y: 5 μA/div.

図3. 0.6x0.6μm²のジョセフソン素子の電流電圧特性

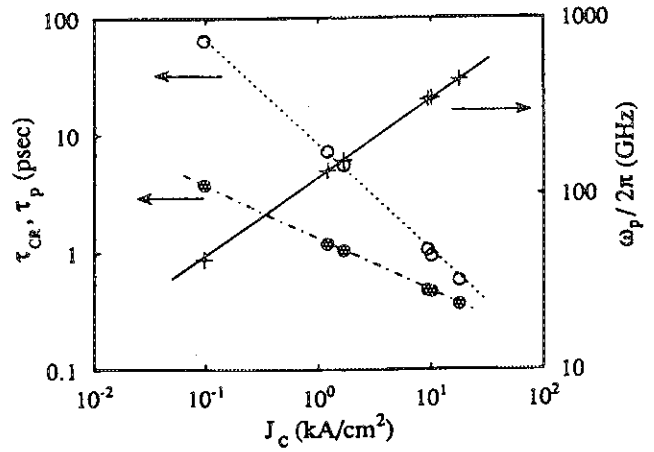


図4. ジョセフソン電流密度(Jc)と時定数の関係

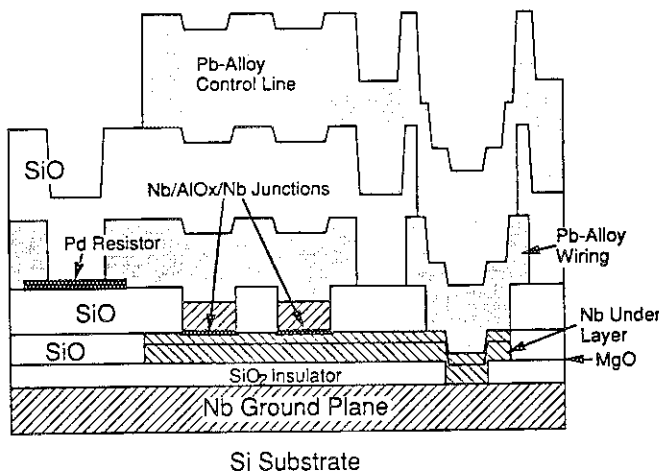


図5. ジョセフソン集積回路断面図

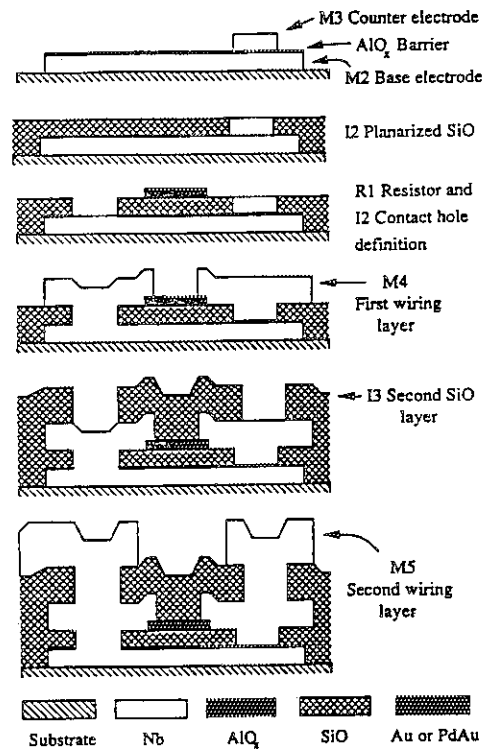


図6. CMPによるプロセス